REN
Reporte Epidemiológico Nacional
Volumen 5 Número 2. Abril - junio de 2023

Análisis espaciotemporal del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia. La importancia de la conectividad de regiones en la propagación

Gina Polo Infante[1], Milena Borbón Ramos[1], William León Quevedo[1], Diana Walteros Acero[2], Franklyn Prieto Alvarado[3]

[1]Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgo en Salud Pública. Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia. Egresado Programa de Epidemiología de Campo (FETP) avanzado, Colombia

[2]Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgo en Salud Pública. Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia. Egresado Programa de Epidemiología de Campo (FETP) avanzado, Colombia

[3]. Médico, doctorado en Salud Pública, magíster en Salud Pública, magíster en Bioética, especialista en epidemiología, egresado Programa de Epidemiología de Campo-FETP avanzado, director de Vigilancia y Análisis del Riesgo en Salud Pública del Instituto Nacional de Salud, Bogotá D.C., Colombia

Citación sugerida: Polo G, Borbón M, Quevedo W, Walteros D, Prieto F. Análisis espaciotemporal del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia. La importancia de la conectividad de regiones en la propagación. REN [Internet]. 2023. jun; 5(2): 30-43. doi: https://doi.org/10.33610/28059611.141

Resumen

Introducción: la pandemia por SARS-CoV-2 desafió los sistemas de salud e impulsó el uso de tecnologías y el entendimiento de modelos espaciales para la anticipación de la respuesta epidemiológica, este estudio examinó el patrón espaciotemporal de la propagación del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia.

Metodología: estudio transversal, en el cual se consideraron propiedades de primer y segundo orden como la intensidad espacial y la estructura de covarianza, para el primer millón de casos en el país, entre el 03 de marzo al 24 de octubre de 2020. Se usaron datos del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (Sivigila), el censo nacional de población del DANE y del Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras del Ministerio de Transporte, se geocodificaron los casos a partir de la dirección de residencia y se analizaron utilizando herramientas como ArcGIS Pro y GVsig.

Resultados: la distribución geográfica de los casos no fue aleatoria, concentrándose principalmente en áreas metropolitanas y distritos con alta densidad poblacional y una red vial nacional y departamental interconectada. Los municipios conectados por vías nacionales mostraron una mayor incidencia y mortalidad por SARS-CoV-2 en comparación con aquellos conectados por vías departamentales o sin este tipo de infraestructura. Se evidenció una asociación significativa entre la densidad de población y la incidencia de casos y muertes.

Conclusiones: estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la conectividad vial como un factor crucial en la propagación de enfermedades, especialmente en contextos urbanos y áreas vulnerables como destinos turísticos y zonas agrícolas; es por esto, que los planes de geoprevención y salud pública deben priorizar las áreas más conectadas y vulnerables ya mencionadas.

Palabras clave: COVID-19, infecciones por Coronavirus, análisis espacial, geografía médica, Colombia

Instituto Nacional de Salud

Salud

Spatiotemporal analysis of the first million of cases of SARS-CoV-2 in Colombia. The importance of regional connectivity in the propagation

Gina Polo Infante[1], Milena Borbón Ramos[1], William León Quevedo[1], Diana Walteros Acero[2], Franklyn Prieto Alvarado[3]

[1.] Directorate of Surveillance and Risk Analysis in Public Health, National Institute of Health of Colombia. Graduate of the Field Epidemiology Training Program (FETP) advanced, Colombia

[2.] Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgo en Salud Pública. Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia. Egresado Programa de Epidemiología de Campo (FETP) avanzado, Colombia

[3.] Physician, Doctorate in Public Health, Master in Public Health, Master in Bioethics, specialist in Epidemiology, graduate and tutor of the Advanced Field Epidemiology Program (FETP) advanced-Colombia, director of Surveillance and Risk Analysis in Public Health at the National Institute of Health, Bogotá D.C., Colombia

Suggested citation: Polo G, Borbón M, Quevedo W, Walteros D, Prieto F. Análisis espaciotemporal del primer millón de casos de sars-cov-2 en Colombia. La importancia de la conectividad de regiones en la propagación. REN [Internet]. 2023. jun; 5(2): 30-43. doi: https://doi.org/10.33610/28059611.141

Abstract

Introduction: The SARS-CoV-2 pandemic put health systems to the test and promoted the use of technologies and spatial models to predict epidemiological response. This study analyzes how the first one million cases of SARS-CoV-2 spread in Colombia, focusing on the spatiotemporal patterns of this spread.

Methodology: A cross-sectional study was conducted, in which first and second order properties such as spatial intensity and covariance structure were considered for the first million cases in the country, during the period from March 03 to October 24, 2020. Data from the National Public Health Surveillance System (Sivigila), the DANE (National Administrative Department of Statistics) national population census and the Ministry of Transportation's National Integrated Road Information System were used. Cases were geocoded according to the address of residence and analyzed using tools such as ArcGIS Pro and gvSIG.

Results: The geographical distribution of the cases was not random, instead, it was mainly concentrated in metropolitan areas and districts with high population density and an interconnected national and departmental road network. Municipalities connected by national roads showed a higher incidence and mortality from SARS-CoV-2 compared to those connected by departmental roads or without this type of infrastructure. In addition, there was a significant association between population density and the incidence of cases and deaths.

Conclusions: These findings highlight the importance of considering road connectivity as a crucial factor in the spread of diseases, especially in urban contexts and vulnerable areas such as tourist destinations and agricultural areas. For this reason, geo-prevention and public health plans should prioritize the most connected and vulnerable areas mentioned above.

Keywords: COVID-19, coronavirus infections, spatial analysis, geography, medical, Colombia

Introducción

En 2020, la Organización Mundial de la Salud (1) declaró el brote del nuevo coronavirus (denominado Coronavirus 2 del Síndrome Respiratorio Agudo Severo, SARS-CoV-2, por el Comité Internacional de Taxonomía de Virus), una emergencia de salud pública de importancia internacional. Este virus se originó en 2019 en la ciudad de Wuhan, provincia China de Hubei, se extendió rápidamente a más de 190 países generando cifras altas de morbilidad y mortalidad (2). La rápida propagación del SARS-CoV-2 desafió los sistemas de salud y las economías mundiales (3) y puso de relieve la desigualdad en el acceso a los servicios de salud y la falta de tecnología aplicada a los sistemas de vigilancia epidemiológica (4).

En Colombia, a la fecha de corte del estudio (24 de octubre de 2020), la pandemia por SARS-CoV-2 había cobrado más de 140 mil vidas y había provocado aproximadamente 6,3 millones de casos confirmado (5). Desde su primera notificación el 02 de marzo de 2020, fue un desafío controlar la rápida propagación de este virus dada su compleja epidemiología espaciotemporal, la alta conectividad de las regiones, los cambios en la dinámica de la población y otros factores demográficos y ambientales (5). Sin embargo, se establecieron diferentes medidas centradas esencialmente en estrategias de supresión y mitigación que, aunque inicialmente fueron suficientes para minimizar la propagación del SARS-CoV-2, fueron insostenibles a largo plazo debido a sus efectos económicos.

Las evidentes heterogeneidades en la morbilidad y mortalidad del SARS-CoV-2 representó un desafío para la planificación de estrategias preventivas y la toma de decisiones. Estas heterogeneidades se relacionaron fundamentalmente con la urbanización, la demografía, la infraestructura de salud y las actividades económicas, pero pocas de estas posibles asociaciones se habían explorado. La densidad de población y su asociación con la morbilidad y mortalidad por SARS-CoV-2 fue un tema de amplia discusión (6-8), sin embargo, otros factores como la conectividad entre regiones hipotéticamente son más relevantes para explicar la propagación y posterior presencia de casos y muertes. Aunque, ciertamente es un fenómeno multicausal, verificar estas asociaciones es esencial para planificar con precisión las medidas preventivas en poblaciones con mayor riesgo. Este trabajo exploró la dinámica espaciotemporal del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia, combinando diferentes métodos analíticos enfocados en la identificación de patrones espaciotemporales y la progresión del SARS-CoV-2 en todo el territorio nacional. Este trabajo tiene el potencial de servir como guía para el establecimiento de medidas que

Metodología

Se realizó un estudio transversal para comprender la propagación espacial del SARS-CoV-2 en Colombia, a través de una representación espaciotemporal del primer millón de casos reportados por el Instituto Nacional de Salud de Colombia (INS) en el Sistema Nacional de Vigi-

lancia en Salud Pública (Sivigila) (5), entre el 03 de marzo y el 24 de octubre de 2020 (235 días).

Para la geocodificación se utilizó la dirección de residencia de los casos notificados en Sivigila a través de las plataformas ArcGis Pro y GVsig, seguida de la verificación de las ubicaciones. Las inconsistencias se ajustaron manualmente con el apoyo de Google Maps y OpenStreetMap. El proceso fue liderado por el Grupo de Vigilancia y Factores de Riesgo Ambiental del INS con el apoyo de algunas secretarías de salud y el Grupo de Geoestadística del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Se utilizó el sistema de referencia internacional WGS-84 con coordenadas centesimales de latitud y longitud.

Se caracterizó la distribución de casos y muertes por SARS-CoV-2 en Colombia en términos de sus propiedades de primer y segundo orden. Las propiedades de primer orden se describieron en términos de intensidad espacial y las propiedades de segundo orden en términos de la estructura de covarianza del patrón a través de la distribución de distancias entre los casos o las muertes. La intensidad espacial determinada como el número esperado de casos de SARS-CoV-2 por unidad de área se evaluó en términos de la homogeneidad (uniformidad) definida por la función:

$$\lambda(x) = \lim_{|dx|\to 0} \frac{E[N(dx)]}{|dx|} \qquad (1)$$

donde N d(x) es el número de eventos en una región dx y |dx| es un área perteneciente a esta región (9).

Para un proceso homogéneo, la intensidad se calcula como $\hat{\lambda}(x) = N/|S|$, donde N es el número total de casos o muertes por SARS-CoV-2 y |S| es el área de estudio (9). Sin embargo, para un proceso probablemente no homogéneo, como la presencia de casos y muertes por SARS-CoV-2, cuya presencia depende de diferentes variables, se puede usar el recuento de cuadrantes o el suavizado del Kernel para determinar la intensidad, donde xi $\in \{x_1, x_2, \ldots x_n\}$ es un caso observado o muerte, h es el ancho de banda, y q(||x||) es la corrección de bordes (10). El nivel y el tipo de interacción entre casos o muertes también se exploraron evaluando la aleatoriedad (proceso de Poisson no homogéneo) utilizando las pruebas de bondad de ajuste X^2 y Monte Carlo basadas en recuentos de cuadrantes (11).

$$\hat{\lambda}(x) = \frac{1}{h^2}\sum_{i=1}^{n} \frac{k\left(\frac{\|x-x_i\|}{h}\right)}{q(\|x\|)} \qquad (2)$$

El estimador de propiedades de segundo orden, la función K de Ripley se utilizó para ilustrar los cambios en la dispersión espacial de casos y muertes considerando un parámetro de distancia r. De esta manera, el tipo, la intensidad y el rango del patrón espacial mediante el análisis de las distancias existentes entre todos los puntos se estableció como:

$$K(d) = n^{-2}A\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^{-1} I_{ij}(d)$$

En esta función n es el número de casos o muertes, A es el área considerada para los cuadrantes, w_{ij} es el factor de corrección para el efecto de

borde, y I_{ij} (d) es un indicador igual a uno (1) si la distancia es menor o igual que r (12). Además, se utilizó el ajuste L de la función K de Ripley para linealizar la función y estabilizar la varianza (12). Para fines de inferencia, la estimación de K generalmente se compara con el valor real de K para un proceso puntual completamente aleatorio (Poisson), que es $K(r) = pi*r^2$ (9). Las desviaciones entre las curvas K empíricas y teóricas se utilizaron para evaluar el agrupamiento o la regularidad espaciales (11). Las distancias desde cada punto hasta su vecino más cercano se calcularon considerando una distancia euclidiana. Todas las pruebas estadísticas se realizaron en el ambiente de programación R.

Para explicar el patrón de propagación espaciotemporal del SARS-CoV-2 en Colombia y describir la relación entre la conectividad, se comparó el número y la proporción de municipios con casos o muertes por SARS-CoV-2 según el tipo de carretera (nacional-primaria, departamental-secundaria) por período de dos (2) meses. Para evaluar el papel de la densidad de población, se realizó una correlación de Pearson entre densidad e incidencia, mortalidad, casos y muertes. La población de cada departamento se obtuvo a partir de las proyecciones para el año 2020 del censo nacional de población del DANE. Las capas de la red vial a nivel nacional (17 143 km) y departamental (36 618 km) se obtuvieron del Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras del Ministerio de Transporte.

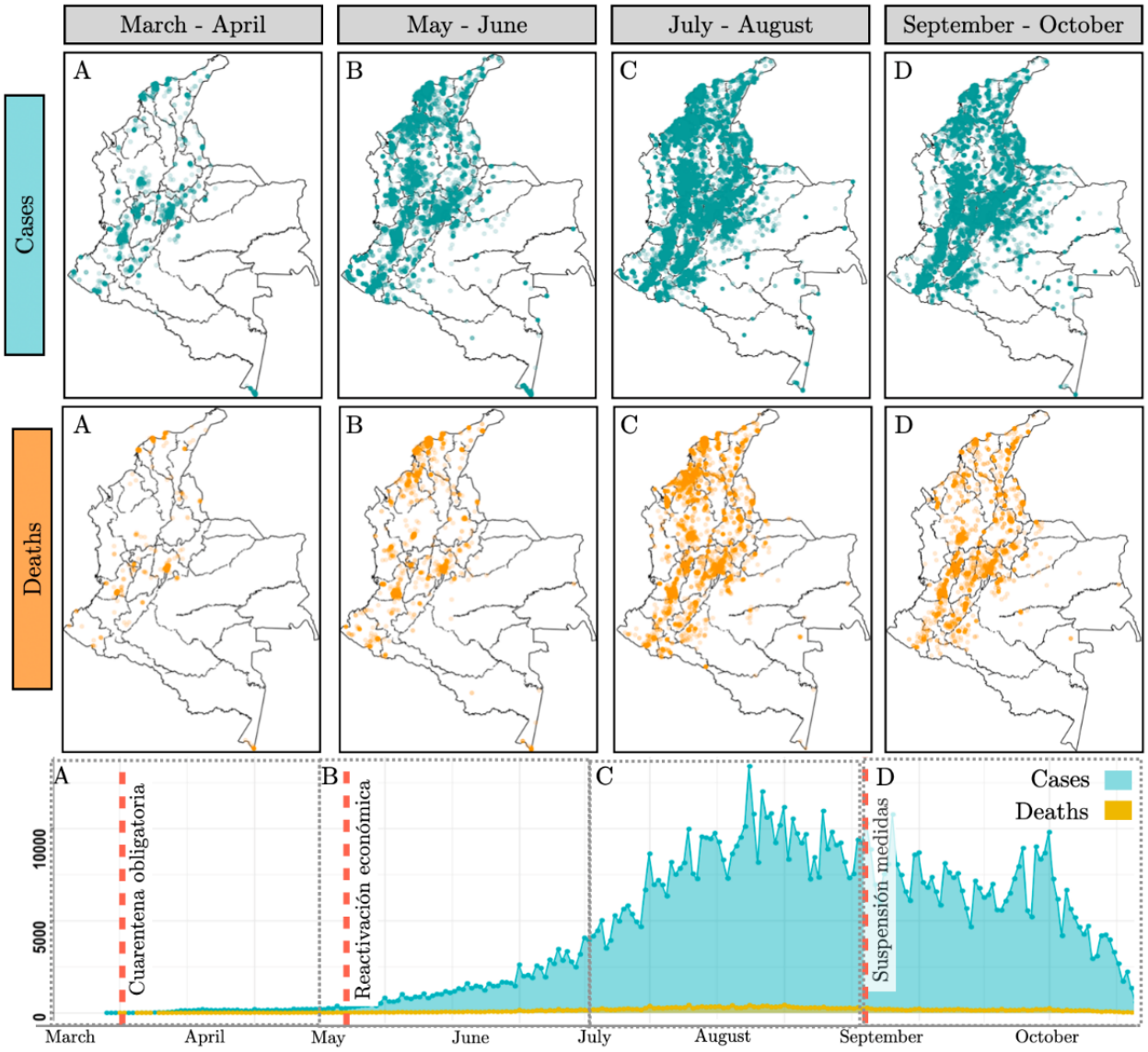
Consideraciones éticas

De acuerdo con la Resolución 08430 de 1993, se realizó un estudio sin riesgo, ya que se utilizaron técnicas y métodos documentales retrospectivos y no se realizó ninguna intervención o modificación intencional de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales. Se protegió la confidencialidad de los casos, ya que no se divulgó información individual.

Resultados

La distribución espacial de casos y muertes por SARS-CoV-2 notificados al INS se muestra en la figura 1. El primer millón de casos se notificó principalmente en Bogotá D.C. (306 161; 30,6 %), Antioquia (151 557; 15,2 %), Valle del Cauca (77 096; 7,7 %), Barranquilla (40 058; 4,0 %) y Cundinamarca (39 939; 4,0 %). La edad media de los casos fue de 39,8 años (desviación estándar=18,1), los hombres fueron los más afectados (504 455; 50,4 %). Del total de mujeres afectadas (495 505) 4 569 (0,9 %) estaban embarazadas, con edad gestacional media de 26,6 semanas (desviación estándar=10,2).

Figura 1. Distribución espacial y evolución temporal del primer millón de casos (azul) y muertes (naranja) por SARS-CoV-2 discriminados por bimestre, Colombia, 2020



Los casos notificados fueron principalmente de colombianos (989 955; 98,9 %), 1 049 fueron importados principalmente de España (263; 25,1 %), Estados Unidos de América (259; 24,7 %) y Brasil (75; 7,1 %).]En trabajadores de la salud se presentaron 14 936 casos (1,5 %), principalmente enfermeros auxiliares (5 299; 35,5 %), médicos (2 386; 16,0 %), enfermeros (1 848; 12,4 %) y personal administrativo (1 502; 10,1 %). En cuanto a la pertenencia étnica, se notificaron 40 365 casos (4,0 %) en afrocolombianos y 22 973 (2,3 %) en indígenas. La intensidad de los eventos (casos y muertes) no fue constante en el tiempo ni en el espacio, ambos ocurrieron con menor intensidad en la región sur/este del país y tuvieron una mayor intensidad entre los meses de mayo a agosto.

Los casos fueron en su mayoría leves (948 171; 94,8 %), sin embargo, se presentaron 31 939 muertes, lo que corresponde a una letalidad del 3,2 %. Las muertes ocurrieron principalmente en Bogotá D.C (7 770; 24,3 %; mortalidad=2,5 %), Antioquia (3 295; 10,3 %; mortalidad=2,2 %), Valle del Cauca (2 868; 9,0 %; mortalidad=3,7 %), Santander (1 755; 5,5 %; mortalidad=4,5 %) Barranquilla (1 709; 5,4 %; mortalidad=4,3 %) y Córdoba (1 630; 5,1 %; mortalidad=6,3 %).

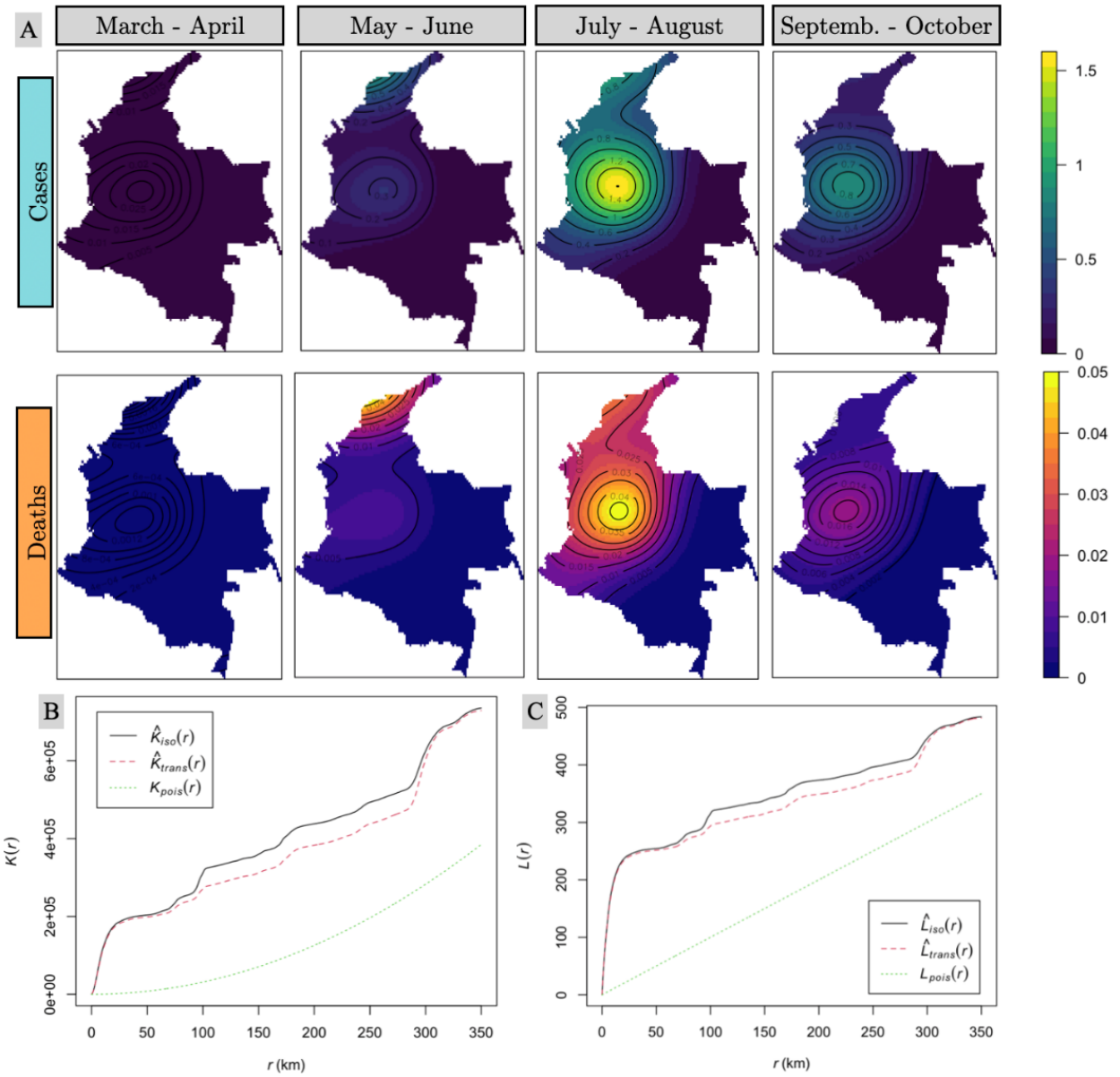
La edad media de las muertes fue de 69,0 [desviación estándar=15,0] años, y los hombres fueron más afectados (20 535; 64,3 %; mortalidad=4,1 %). Del total de mujeres fallecidas (11 404; mortalidad=2,3 %), 55 (0,5 %; mortalidad=1,2 %) estaban embarazadas, edad gestacional media de 31,7 semanas [desviación estándar=5,5]. Las muertes reportadas fueron principalmente de ciudadanos colombianos (31 751; 99,4 %; mortalidad=3,2 %), 30 casos fueron importados principalmente de Brasil (8; 26,7 %), Estados Unidos de América (5; 16,7 %) y España (5; 16,7 %). Del total de muertes 98 (0,3 %) fueron trabajadores de la salud, principalmente médicos (35; 35,7 %; mortalidad=1,5 %), auxiliares de enfermería (27; 27,6 %; letalidad=0,5 %) y trabajadores administrativos (7; 7,1 %; letalidad=0,5 %). En cuanto a pertenencia etnia 1 459 (4,6 %; letalidad=3,6 %) eran afrocolombianos y 795 (2,5 %; letalidad: 3,5 %) eran indígenas.

La figura 2 muestra las estimaciones de intensidad del Kernel con áreas púrpuras/azules que indican menos intensidad y regiones amarillas que indican una mayor intensidad de casos y muertes, respectivamente. Se confirmó un patrón espacial y temporal, observándose un mayor número de casos y muertes iniciales en las regiones Central y Caribe del país. La región Caribe tuvo un impacto significativo en el número de muertes entre mayo y agosto, siendo menos afectada en septiembre y octubre de 2020.

En los meses del estudio, la región menos afectada fue la región Sur del país, tanto en número de casos como de muertes. Esta diferencia en las intensidades indica que el número de casos y muertes por SARS-CoV-2 en Colombia fue heterogéneo. Estos hallazgos fueron corroborados con el análisis estadístico del patrón espacial en el que se rechazó la hipótesis nula que indicaba un patrón aleatorio de los datos ($p<0,001$) para cada período de estudio. Por lo tanto, el patrón espacial de casos y muertes se agrupa con una confianza superior al 99 %. Esta afirmación también se confirmó a través de los resultados de las funciones K y L que revelan que la curva de las funciones K y L estimadas están por encima de la curva teórica (figuras 2B, 2C).

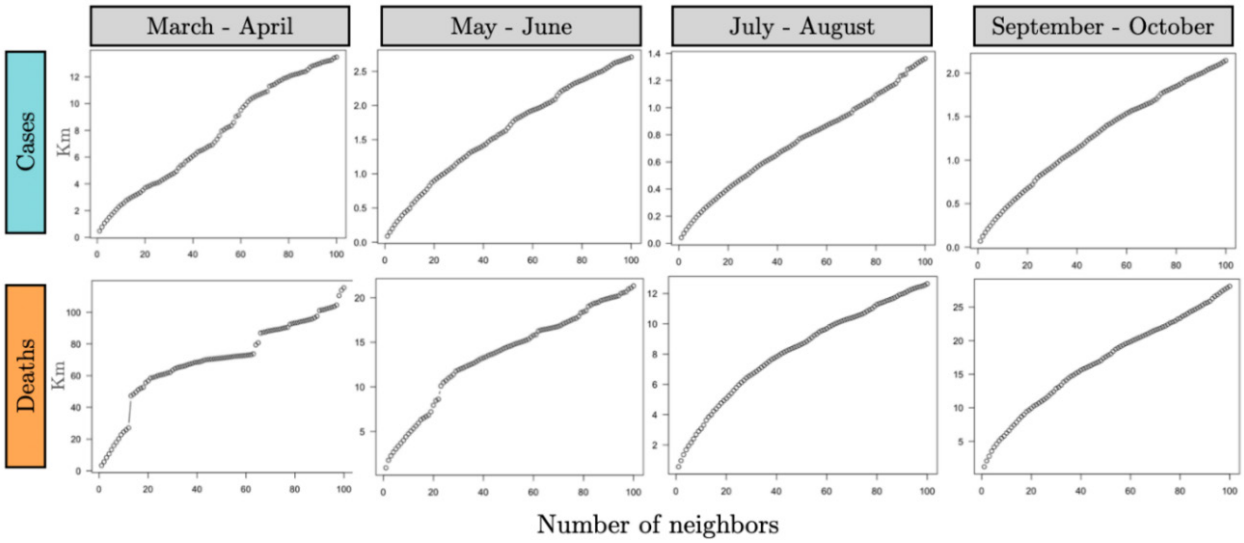
La distancia media entre un caso y el caso más cercano de marzo a abril fue de 472 metros, de mayo a junio fue de 87,3 metros, de julio a agosto fue de 40,86 metros y de septiembre a octubre fue de 68,9 metros. Esto refuerza una mayor intensidad y proximidad de los casos entre los meses de julio y agosto.

Figura 2. (A) Resultados del análisis de intensidad del kernel en los dos meses considerados y (B,C) funciones K y L estimadas y teóricas (Poisson) para el primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia



La distancia media entre la ubicación de un individuo muerto y el muerto más cercano en marzo a abril fue de 3 355 metros, de mayo a junio fue de 925,2 metros, de julio a agosto de 557,8 metros y de septiembre a octubre la distancia fue de 1 219 metros, lo que también revela una mayor intensidad y proximidad de muertes entre los meses de julio y agosto. La distancia de los 100 vecinos más cercanos (casos o muertes) para cada bimestre se muestra en la figura 3.

Figura 3. Distancia entre el primer millón de casos y muertes por SARS-CoV-2 en cada bimestre, Colombia, 2020



Para explicar la propagación espaciotemporal de casos y muertes estos eventos se relacionaron con la presencia de vías nacionales (primarias) y departamentales (secundarias) o la ausencia de este tipo de redes viales. La figura 4 muestra la red de carreteras y el patrón de casos, evidenciando que la propagación de casos acompaña a la conectividad de las regiones. De esta manera, entre marzo y abril, se observó una propagación de casos siguiendo la red vial nacional; posteriormente, a partir de mayo, los casos siguieron la red vial departamental. Además, las áreas que no tienen una red vial primaria o secundaria presentaron un número muy bajo o nulo de casos. La figura 4 también muestra una asociación entre la propagación de casos y la densidad de población. Aunque inicialmente se observó que los casos se distribuyen en las zonas más densamente pobladas (cuadro azul), posteriormente se observó que estas zonas no necesariamente siguen presentando casos (cuadro rojo). No se encontró una asociación clara entre la densidad de población y la presencia de casos, muertes, incidencia o mortalidad (figura 5).

De esta manera, es posible relacionar la velocidad de propagación del SARS-CoV-2 con la conectividad caracterizada por la red de carreteras. Como se observa en la tabla 1, los municipios con presencia de carreteras o vías nacionales (primarias) alcanzan una mayor proporción de casos y muertes en menor tiempo, en comparación con los municipios con presencia de vías departamentales (secundarias) o sin la presencia de estos dos tipos de carreteras. En menos de dos (2) meses, más del 80 % de los municipios con carreteras nacionales estaban infectados, los municipios con presencia de carreteras secundarias lograron este porcentaje de infección después de cuatro (4) meses desde el inicio del brote; y los municipios con ausencia de carreteras primarias y secundarias lograron este porcentaje de infección después de seis meses desde el inicio de la pandemia.

Figura 4. Relación espaciotemporal de las redes viales nacionales (primarias) y departamentales (secundarias), la densidad poblacional y el patrón del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia, 2020

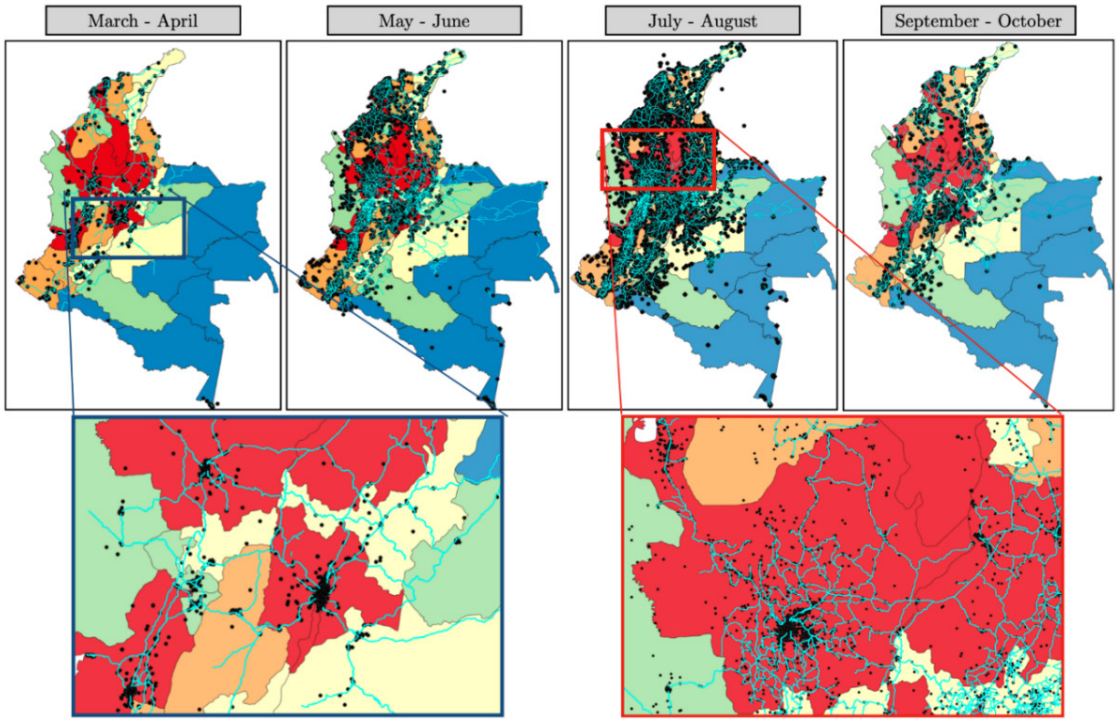
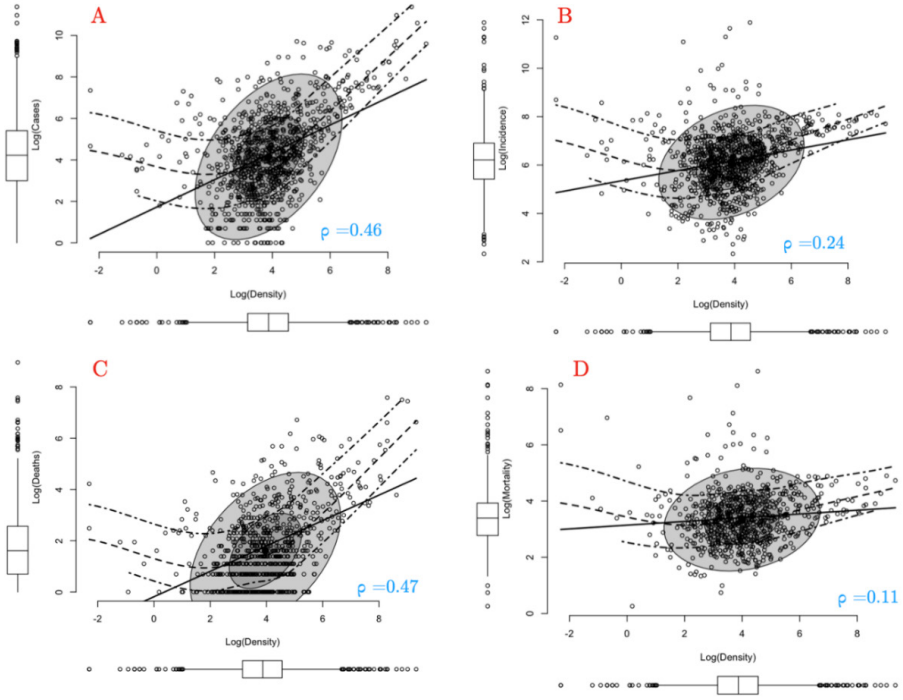


Figura 5. Correlación entre densidad de población y casos, muertes, incidencia y mortalidad, primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia, 2020



En cuanto a las muertes, después de seis (6) meses de la pandemia, más del 80 % de los municipios con carreteras primarias reportaron mortalidad. En este mismo período, el 58,8 % de los municipios con carreteras secundarias y el 43,0 % de los municipios sin carreteras primarias o secundarias reportaron mortalidad. 26 municipios no presentaron casos, 11 (42,3 %) de Boyacá, cinco (19,2 %) de Amazonas, tres (11,6 %) de Santander, dos (7,7 %) de Guainía y uno respectivamente de Bolívar, Nariño, Arauca, Vaupés y Vichada (3,8 % cada uno). De estos 26 municipios, 10 (38,5 %) no tenían carreteras primarias o secundarias, 13 (50,0 %) contenían carreteras secundarias y sólo tres (11,6 %) contenían carreteras primarias.

Tabla 1. Número y proporción de municipios con casos y presencia de muertes por COVID-19 según el tipo de carretera por período

	Red de carreteras	Marzo–abril (%)	Mayo-junio (%)	Julio-agosto (%)	Septiembre-octubre (%)	Total municipios
Casos	Nacional (primaria)	237 (37,5)	530 (83,8)	621 (98,3)	628 (99,4)	632
	Departamental (secundaria)	60 (14,3)	279 (66,7)	390 (93,3)	404 (96,7)	418
	No hay carreteras nacionales o departamentales	8 (11,1)	43 (59,8)	57 (79,2)	64 (88,9)	72
	Total municipios	305	852	1 068	1 096	1 122
	Red de carreteras	**Marzo–abril (%)**	**Mayo-junio (%)**	**Julio-agosto (%)**	**Septiembre-octubre (%)**	**Total municipios**
Muertes	Nacional (primaria)	82 (12,9)	264 (41,8)	475 (75,2)	528 (83,5)	632
	Departamental (secundaria)	9 (2,1)	74 (17,7)	196 (46,9)	246 (58,8)	418
	No hay carreteras nacionales o departamentales	1 (1,3)	11 (15,3)	23 (31,9)	31 (43,0)	72
	Total municipios	92	349	694	805	1 122

Convenciones:
Rojo: >80 % de los municipios; naranja: 60-80 % de los municipios;
amarillo: 35-50 % de los municipios; azul: <35 % de los municipios

Discusión

En el contexto de una emergencia sanitaria mundial, la contribución de la epidemiología basada en el uso de sistemas de información geográfica es esencial para ampliar el conocimiento de la dinámica de la epidemia, identificar patrones de propagación y regiones de mayor vulnerabilidad. En este sentido, los resultados de las actividades de investigación centradas en estas metodologías han sido ampliamente utilizados en diferentes países, entre ellos Argentina (13, 14), Brasil (15, 16), Estados Unidos (17), Alemania (18), Kuwait (19) y Polonia (20).

El primer millón de casos en Colombia ocurrió en un periodo de 235 días con una amplia distribución por las carreteras nacionales y departamentales del país. Los primeros casos se localizaron principalmente en el centro y norte del país y se extendieron a las regiones noreste y suroeste. Aunque inicialmente se observó que los casos se distribuyeron en las zonas más densamente pobladas, posteriormente estas áreas no necesariamente seguían presentando casos, por lo que no se encontró una asociación clara entre la densidad poblacional y la presencia de casos, muertes, incidencia o mortalidad. Esta evidencia indica que la distribución espacial de los casos es más densa en las áreas metropolitanas con un mayor número de municipios estrechamente vinculados entre sí a través de la red vial, lo que facilita las relaciones económicas y sociales que explicarían la propagación del virus (6).

Además, estos hallazgos advierten que las regiones altamente conectadas, como las regiones turísticas o productoras de alimentos, son altamente vulnerables a los brotes pandémicos, por lo que se requiere una atención especial en términos de geoprevención y control de la propagación del SARS-CoV-2 y futuras epidemias.

Durante julio y agosto se presentó el mayor número de casos, con una clara disminución de la distancia entre los casos en los meses de septiembre y octubre. Esta disminución se debió posiblemente a las diferentes medidas de restricción de movilidad implementadas a nivel nacional y regional. Las medidas de restricción de la movilidad han demostrado ser una estrategia de mitigación eficaz en muchos países, ya que interfiere directamente con la conectividad de las regiones (21), desacelerando la propagación geográfica de enfermedades infecciosas. En este sentido, el conocimiento de la conectividad y la movilidad humana debe ser un punto de partida para modelar procesos dinámicos importantes en epidemiología humana y animal, ecología de poblaciones, biología y evolución (22, 23).

Conclusiones

Este documento estima el vínculo entre la conectividad y la propagación del SARS-CoV-2 en Colombia. La distribución espacial del primer millón de casos de SARS-CoV-2 en Colombia no presentó una distribución aleatoria, ya que existen patrones de agrupación asociados a grandes áreas metropolitanas o distritos con mayor conectividad descritos por las redes viales nacionales y departamentales.

Es evidente que las regiones con mayor número de personas vinculadas entre sí a través de relaciones económicas y sociales a través de la red de transporte son las más vulnerables a eventos de salud pública como el generado por el SARS-CoV-2. De esta manera, los planes de geoprevención y salud pública deben priorizar las áreas más conectadas, principalmente aquellas que son más vulnerables, como las relacionadas con el turismo y la producción de alimentos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las entidades territoriales de salud, a la Dirección de Geoestadística del

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y a los profesionales del Grupo de Vigilancia y Control de Factores de Riesgo Ambiental de la Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgos en Salud Pública del Instituto Nacional de Salud de Colombia por la georreferenciación de casos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no presentan conflicto de intereses.

Referencias

1. WHO, World Health Organization. Brote de enfermedad por coronavirus (COVID-19). 2020. URL: https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019
2. Hafner, C. M. (2020). The spread of the Covid-19 pandemic in time and space. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(11), 3827.
3. McKee, M., & Stuckler, D. (2020). If the world fails to protect the economy, COVID-19 will damage health not just now but also in the future. Nature Medicine, 26(5), 640-642.
4. Budd, J., Miller, B. S., Manning, E. M., Lampos, V., Zhuang, M., Edelstein, M., & McKendry, R. A. (2020). Digital technologies in the public-health response to COVID-19. Nature medicine, 26(8), 1183-1192.
5. INS, Instituto Nacional de Salud. Coronavirus Colombia. 2021. URL: https://www.ins.gov.co/Noticias/paginas/coronavirus.aspx
6. Hamidi, S., Sabouri, S., & Ewing, R. (2020). Does density aggravate the COVID-19 pandemic? Early findings and lessons for planners. Journal of the American Planning Association, 86(4), 495-509.
7. Cos, O. D., Castillo, V., & Cantarero, D. (2020). Facing a Second Wave from a Regional View: Spatial Patterns of COVID-19 as a Key Determinant for Public Health and Geoprevention Plans. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(22), 8468.
8. Pequeno, P., Mendel, B., Rosa, C., Bosholn, M., Souza, J. L., Baccaro, F., ... & Magnusson, W. (2020). Air transportation, population density and temperature predict the spread of COVID-19 in Brazil. PeerJ, 8, e9322.
9. Diggle PJ.. Statistical Analysis of Spatial and SpatioTemporal Point Pat- terns, volume Third Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, Lancaster University England, UK, third edition edition, 2014.
10. Getis, A., & Franklin, J. (2010). Second-order neighborhood analysis of mapped point patterns. In Perspectives on Spatial Data Analysis (pp. 93-100). Springer, Berlin, Heidelberg.
11. Baddeley, A. J., & Turner, R. (2004). Spatstat: An R package for analyzing spatial point pattens.
12. Rozas, V., Camarero, J. J. (2005). Técnicas de análisis espacial de patrones de puntos aplicadas en ecología forestal. Invest Agrar: Sist Recur For, 14(1), 79-97
13. Humacata L. (2020). Análisis espacial del COVID-19 en los partidos de la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina), durante los meses de marzo a agosto de 2020. Revista del Departamento de Geografía, 8 (15), 263-278.
14. Ramirez L. (2020). Evolución, distribución y difusión del COVID-19 en Argentina: primer mes (03/03/2020 - 02/04/2020). Posición, 3, 1-12.

15. Cavalcante, J. R., & Abreu, A. D. J. L. D. (2020). COVID-19 no município do Rio de Janeiro: análise espacial da ocorrência dos primeiros casos e óbitos confirmados. Epidemiologia e Serviços de Saúde, 29, e2020204.

16. Rex, F. E., Borges, C. A. D. S., & Käfer, P. S. (2020). Spatial analysis of the COVID-19 distribution pattern in São Paulo State, Brazil. Ciência & Saúde Coletiva, 25, 3377-3384.

17. Desmet, K., & Wacziarg, R. (2021). Understanding spatial variation in COVID-19 across the United States. Journal of urban economics, 103332.

18. Kuebart, A., & Stabler, M. (2020). Infectious diseases as socio-spatial processes: The Covid-19 outbreak in Germany. Tijdschrift voor economische en sociale geografie, 111(3), 482-496.

19. Alkhamis, M. A., Al Youha, S., Khajah, M. M., Haider, N. B., Alhardan, S., Nabeel, A., ... & Al-Sabah, S. K. (2020). Spatiotemporal dynamics of the COVID-19 pandemic in the State of Kuwait. International Journal of Infectious Diseases, 98, 153-160.

20. Krzysztofik, R., Kantor-Pietraga, I., & Spórna, T. (2020). Spatial and functional dimensions of the COVID-19 epidemic in Poland. Eurasian Geography and Economics, 61(4-5), 573-586.

21. Schlosser, F., Maier, B. F., Jack, O., Hinrichs, D., Zachariae, A., & Brockmann, D. (2020). COVID-19 lockdown induces disease-mitigating structural changes in mobility networks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(52), 32883-32890.

22. Belik, V., Geisel, T., & Brockmann, D. (2011). Natural human mobility patterns and spatial spread of infectious diseases. Physical Review X, 1(1), 011001.

23. Polo, G., Acosta, C. M., Labruna, M. B., Ferreira, F., & Brockmann, D. (2018). Hosts mobility and spatial spread of Rickettsia rickettsii. PLoS computational biology, 14(12), e1006636.