

PROPUESTA METODOLÓGICA DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LA COVID-19

SAMUEL ESTEBAN RODRÍGUEZ ([id](#))¹
SEVERINO ESCOLANO UTRILLA ([id](#))¹
MARÍA ZÚÑIGA ANTÓN ([id](#))¹

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Grupo de Estudios de Ordenación del Territorio (GEOT) - IUCA. Calle Pedro Cerbuna 12, CP 50009, Zaragoza

Autor de correspondencia: sestebanr@unizar.es

Resumen. La modelización de los procesos de propagación del Sars-Cov-2 puede ser útil para comprender la evolución de la pandemia de COVID-19. Esto puede ayudar a identificar las medidas que resultaron más adecuadas para frenar su expansión y, también, para obtener información acerca de su efecto en las relaciones sociales. Con este objetivo, se plantea un modelo geográfico de propagación espaciotemporal que integra procesos biológicos y sociales. Para ello, se trabaja, por un lado, con el riesgo de contagio a nivel de grupo social y entidad de población; por otro, con los desplazamientos, para modelar los procesos de dispersión territorial de la pandemia.

Palabras clave: COVID-19, procesos de difusión espacial, relaciones sociales, modelos espaciotemporales.

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR A SPACE-TIME SPREAD MODEL OF THE COVID-19

Abstract. Modeling the spread processes of Sars-Cov-2 can be useful to understand the evolution of the COVID-19 pandemic. This can help to identify the measures that were most appropriate to stop its expansion and, also, to obtain information about its effect on social relations. With this objective, a geographic model of spatiotemporal propagation that integrates biological and social processes is proposed. For this, work is done, on the one hand, with the risk of contagion at the level of the social group and population entity; on the other, with displacements, to model the processes of territorial dispersion of the pandemic.

Keywords: COVID-19, spatial diffusion processes, social relationships, spatiotemporal models.

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos de la COVID-19 han sido de gran magnitud y gravedad, y se han manifestado en forma de crisis en múltiples dimensiones de la vida social y económica, han tensionado los sistemas sanitarios y, tristemente, han incrementado la mortalidad a nivel global. El conocimiento de los procesos de contagio es esencial tanto para gestionar de forma eficaz los recursos y adaptar medidas de control adecuadas de la presente y futuras pandemias como para evaluar la eficacia de las medidas tomadas en el pasado.

En este trabajo, se realiza la propuesta teórica de un modelo geográfico para investigar la propagación de la COVID-19. Los fundamentos del modelo son los siguientes: la enfermedad, provocada por el SARS-CoV-2, se difunde entre las personas, principalmente, a través de sus relaciones interpersonales y, en el espacio, a través de los desplazamientos. Por ello, en primer lugar, se modela la probabilidad de contagio entre personas con resolución de grupo social y entidad de población y después, de forma iterativa, el proceso de difusión en el espacio. El modelado epidemiológico se ha efectuado atendiendo al contingente de población susceptible de contagio (S), la población infectada en cada momento (I) y la población

recuperada de la enfermedad (R). Este tipo de modelos son conocidos por sus siglas como SIR y son muy utilizados en el estudio de epidemias (Wilches y Castillo, 2020).

Las relaciones interpersonales se han modelado considerando la existencia de interacciones heterogéneas, susceptibles a variaciones en el tiempo y el espacio; por tanto, sus parámetros son dinámicos. Esto permite analizar el impacto de las medidas de confinamiento sobre las relaciones humanas y sobre la propagación de la pandemia. En cuanto a la propagación espacial, se ha trabajado con un modelo vectorial, que permite la conexión de puntos alejados entre sí sin afectar al espacio intermedio; es decir, permite la conexión directa entre ciudades (Guerin-Pace, 1996).

En este apartado, se contextualizan los modelos de propagación en los estudios geográficos sobre interacciones espaciales; la atención se ha centrado en los procesos de difusión en medios sociales y en la problemática asociada con las medidas de lucha contra la pandemia. Posteriormente se sintetizan los principales factores de contagio del COVID y las técnicas utilizadas para analizar la expansión de la pandemia. La presentación del modelo comienza con su formulación; a continuación, se detallan los diferentes parámetros y se proponen algunas fuentes de información susceptibles de ser utilizadas y un procedimiento de calibración. Para finalizar, se ha añadido un apartado donde se discute el planteamiento y se señalan las principales conclusiones.

1.1. Las interacciones en el espacio geográfico

La difusión (propagación) espacial de cualquier fenómeno geográfico está condicionada por multitud de factores. Su naturaleza heterogénea. Los estudios geográficos han diferenciado, tradicionalmente, entre los factores vinculados con el medio físico y los que, específicamente, se asocian con los seres humanos (George, 1991; Souris, 2019). No obstante, las interacciones se producen entre ambos tipos de factores y hay ocasiones en las que es difícil disociarlas. El escenario de la crisis del coronavirus de 2020 es el de la expansión de un patógeno de naturaleza vírica entre los seres humanos, causando miles de bajas. Considerando este marco de referencia, abordamos la pandemia desde una perspectiva geográfica; es decir, contemplando la localización de los componentes del sistema epidemiológico que influyen en sus posibilidades y formas transmisión.

La movilidad de las personas (y de objetos, información, energía, capital) es un rasgo característico de las sociedades contemporáneas que integra prácticas sociales, territorios y experiencias personales (Sheller y Urry, 2006; Urry, 2007). Los desplazamientos pueden ser de alcance variable, en función de la necesidad que los motiva; sin embargo, a cierta escala, son detectables. Añadir la variable tiempo una sucesión de localizaciones permite identificar itinerarios para analizar el comportamiento espacial del ser humano (Hägerstrand, 1970). Aunque la economía conductual ha puesto de relieve que la toma de decisiones no se debe únicamente a la maximización del beneficio (Kahneman y Tversky, 2000; Esguerra, 2015), muchos de los desplazamientos se guían por juicios racionales (Stouffer, 1940; Barbosa *et al.*, 2018). Esto explica que muchos de los equipamientos comerciales se encuentren en lugares centrales y bien conectados con el entorno (Berry, 1971); aunque, como plantean Xu *et al.* (2018), puedan existir algunas distorsiones vinculadas con la disposición espacial de las ciudades y el nivel de segregación entre grupos sociales. Estos elementos pueden variar con el tiempo y modificar la ubicación de estos lugares centrales. El trabajo de Escolano y Salvador (2022) revela que, en el caso de la propagación del Sars-CoV-2, las variaciones en los centros de distribución de los contagios han sido dinámicas, pero no aleatorias: la pandemia ha tendido a mostrar agrupamientos espaciales vinculados con la estructura del sistema de asentamientos y las interconexiones que existen entre éstos (Escolano y Salvador, 2022).

El desplazamiento desde un punto a otro conecta los dos lugares, los relaciona. Esto puede generar importantes consecuencias tanto para el individuo, o elemento, desplazado como para los territorios de origen, recorrido y acogida. Las interacciones de los seres humanos en el espacio geográfico son complejas. Modelar su distribución, puede ayudar a comprenderlas (Baños *et al.*, 2021). Los modelos de interacción espacial, aquellos que relacionan lugares, pueden ser útiles para explicar algunos eventos y comprender la evolución de un cuerpo social (Clarke, 1978). En antropología, los modelos geográficos se han aplicado al estudio de la colonización de la Tierra por los seres humanos (Baños *et al.*, 2021) y la expansión de culturas y lenguas (Cavally-Sforza, 2000). El modelado de la interacción humana es parte fundamental de los estudios de epidemiología espacial (Souris, 2019).

El modelado espacial se ha utilizado para explicar la distribución de la población en el territorio a lo largo del tiempo (Tkachenko *et al.*, 2017), la ubicación de las ciudades (Christaller, 1933) y la localización de los

centros de actividad económica (Berry, 1971). El análisis espacial es un ámbito científico en el que convergen diferentes disciplinas “en las que la posición geográfica de los objetos o fenómenos que estudian se sitúa en el centro de los problemas y análisis que plantean” (Escolano y Salvador, 2022). La utilidad de este tipo de aproximación se ha comprobado en aplicaciones del mundo real como planificación urbana, previsión del tráfico, seguridad y estudios de propagación de enfermedades (Barbosa *et al.*, 2018).

La posición de un objeto en el tiempo presente suele ser un centro de atención habitual; por ejemplo, la localización actual de un vehículo. La información geográfica permite localizarlo. Sin embargo, no es su única utilidad: su modelado permite la reconstrucción de escenarios a diferentes escalas y efectuar simulaciones para anticipar posibles cambios (Chen *et al.*, 2021). Como se ha señalado, esto tiene aplicaciones en ámbitos muy variados de las ciencias humanas. En el caso del COVID, este interés puede estar en hallar el origen de un foco o los centros desde donde articular el sistema de emergencias.

Una localización adecuada de los efectivos del Estado, y una correcta delimitación del territorio sobre el que aplicar cierta medida, puede aumentar significativamente su efectividad (Barbosa *et al.*, 2018). Esto, además de ser importante para una provisión eficaz de los servicios públicos (Buzai y Baxendale, 2008), es fundamental para garantizar la defensa. La protección del territorio puede suponer la movilización de las fuerzas del Estado y la intervención en determinadas áreas. Tomar la medida adecuada en el momento oportuno es un aspecto clave para el éxito de una actuación.

1.2. Difusión del COVID en el medio social y protección de derechos

Los desplazamientos de personas desde el foco inicial en Wuhan (provincia de Hubei, China) tuvieron un papel relevante en la propagación del coronavirus (Yüceşahin y Sirkeci, 2020). Tras su aparición, fue dispersado de manera involuntaria por personas contagiadas; contagios que, eminentemente, se produjeron a través de las interacciones propias del medio social. Lamentablemente, a nivel global, la COVID-19 ha causado decenas de miles de fallecidos (Mathieu *et al.*, 2020) y el confinamiento de millones de personas.

El Estado está legitimado para adoptar ciertas medidas con objeto de proteger a la población. En España, el derecho a circular por el territorio nacional se encuentra reconocido en el título I de la Constitución; el que recoge los derechos y deberes fundamentales de los ciudadanos. No obstante, existen algunas previsiones en cuanto a su suspensión para garantizar bienes jurídicos de orden superior como el derecho a la vida y la salud. Tal como señala el Centro de Coordinación de Alertas y Emergencias Sanitarias (CCAES), las interacciones personales fueron la vía principal de propagación del Sars-CoV-2 durante la pandemia de 2020 (CCAES, 2021b). Por ello, en la crisis sanitaria, aunque se tendieron a buscar puntos de equilibrio que permitieran garantizar la seguridad y el ejercicio de otros derechos fundamentales, se produjeron confinamientos y restricciones a la movilidad (Escolano y Salvador, 2022).

En relación con la pandemia, cabe plantearse si se pudieran haber adoptado unas medidas más efectivas, que hubieran salvado más vidas o que hubieran afectado menos a los derechos fundamentales de los ciudadanos; por ejemplo, el derecho a efectuar desplazamientos o a cambiar de residencia. Una vez superado el momento de mayor impacto de la crisis, se puede reflexionar y analizar la cuestión con múltiples fuentes de datos; algo de lo que, en los momentos de confinamiento, carecían incluso las autoridades que hubieron de gestionar la situación. Al respecto, es de interés saber cómo afectaron las medidas a la vida social de los ciudadanos y a las actividades económicas. También, y sobre todo, conocer los mecanismos de propagación espacio-temporal de la COVID; algo que puede ser útil para disponer de una estimación de la evolución de los focos de contagio (Vespignani *et al.*, 2020) y para abordar otras situaciones de carácter crítico similares que puedan darse en el futuro. En este sentido, conocer la efectividad de las medidas adoptadas es algo esencial (Aleta y Moreno, 2020).

2. MODELOS DE DISPERSIÓN ESPACIAL Y TRANSMISIÓN DEL SARS-COV-2

2.1. Modelos de difusión espaciotemporal en Geografía

Los modelos de difusión de la población en nuevos territorios se utilizan para intentar comprender cómo ha sido proceso de ocupación de un área determinada. En ellos, frecuentemente, se trabaja con celdas continuas de similar tamaño. Entre ellas, aunque puedan establecerse restricciones y fijarse diferentes tipos de contigüidad, los desplazamientos suelen llevarse a cabo en todas las direcciones, a través de las celdas

adyacentes. Las celdas pueden presentar diferentes densidades de población, también, diferencias en otros atributos como la capacidad de carga (Tkachenko *et al.*, 2017). Este concepto hace referencia a la población máxima que puede alcanzar cada porción de la superficie en un momento determinado. El límite puede variar en función de los recursos disponibles; por tanto, se siguen algunos principios malthusianos a escala local. La capacidad de carga puede utilizarse para establecer barreras y delimitar áreas no susceptibles de ocupación. Las etapas de ocupación se iteran en lapsos junto a los indicadores demográficos de las celdas. Cuando una de ellas alcanza cierto umbral de población, los límites de la capacidad de carga, u otros eventos que se hayan modelado, inician los procesos de expansión de la ecúmene. Estos modelos, en los que el desplazamiento es a celdas vecinas, son muy adecuados para simular procesos de difusión continuos en el espacio (Figura 1).

Figura 1. Ejemplo de un modelo de dispersión basado en celdas

Capacidad de carga	Situación inicial				Situación en t+1				Crecimiento en t+2				Crecimiento en t+3																																																																							
<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>7</td></tr></table>	1	1	3	0	2	7	0	0	4	1	0	0	2	1	1	7	<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>									2								<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>									4								<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td></tr></table>					2	2			4	1			2	1			<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>7</td></tr></table>	1	1	3	0	2	7	0	0	4	1	0	0	2	1	1	7
1	1	3	0																																																																																	
2	7	0	0																																																																																	
4	1	0	0																																																																																	
2	1	1	7																																																																																	
2																																																																																				
4																																																																																				
2	2																																																																																			
4	1																																																																																			
2	1																																																																																			
1	1	3	0																																																																																	
2	7	0	0																																																																																	
4	1	0	0																																																																																	
2	1	1	7																																																																																	

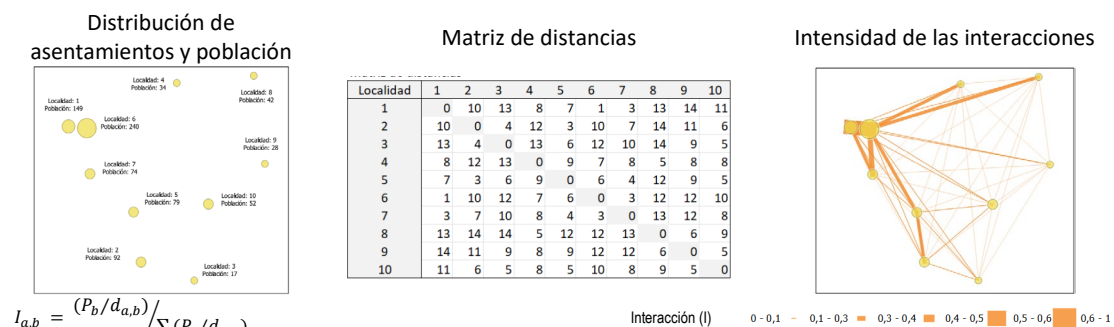
Modelo de difusión con capacidad de carga en el que la población se duplica entre cada tiempo (t).

Fuente: elaboración propia.

Los medios de transporte existentes en la actualidad permiten atravesar un territorio sin interactuar con la población residente. Esto es habitual tanto para un conductor de automóvil como para un viajero de autobús, tren o avión; es decir, afecta a la mayor parte de los desplazamientos interurbanos. Cuando la propagación entre dos porciones del territorio no supone la difusión a las áreas intermedias, es frecuente trabajar con redes y grafos (Bonnefoy, 1996); esto permite vincular puntos de origen y destino sin afectar al entorno. Al respecto, Stouffer, en 1940 observó la existencia de una vinculación entre el destino de un migrante y las oportunidades que le ofrece, en relación con las de los lugares intermedios. Por tanto, aunque los desplazamientos se puedan estimar mediante diferentes funciones (Bonnefoy, 1996; Barbosa *et al.*, 2018), los modelos gravitatorios (Reilly, 1931; Berry, 1971; Barbosa *et al.*, 2018) pueden ser interesantes para efectuar algunas estimaciones teniendo en cuenta las relaciones espaciales. En Polonia se han utilizado para estudiar la propagación del coronavirus (Nowak *et al.*, 2022).

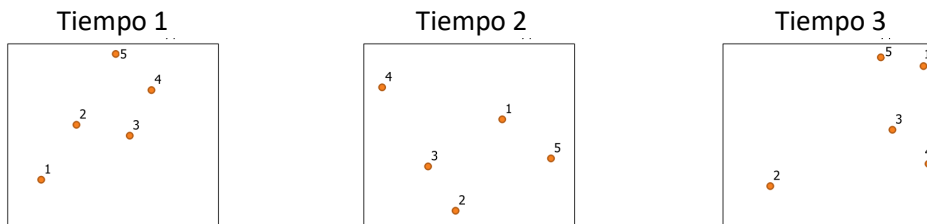
En los modelos gravitatorios (Figura 2) puede ser relevante el tipo de distancia utilizada; su cálculo se puede hacer teniendo en cuenta la distancia a través de una red de transportes, la impedancia del terreno y otros elementos (Díez y Escalona, 2001). Actualmente, en España existen fuentes de información sobre movilidad muy detalladas (Escalano y Escalona, 2022). El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) publica datos de desplazamientos con una periodicidad diaria desde septiembre de 2022. Éstos incluyen el área de origen y destino e información sobre tipo de desplazamiento; además, permiten segmentar por grupo de edad y sexo, entre otras variables. Así mismo, existen datos que se corresponden con la crisis sanitaria, aunque ofrecen un menor nivel de detalle, cuentan -entre otros datos- con los desplazamientos por áreas de origen y destino.

Figura 2. Ejemplo de un modelo de interacción gravitatorio en un sistema vectorial



La estimación del nivel de ocupación de un territorio en un momento dado, además de mediante pasos sucesivos, puede basarse en ecuaciones diferenciales y en modelos multi agente (Guerin-Pace, 1996). En el primer caso, se trata de modelos matemáticos que utilizan derivadas; en el segundo, se trata de técnicas centradas en la interacción de sujetos independientes con comportamientos y con características propias (Guerin-Pace, 1996) y comportamientos autónomos (Figura 3). Este tipo de modelado permite la simulación de itinerarios individuales congruentes con los planteamientos de Hägerstraand (1970). Los modelos probabilísticos basados en individuos (IBM, por sus siglas en inglés) permiten modelar los comportamientos y las características de los diferentes sujetos, por ejemplo, sus ciclos biológicos (Tkachenko, 2017).

Figura 3. Ejemplo de evolución de la posición en un modelo basado en individuos



Los individuos siguen un comportamiento autónomo, pero pueden interactuar.
Fuente: elaboración propia.

2.2. La transmisión interpersonal de la COVID-19

El CCAES señala dos grandes formas de transmisión del patógeno (CCAES, 2021a). La primera es la transmisión en relación con animales; incluye la transmisión entre animales y los contagios que se pueden producir entre animales y humanos. La segunda es la transmisión entre personas. Algunas especies animales pueden contagiarse de coronavirus, se han confirmado casos en diversas especies de mamíferos. Sin embargo, apenas se han detectado casos de transmisión de animales a humanos (CCAES, 2021a). La mayor parte de los contagios que se han producido se deben a la transmisión entre personas.

La transmisión entre personas puede ser a través de elementos como las manos; sin embargo, el más habitual es por vía respiratoria (CCAES, 2021a). Para evitar el contagio, medidas como las mascarillas se han demostrado de utilidad en diferentes entornos, también, de la ventilación y la distancia (CCAES, 2021a).

En el informe sobre la pandemia del coronavirus, realizado por el CCAES (2021b), se ponen de relieve varios aspectos que pueden afectar al modelado; cabe destacar ahora los siguientes: 1) desde el contagio, el periodo de incubación es variable la mediana es de 5,1 días, los estudios incluidos en el trabajo de McAloon *et al.* (2020) oscilan entre los 4 y los 7 días; 2) la transmisión por parte de la persona contagiada tarda en comenzar entre 1 y 2 días menos que los síntomas; 3) iniciados los síntomas transcurren en torno a dos semanas hasta la recuperación en caso de enfermedad leve y algo superior si ha sido grave; 4) cada contagiado produce un número variable de casos secundarios; estos varían en varias decenas de unidades en función del contexto; 5) los enfermos alcanzan la máxima concentración vírica en torno a los 5 días desde el inicio de los síntomas, después, decae de forma progresiva; a partir del día 15 desde el inicio de los síntomas es muy baja; 6) con las vacunas y tras pasar la enfermedad se generan anticuerpos que reducen el riesgo de contagio; 7) existen diferencias por grupos de edad y sexo que pueden afectar a la la sintomatología y gravedad de la enfermedad y a su letalidad. El Instituto Nacional de Estadística facilita información desglosada por grupos de edad a diferentes escalas. Esta información es interesante teniendo en cuenta las diferencias que existen en las formas que tienen los diferentes colectivos de relacionarse con entre sí y con terceros.

Los modelos de tipo SIR, en sus diferentes variantes, pese a la existencia de algunos casos de reinfección, se han utilizado con buenos resultados para analizar la evolución del número de contagios durante la pandemia de la COVID-19 (Wilches y Castillo, 2020; Arándiga *et al.*, 2020). En este tipo de estudios la población total en un momento dado puede estructurarse siguiendo dos ejes temporales (Figura 4). Uno es el cronológico, el otro, los días desde el contagio en las personas que han sido infectadas. Pasado un periodo de tiempo determinado, el contagio alcanza un desenlace. Las administraciones

públicas han monitorizado la pandemia y han difundido los datos; por ejemplo, en Aragón (España), se cuenta con series temporales de contagios y fallecimientos a nivel de zona de salud. Por tanto, existen algunas mediciones de campo en variables de interés para la aplicación de estos modelos y se conocen los datos de población.

Figura 4. Esquema de estructura temporal de una población en base a los contagios

Tiempo desde una fecha de referencia	Fecha	Población susceptible	Población infectada por día desde el contagio					Desenlace	
			Día 0	Día 1	Día 2	Día ...	Día α	Recuperados (Inmunizados)	Fallecidos
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
...									
Fecha t									

Fuente: elaboración propia

3. MODELO DE PROPAGACIÓN ESPACIOTEMPORAL

Como se ha señalado, la propagación de la COVID se ha llevado a cabo en un medio social. Los seres humanos traban relaciones sociales directas y cercanas en las áreas en las que coinciden con otros individuos. Esto sucede de forma muy clara en el lugar de residencia, también en el trabajo y en otros lugares a los que se desplazan. Por ello, el modelo que planteamos toma como punto de partida el riesgo de contagiarse en su zona de residencia, la entidad de población (z). Esto se hace segmentando a sus habitantes por grupo de edad (g). Buena parte de los desplazamientos interurbanos se hacen en medios de transporte que no conllevan relaciones sociales en las áreas intermedias. Por ello, planteamos un modelo de propagación en el espacio de tipo vectorial, teniendo en cuenta los desplazamientos entre entidades (m). La evolución temporal se efectúa siguiendo el eje cronológico a nivel global y, en los infectados, además se añade como dimensión el día desde el contagio (d). La población de cada grupo que se encuentra en cada entidad (N) en un momento dado, se ha categorizado siguiendo un modelo SIR. No obstante, en este caso la población de un grupo en una entidad no depende solo de la estructura demográfica de esta, depende de los desplazamientos.

3.1. Riesgo de contagio y número de contagiados

La probabilidad de que un individuo susceptible de un grupo cualquiera se contagie dentro de una entidad está en función de sus interacciones sociales. Estas pueden ser con diferentes grupos de población y con un número diferente de individuos en cada caso (n), sin embargo, pueden estar contagiados o no. La probabilidad de que, en caso de interactuar con una persona de un grupo determinado, la relación se lleve a cabo con un infectado, se ha modelado como la proporción de contagiados dentro del grupo en cada entidad. Sin embargo, existen otros factores que pueden afectar; unos afectan al sujeto susceptible, otros al infectado y otros a su relación mutua. En cuanto al primero, el riesgo de contagio se ve atenuado por su propia resistencia; por ejemplo, si porta medidas de protección o ha sido vacunado; esto se ha modelado en términos de vulnerabilidad (V); es decir, la probabilidad de que, tras ser expuesto al virus, el sujeto no se contagie. En el caso de los individuos infectados que interaccionan, es necesario considerar la etapa de la infección en la que se encuentran y sus síntomas. Esto se ha modelado en términos de transmisibilidad (T), como la probabilidad de que el individuo se encuentre en fase contagiosa. Ente ambos sujetos puede haber diferentes tipos de exposición, más o menos intensas y prolongadas; esto se ha incluido como un parámetro de ajuste (t) de la vulnerabilidad y la transmisibilidad.

Los elementos anteriores permiten efectuar una estimación de la probabilidad de contagio (P) de una persona del grupo g en una entidad, como se expresa a continuación:

$$P_g = 1 - \prod_{j=1}^j \left(1 - \left(I_j \cdot T_j^{t_{g,j}} \cdot V_g^{t_{g,j}} \right) \right)^{n_{g,j}}$$

Siendo: $P_{g,e,f}$ la probabilidad de que una persona susceptible del grupo g se contagie en la entidad e y la fecha f . Los grupos que hay en la entidad son j y la probabilidad de que, en caso de interacción con el grupo j , el individuo esté contagiado I_j . La probabilidad de que el individuo infectado del grupo j se encuentre en fase de transmisión es T_j . La vulnerabilidad del individuo del grupo g es V_g ; y el grado de exposición que supone la interacción entre el individuo del grupo g y el del grupo j es el parámetro $t_{g,j}$. El número de interacciones que el individuo del grupo g tiene con sujetos del grupo j es el parámetro $n_{g,j}$. Un procedimiento para estimar los parámetros se expone en el subapartado siguiente.

El modelo es probabilístico; la probabilidad de contagio se lleva a cabo sustrayendo a la unidad la probabilidad de no contagiarse en ninguna de las interacciones que ha tenido. El número diario de contagios en un grupo de población, dentro de una entidad y en una fecha determinada, puede aproximarse en términos agregados como:

$$I_{g,d_0} = S_g \cdot P_g$$

Siendo: I_{g,d_0} el número de infectados del grupo; S_g en número de personas susceptibles en el grupo g ; y P_g la probabilidad de contagio.

3.2. Proceso de difusión espaciotemporal

Durante la pandemia se tomaron medidas que afectaron a las relaciones sociales. En este sentido, el modelo que se plantea puede estar abierto a múltiples interacciones y cambios, haciendo que todas las variables de la función puedan variar en el tiempo y en el espacio.

La propagación del virus entre personas de diferentes entidades se lleva a cabo a través de los desplazamientos de las personas contagiadas. El número de desplazamientos se puede estimar atendiendo a las características de cada grupo social con la información del MITMA. Añadiendo a lo anterior el número de personas de cada grupo que entran y salen de cada entidad, es posible calcular la población de cada segmento social de la entidad tras incorporar los desplazamientos.

La población de una entidad en un momento concreto puede estimarse como:

$$N_{z_f} = \sum_{g=1}^j N_g$$

Siendo: N_{z_f} la población total de la entidad en una fecha f y N_g la población de cada grupo en esa fecha.

El saldo de los desplazamientos, es decir, la diferencia entre la población que entra y sale de una entidad en una fecha, puede expresarse como:

$$M_{z_f} = \sum_{z=1}^c m_{c,z} - m_{z,c}$$

Siendo: M_{z_f} el saldo de los desplazamientos de la entidad z en una fecha f ; c el conjunto de entidades, $m_{c,z}$ los desplazamientos con destino en la entidad z y $m_{z,c}$ los desplazamientos con origen en z y destino en cualquier otra entidad en esa fecha.

Tras incorporar los desplazamientos de la fecha f , la población en el momento siguiente ($N_{z_{f+1}}$) es:

$$N_{z_{f+1}} = N_{z_f} + M_{z_f}$$

Esto, a nivel de grupo de población y situación con respecto al contagio, puede detallarse dentro de una entidad como:

$$N_{g,z_{f+1}} = \sum S_{gf} + \sum I_{gdf} + \sum R_{gf} + \sum S_{gf} + \sum i_{gdf} + \sum r_{gf}$$

Siendo: $N_{g,z,f+1}$ la población total de del grupo g en la entidad z en la fecha $f + 1$; y, respecto de la fecha f : S_g la población susceptible de contagio de cada grupo, s_g es la diferencia entre la población susceptible de cada grupo que entra a la entidad y la que sale; es decir, el saldo de sus desplazamientos; I_{gd} el número de infectados de cada grupo en cada día desde el contagio; i_{gd} es su saldo; R_g el número de personas que se han recuperado de la enfermedad y r_g es su saldo. Por tanto N_z tiene un carácter dinámico.

Incorporar los desplazamientos entre cada origen y cada destino, permite simular la propagación del virus a lo largo del tiempo, entre ciudades y núcleos de población. Esto afecta al riesgo de contagio de las entidades de acogida y destino. Por tanto, permite simular modelos territoriales dinámicos que evolucionan en el tiempo por la interacción de sus partes, en función de la frecuencia de los desplazamientos; y, de forma endógena, por su propia estructura poblacional y su evolución particular.

El eje cronológico puede establecerse utilizando diferentes lapsos e introducir los desplazamientos dinámicamente. En este caso se podrían utilizar para marcar el paso del tiempo. Independientemente de la unidad de tiempo, el eje cronológico y, en el caso de los infectados, el del tiempo desde el contagio deben presentar sincronía. En este sentido:

$$f_y - f_k = d_k + f_y - f_k; \text{ si } d_k + f_y - f_k > L, R_{gf_y} = R_{gf_k} + I_{gd_k f_k}$$

Siendo f_y la fecha del desplazamiento y f_k el momento del desplazamiento anterior y d_k el día desde el contagio y L el límite de días que dura la enfermedad.

3.3. Variables y parámetros

En la determinación de parámetros, se puede contar con los resultados de algunos estudios como las publicaciones del CCAES y también con algunas encuestas, que pueden ser especialmente útiles para inicializar el modelo y comprobarlo. No obstante, dado que se integran parámetros del comportamiento social que son de naturaleza dinámica, puede que sea interesante estudiarlos para valorar el efecto de una medida sobre alguna porción del territorio. Algunos de los elementos considerados son complejos de estimar mediante mediciones de campo, se pueden aproximar mediante diferentes técnicas como la simulación. En relación con esto, cabe inicializar el modelo utilizando los datos observados en cada lugar; pero, también, es susceptible de utilización en relación con escenarios particulares o mediante semillas aleatorias.

Utilizando algunas series de datos de contagios como apoyo, se puede definir la mejor combinación como aquella que minimiza la diferencia entre el número de casos estimados y observados. El grado de ajuste de una combinación de variables se puede comprobar a través de los errores de estimación, comparando esta con una serie de referencia de casos de contagio u otras variables del modelo. Esto puede hacerse a lo largo del tiempo como sigue:

$$P(I, V, T, t, R) = \min \left(\frac{\sum_{z=1, f=1}^{z,t} (O_{z,f} - E_{z,f})^2}{n_z \cdot n_f} \right)$$

Siendo:

$O_{z,f}$: número de casos observado en la zona z y la fecha f .

$E_{z,f}$: número de casos estimado en la zona z en la fecha t .

n_z : número de zonas de salud.

n_f : número de unidades de tiempo a comprobar desde el inicio de una simulación.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los procesos de contagio del Sars-CoV-2 han influido multitud de factores. Entre ellos, los hay de tipo biológico y social (CCAES, 2021b). En el modelo de propagación espaciotemporal que compartimos hemos intentado introducirlos a través del estudio comparado de colectivos con diferentes resistencias y reacciones ante una infección. Las relaciones sociales, variables entre grupos sociales, se han considerado

atendiendo a su número e intensidad. El análisis de la evolución temporal que se plantea es esencialmente un modelo de tipo SIR al que se le añaden los desplazamientos humanos. Existen trabajos sobre la materia que utilizan los SIR (Wilches y Castillo, 2020; Arándiga *et al.*, 2020) y han dado buenos resultados. Sin embargo, ante las reinfecciones cabría efectuar algunas adaptaciones o redefinir algunos conceptos como el de población susceptible.

La utilización de modelos en el campo de las ciencias sociales puede ser de utilidad para estudiar fenómenos complejos (Barbosa, 2018). La COVID-19 ha sido objeto de diversas aproximaciones espaciales (Nowak *et al.*, 2022). En ellas, se ha observado que las redes de sistemas de asentamientos y los desplazamientos han jugado un importante papel en el proceso de propagación de la pandemia (Yüceşahin y Sirkeci, 2020; Escolano y Salvador, 2022). En el modelo que planteamos, hemos incluido esta cuestión utilizando un espacio vectorial en el que los desplazamientos no implican interacciones sociales en las áreas intermedias de un itinerario. Esto permite identificar las principales vías de propagación, pero, en caso de utilizar fuentes como la del MITMA, deja fuera otros procesos; por ejemplo, los contagios producidos en equipamientos como las estaciones de servicio.

Aunque algunas variables pueden ser complejas de estimar, el modelo permite hacer simulaciones variando algunos parámetros. En este sentido, puede resultar de utilidad para efectuar análisis sobre comportamientos sociales afectados por la COVID y valorar el impacto de las medidas de confinamiento en la propagación. Disponer de esta información puede ser útil en la gestión de crisis futuras (Aleta y Moreno, 2020), de cara a una mejor definición de las acciones vinculadas a la planificación sanitaria y de Salud Pública; también para estudiar aspectos relacionados con el medio social y los vínculos interterritoriales.

En Ciencias Sociales como la Geografía, los enfoques cuantitativos han aportado nuevas técnicas de análisis (Adams, 2001; Barbosa, 2018). Los avances en las ciencias y el desarrollo de la computación han supuesto una revolución en multitud de campos de la vida diaria. En Geografía, los Sistemas de Información Geográfica y una mayor facilidad de acceso a los datos supusieron un avance fundamental, permitiendo, a muchos ciudadanos e instituciones, la consideración del espacio en sus decisiones. La programación de análisis geográficos y las simulaciones pueden abrir una nueva etapa en el estudio de las interacciones espaciales y el conocimiento del territorio. Actualmente estamos trabajando en la codificación del planteamiento que hemos expuesto en un lenguaje informático para valorar su aplicabilidad. El modelo, definido en grandes líneas, es susceptible a críticas y mejoras. En este sentido, esperamos que su presentación en el Congreso nos permita incorporar las observaciones que nos puedan hacer los compañeros.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación “la propagación espaciotemporal de la COVID-19 (Sars-CoV-2) en España y su relación multiescalar con los patrones de movilidad cotidiana y vulnerabilidad sociodemográfica (GEOCOVID-19)”, concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación en la convocatoria 2020.

REFERENCIAS

- Adams, J. (2001). The Quantitative Revolution in Urban Geography. *Urban Geography*, 22 (6), 530-539. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.22.6.530>
- Aleta, A., Moreno, Y. (2020). Evaluation of the potential incidence of COVID-19 and effectiveness of containment measures in Spain: a data-driven approach. *BMC Medicine*, 18(1), 157. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01619-5>
- Arándiga, F., Baeza, A., Cordero-Carrión, I., Donat, R., Martí, M.C., Mulet, P., Yáñez, D.F. (2020). A Spatial-Temporal Model for the Evolution of the COVID-19 Pandemic in Spain Including Mobility. *Mathematics*, 8 (10), 1677. <https://doi.org/10.3390/math8101677>
- Baños, A. Le Néchet, F., Ouriachi, M.J., Franc, A. (2021). Simulating transition: an introduction to spatio-temporel models. En Sanders, L. (Dir) *Settling the World: From Prehistory to the Metropolis Era*. François-Rabelais University Press. Recuperado de: <http://books.openedition.org/pufr/19752>
- Barbosa-Filho, H., Barthelemy, M., Ghoshal, G., James, C.R., Lenormand, M., Louail, T., Menezes, R., Ramasco, J.J., Simini, F., Tomasini, M. (2018). Human Mobility: Models and Applications. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.01.001>
- Berry, B.J.L. (1971). *Geografía de los centros de mercado y distribución al por menor*. Vicens Vives. 191 p.

- Bonnefoy, J. L., Pumain, D., Rozenblat, C. (1996). Theorie des graphes et interactions non gravitaires. En J.-P. Bocquet-Appel, D. Courgeau, D. Pumain (Eds.). *Analyse spatiale de données biodemographiques*. Montrouge, John Libbey Eurotext.
- Boyce, A. J. (Ed.). (2022). *Migration and Mobility*. Taylor & Francis.
- Buzai, Gustavo D., Baxendale, Claudia A.. (2008). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos. *Revista Universitaria de Geografía*, 17 (1), 233-254.
- Cavalli-Sforza, L.L. (2000). *Genes, pueblos y lenguas*. Barcelona. Ed. Crítica. 235 p.
- Centro de Coordinación de Alertas y Emergencias Sanitarias (2021a). *Información científica-técnica. Transmisión de SARS-CoV-2. Actualización, 7 de mayo 2021*. Ministerio de Sanidad.
- Centro de Coordinación de Alertas y Emergencias Sanitarias (2021b). *Información científica-técnica. Enfermedad por coronavirus, COVID-19*. Ministerio de Sanidad.
- Chen, Min, C., Guonian, L., Chenghu, C., Hui, H., Zaiyang, M., Songshan, Y., Yongning, W., Fengyuan, Z., Jin, W., Zhiyi, Z., Kai, X., Yuanqing, H. (2021). Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era. *Science China Earth Sciences*, 64, 1207–1223. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9759-0>
- Christaller, W. (1933). *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. Jena. Gustav Fischer.
- Clarke, J.I. (1978). Population Geography. *Progress in Human Geography*, 2 (1), 163-169. <https://doi.org/10.1177/030913257800200112>
- Cortes Generales (1978). Constitución Española. BOE núm. 311, de 29/12/1978. <https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/1/con>
- Díez Cornago, C., Escalona Orcao, A.I. (2001). Áreas de influencia y competencia espacial (...). *Geographicalia*, 39, 61-80.
- Escolano-Utrilla, S., Salvador-Oliván, J.A. (2022). Global regularity and local variability of the space-temporal patterns of COVID 19 in Aragón (Spain). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 93. <https://doi.org/10.21138/bage.3276>
- Escolano-Utrilla, S., Escalona-Orcao, A. (2022). Delimitación de áreas funcionales mediante redes de movilidad formadas a partir de datos de telefonía móvil. *Int. Conf. on Regional Science*. Recuperado de: <https://reunionesdeestudiosregionales.org/granada2022/actas-del-congreso/>
- Esguerra, G.A. (2015). Economía conductual, principios generales e implicaciones. *Cuadernos Hispanoamericanos de Psicología*, 15 (1). <https://doi.org/10.18270/chps.v15i1.1780>
- George, P. (1991). *Diccionario Akal de Geografía*. Torrejón de Ardoz. Ediciones Akal. p. 622.
- Guerin-Pace, F., Pumain, D., Mathian, H., Sanders, L. (1996). Les systèmes multi-agents pour modéliser l'émergence des réseaux urbains. En J.P. Bocquet-Appel, D. Courgeau, D. Pumain (Eds.). *Analyse spatiale de données biodemographiques*, John Libbey Eurotext.
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in regional science? *Papers Reg. Sci.*, 24 (1), 7-24.
- Kahneman, D., Tversky, A. (Eds.). (2000). *Choices, values, and frames*. Cambridge University Press.
- 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)*. <https://ourworldindata.org/coronavirus>
- McAloon, C., Collins, Á., Hunt, K., Barber, A., Byrne, A.W., Butler, F., Casey, M., Griffin, J., Lane, E., McEvoy, D., Wall, P., Green, M., O'Grady, L., More, S.J. (2020). Incubation period of COVID-19: a rapid systematic review and meta-analysis of observational research. *BMJ Open*. <https://bmjopen.bmj.com/content/10/8/e039652>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana publica (2022). *Open Data Movilidad*.
- Reilly, W.J. (1931). *The law of retail gravitation*. New York, Knickerbocker Press.
- Sheller, M., Urry, J. (2006). The New Mobilities Paradigm. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 38 (2), 207–226. <https://doi.org/10.1068/a37268>
- Souris, M. (2019). *Épidémiologie et géographie (...)*. ISTE Editions Ltd.
- Stouffer, S.A. (1940). Intervening opportunities: A theory relating mobility and distance. *Amer. Sociol. Rev.*, 5 (6), 845-867. <https://doi.org/10.2307/2084520>
- Tkachenko, N., Weissmann J.D., Petersen, W.P., Lake, G., Zollikofer, C.P.E., Callegari, S. (2017) Individual-based modelling of population growth and diffusion in discrete time. *PLoS ONE* 12(4), e0176101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176101>
- Urry, J. (2007). *Mobilities*. Polity Press.

- Vespignani, A., Tian, H., Dye, C., Lloyd-Smith, J.O., Eggo, R.M., Shrestha, M., Scarpino, S.V., Gutierrez, B., Kraemer, M.U.G., Wu, J., Leung, K., Leung, G. M. (2020). Modelling COVID-19. *Nat Rev Phys*, 2, 279–281. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0178-4>
- Werner, P.A., Kęsik-Brodacka, M., Nowak, K., Olszewski, R., Kaleta, M., Liebers, D. T. (2022). Modeling the Spatial and Temporal Spread of COVID-19 in Poland Based on a Spatial Interaction Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(3), 195. <https://doi.org/10.3390/ijgi11030195>
- Wilches Visbal J.H., Castillo Pedraza M.D. (2020). Aproximación matemática del modelo epidemiológico sir (...). *Rev Esp Salud Pública*, 94, 23 de septiembre e1-11.
- Xu, Y., Belyi, A., Bojic, I., Ratti, C. (2018). Human mobility and socioeconomic status: Analysis of Singapore and Boston. *Computers, Environment and Urban Systems*, 72, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.04.001>
- Yüceşahin, M., Sirkeci, I. (2020). Coronavirus and Migration. *Migration Letters*, 2, 379-398.