



**FACULTAD DE INGENIERÍA.
SEDE SANTIAGO**

**EXTENSIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA SIMULACIÓN
ESPACIO TEMPORAL DE DISTURBIOS URBANOS: APLICACIÓN AL
ESTALLIDO SOCIAL CHILENO DE 2019**

Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial

Profesor tutor: Dr. Carlos Gabriel Cartes Moraga.
Estudiante: Francisco Alejandro Acosta Godoy.



© Francisco Alejandro Acosta Godoy.

Se autoriza a la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya las citas bibliográficas del documento.

Santiago, Chile 2025.



Agradecimientos.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo. En primer lugar, a mi profesor guía, Carlos Cartes, por su constante orientación, paciencia y vocación por la investigación. Sus valiosos comentarios y la inspiración que transmite a través de su labor fueron fundamentales para motivarme y llevar a buen término este proyecto.

Agradezco igualmente a la Universidad San Sebastián, por brindarme una formación integral y una experiencia de aprendizaje enriquecedora, gracias al compromiso y la pasión de sus docentes, quienes han contribuido de manera decisiva a mi desarrollo académico y profesional.

Extiendo también mi gratitud a todas las personas e instituciones que, de una u otra forma, aportaron su apoyo y colaboración durante este proceso.

Finalmente, a mi familia, por su apoyo incondicional, su confianza y su aliento permanente, pilares esenciales que me han permitido alcanzar esta etapa académica y culminar con éxito este trabajo.



RESUMEN

Este trabajo extiende el modelo propuesto por Cartes para describir la evolución espacial de los disturbios a causa de las protestas ocurridas durante el estallido social en Chile en 2019, incorporando una componente de periodicidad temporal que permite simular la recurrencia de manifestaciones. El modelo, basado en la formulación de Bonasse-Gahot et al. para los disturbios de 2005 en Francia, fue adaptado para reflejar no solo la propagación espacial, sino también la reactivación periódica observada en eventos reales como el caso chileno. Los resultados muestran patrones de agrupación espacial y temporal que coinciden con los focos de mayor conflicto reportados durante el periodo, ofreciendo una herramienta con potencial para anticipar zonas y momentos críticos de disturbios sociales. Comprender estas dinámicas puede contribuir al diseño de medidas preventivas que mitiguen los daños estructurales y los riesgos a la integridad de las personas disminuyendo o evitando los números de víctimas ya sean heridos o fallecimientos.



ABSTRACT

This study builds upon the framework proposed by Cartes to model the spatial evolution of civil unrest during the 2019 social uprising in Chile, introducing a temporal periodicity component to capture the recurrence of protest events. Drawing on the formulation of Bonasse-Gahot et al. for the 2005 riots in France, the model is adapted to represent not only the spatial spread of disturbances but also their periodic reactivation, as observed in the Chilean case. Simulation outcomes reveal spatial and temporal clustering patterns that align with the main hotspots of conflict reported during the period, highlighting the model's potential as a tool for anticipating critical locations and time windows of social unrest. A deeper understanding of these dynamics can inform the design of preventive strategies aimed at reducing structural damage and mitigating risks to public safety, thereby lowering the likelihood of casualties and injuries.



Tabla de contenido

1. Introducción	8
1.1 Contexto: las protestas sociales.....	8
1.2 El estallido social en Chile.....	9
1.3 Modelos como herramienta preventiva	10
1.4. OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivos generales.....	11
1.4.2 Objetivos específicos	12
2. Marco Teórico	13
2.1 Protestas sociales como manifestaciones urbanas	13
2.2 Modelización matemática de disturbios sociales	14
2.3 Enfoque epistemológico del modelamiento	15
3. Metodología	16
3.1 Enfoque general.....	16
3.2 El modelo de Bonasse-Gahot y su adaptación por Cartes	16
3.3 Extensión con periodicidad temporal.....	18
3.4 Implementación computacional	19
3.5 Visualización y validación	19
4. Resultados	22
4.1 Evolución de la intensidad total.....	22
4.2 Distribución acumulada de los disturbios	24
4.3 distribución espacial a través del tiempo	26
4.4 Comparación con datos reales.....	28
4.4 Resultados Earth Mover's Distance (EDM)	30
Discusión.....	32
Conclusión.....	35



Bibliografía.....	37
Anexos.	38
Datos de los disturbios.....	38
Datos sobre la población.....	38
Coordenadas de metro	38
Parámetros de simulación.....	38



1. Introducción

1.1 Contexto: las protestas sociales

Las manifestaciones sociales constituyen una de las formas más significativas de expresión colectiva. Históricamente, han permitido a las sociedades visibilizar injusticias, exigir transformaciones y poner en tensión estructuras de poder. Son una expresión legítima del descontento frente a diversas problemáticas estructurales como la desigualdad, la exclusión, la represión o el abuso de poder, entre otras. Desde una perspectiva democrática, el derecho a protestar está consagrado como una libertad esencial: el derecho a reunión, a la libre expresión y a la participación política. En este contexto la corte interamericana de derechos humanos sostiene que:

La libertad de expresión es una piedra angular en la existencia misma de una sociedad democrática. Es indispensable para la formación de la opinión pública. Es también *conditio sine qua non* para que los partidos políticos, los sindicatos, las sociedades científicas y culturales, y en general, quienes deseen influir sobre la colectividad puedan desarrollarse plenamente. Es, en fin, condición para que la comunidad, a la hora de ejercer sus opciones, esté suficientemente informada. Por ende, es posible afirmar que una sociedad que no está bien informada no es plenamente libre. (Corte IDH, 1985, OC-5/85, párr. 70)

No obstante, estas expresiones sociales no ocurren en el vacío: se despliegan sobre el espacio urbano y afectan de forma directa el funcionamiento de la ciudad y la vida de sus habitantes. A menudo, estas manifestaciones derivan en interrupciones del tránsito, suspensión de servicios, daños a la infraestructura, saqueos o enfrentamientos. El carácter disruptivo de una protesta no es accidental, sino parte de su intención: alterar el orden cotidiano para exigir atención y acción.

Si bien las protestas responden a demandas legítimas, en muchas ocasiones desembocan en confrontaciones violentas entre manifestantes y fuerzas de seguridad del Estado. Esta dinámica tiende a agravarse cuando las respuestas institucionales recurren a la represión como mecanismo de control. En este escenario, las



consecuencias humanas pueden ser graves: heridos, personas detenidas, traumas físicos y psicológicos, y en casos extremos, la muerte.

Estas tensiones son difíciles de evitar. Las autoridades buscan contener los efectos de las protestas en nombre del orden público, mientras que los manifestantes presionan para hacer oír sus demandas. En la práctica, esto puede generar un círculo vicioso de escalada: mayor represión produce mayor indignación, y con ello, mayor conflicto. Por ello, se vuelve fundamental comprender cómo emergen, se propagan y se repiten estos eventos en el tiempo, no para reprimirlos, sino para mitigar sus consecuencias humanas y materiales.

1.2 El estallido social en Chile

El caso chileno es paradigmático. El estallido social ocurrido en octubre de 2019 marcó un punto de inflexión en la historia reciente del país. Lo que comenzó como una protesta estudiantil por el alza del transporte público escaló rápidamente hasta convertirse en la movilización social más grande desde el retorno a la democracia. Las causas eran múltiples y profundas: desigualdad económica, precarización del trabajo, acceso desigual a servicios básicos, desconfianza en las instituciones, y una sensación generalizada de abuso.

Las consecuencias fueron dramáticas. Según el Ministerio de Salud, entre el 18 de octubre y el 22 de noviembre se registraron 11.564 personas heridas, de las cuales más de 1.100 presentaron lesiones moderadas o graves. El Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH), por su parte, reportó 3.583 lesionados, incluyendo 2.050 personas heridas por armas de fuego (perdigones, balines, balas y gases lacrimógenos), 359 casos de daño ocular, y al menos 24 personas que perdieron completamente la visión de un ojo. A ello se suman denuncias de violaciones a los derechos humanos, como torturas, abusos sexuales, detenciones ilegales y secuestros.

Estas cifras revelan el alto costo humano que puede tener un fenómeno social que, en su origen, busca justicia y equidad. No se trata de cuestionar la legitimidad del derecho a protestar, sino de enfrentar el desafío de proteger a las personas durante estos eventos. ¿Cómo anticipar los momentos y lugares donde la protesta puede volverse



crítica? ¿Qué herramientas permiten preparar una respuesta no represiva pero efectiva ante la escalada del conflicto?

Este trabajo se enmarca en el esfuerzo por encontrar herramientas que permitan modelar el comportamiento de las manifestaciones con el fin de reducir sus consecuencias negativas sin coartar su existencia. En particular, se propone una extensión del modelo desarrollado por Cartes (2024), basado a su vez en el modelo de Bonasse-Gahot et al. (2018), el cual fue aplicado a los disturbios ocurridos en los suburbios de Francia en 2005.

El modelo busca describir la evolución espacial de la intensidad de los disturbios a través de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, considerando interacciones entre zonas, contagio del comportamiento y disipación del conflicto. El aporte de esta investigación consiste en incorporar un mecanismo de periodicidad temporal que simula la reaparición de protestas en días sucesivos, fenómeno que se observó de manera muy clara durante el estallido chileno, donde las manifestaciones se mantuvieron por semanas.

1.3 Modelos como herramienta preventiva

El objetivo de esta memoria es construir y analizar este modelo, a partir de datos reales de movilidad urbana en Santiago, con el fin de identificar patrones de propagación, concentración espacial y recurrencia temporal, de modo que sea posible anticipar zonas críticas y tiempos de mayor riesgo, permitiendo a las autoridades y a la ciudadanía tomar decisiones informadas que reduzcan el número de heridos y víctimas, sin necesidad de recurrir a la represión desmedida.

Más allá de su valor analítico, los modelos matemáticos tienen el potencial de transformarse en herramientas operativas para la toma de decisiones. En contextos urbanos complejos, donde los disturbios pueden extenderse rápidamente y afectar amplias zonas de la ciudad, contar con una representación aproximada de su posible evolución permite anticipar escenarios de riesgo y planificar medidas de mitigación más eficaces.



Diversas investigaciones han destacado esta capacidad predictiva de los modelos en escenarios sociales. Por ejemplo, la investigación de Bonasse-Gahot et al. (2018) sobre los disturbios en Francia demostró que una formulación matemática inspirada en modelos de difusión de epidemias podía reproducir la propagación espacial de los disturbios urbanos con notable precisión. A su vez, estudios como el de Braha (2012) emplean modelos basados en redes complejas de conexión espacial y mediática para simular la difusión global de movimientos de desobediencia civil. Su aproximación dinámica permite reproducir el número anual de eventos de protesta en múltiples países, mostrando que ciertas configuraciones sociales y geográficas pueden amplificar o contener estas expresiones colectivas.

En el ámbito de la gestión del riesgo urbano, existen antecedentes en fenómenos naturales. Pastor et al. (2003) aplicaron modelos matemáticos de tipo reacción-difusión para la propagación de incendios forestales, permitiendo a autoridades anticipar las zonas de mayor riesgo y planificar la respuesta. De manera análoga, este tipo de herramientas puede extrapolarse a la dinámica de protestas urbanas, proporcionando estimaciones sobre focos de disturbios, bloqueos viales o tiempos de reactivación tras períodos de calma.

Si bien su implementación debe complementarse con datos empíricos y análisis sociopolíticos, la modelación matemática se presenta como un insumo valioso para las estrategias de prevención, especialmente en contextos donde los recursos son limitados y las decisiones deben tomarse bajo incertidumbre. En este sentido, el presente trabajo busca aportar a esa línea de investigación, explorando el potencial representativo de un modelo ajustado al caso chileno y a las particularidades del estallido social de 2019.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos generales

Desarrollar un modelo matemático espaciotemporal que simule la intensidad y propagación de los disturbios sociales ocurridos durante el estallido social en Santiago



de Chile en 2019, incorporando un mecanismo de periodicidad temporal, con el fin de identificar patrones de recurrencia, anticipar zonas de mayor riesgo y contribuir a la formulación de estrategias preventivas que reduzcan daños a la población y la infraestructura urbana.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Revisar y analizar modelos matemáticos existentes sobre dinámica de disturbios sociales, con énfasis en el modelo de Bonasse-Gahot y su adaptación por Cartes, para establecer una base teórica y técnica sólida.
2. Implementar un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que represente la interacción espacial entre zonas urbanas, la difusión del comportamiento disruptivo y la disipación de los disturbios en el tiempo.
3. Incorporar un mecanismo de periodicidad al modelo, utilizando funciones senoidales o impulsos periódicos, que simule la reaparición de manifestaciones en días sucesivos, tal como ocurrió durante el estallido social en Chile.
4. Validar el modelo mediante simulaciones numéricas, utilizando datos reales de movilidad urbana y distribución poblacional de Santiago, para observar su ajuste con los eventos reales registrados.
5. Discutir las limitaciones del modelo y su potencial uso bajo supuestos controlados, sin atribuirle capacidad causal ni predictiva robusta.



2. Marco Teórico

2.1 Protestas sociales como manifestaciones urbanas

Las manifestaciones sociales representan expresiones colectivas de descontento ante injusticias estructurales, pero tienen impactos directos en el entorno urbano: interrumpen servicios, generan daños materiales y pueden derivar en heridos o fallecidos producto de enfrentamientos con autoridades. Este fenómeno ha aumentado en frecuencia y magnitud globalmente, motivando el interés interdisciplinario por comprender sus patrones y dinámicas para anticipar su evolución y mitigar riesgos.

Según el Global Peace Index 2021, elaborado por el instituto de economía y paz (IEP) entre 2011 y 2019 los disturbios violentos, huelgas generales y manifestaciones antigubernamentales aumentaron un 244%.

Hadzi-Vaskov, Pienknagura y Ricci en un artículo del IMF indican que las protestas generan un impacto macroeconómico significativo afectando variables como el PIB y el consumo en economías emergentes. Llegando a causar una reducción del PIB en aproximadamente 1 punto porcentual.

En Francia, por ejemplo, el movimiento de los “chalecos amarillos” generó pérdidas económicas millonarias. Un informe del parlamento francés (Reuters) detalla que el movimiento provocó pérdidas estimadas en €850 millones para cafés, hoteles y restaurantes, además de €2 mil millones en ingresos perdidos en centros comerciales, junto con daños por €175 millones en comercios de París, y otros costos como €71 millones en radares dañados y €15 millones en bancos afectados.

Para el caso chileno, solo el primer mes de los disturbios causó daños a la infraestructura estimados en 4600 millones de dólares. (Hribernik, M. & Haynes, S. 2020)



2.2 Modelización matemática de disturbios sociales

En las últimas décadas, se han desarrollado modelos matemáticos que describen disturbios sociales como sistemas dinámicos complejos, con analogías a epidemias, incendios o fenómenos físicos:

- Modelos basados en agentes (ABMs): Epstein (2002) desarrolló uno de los primeros modelos basados en agentes para simular la dinámica de violencia civil. En este modelo, agentes ciudadanos y “policías” interactúan en una grilla: los agentes se pueden encontrar en diferentes estados; activos, inactivos o arrestados, además calculan su agravio en función de su malestar (hardship) y la ilegitimidad, con esto deciden si rebelarse según el riesgo percibido (proporción de policías vs activos en su entorno). El sistema produce brotes de violencia, periodos de inactividad y patrones espaciales emergentes que reflejan dinámicas reales de disturbios sociales.
- Modelos epidémicos: Bonnasse-Gahot reprodujeron la propagación de los disturbios de 2005 en Francia mediante un modelo estilo SIR, calibrado a datos policiales diarios a nivel municipal. Encontraron que estos disturbios se propagaban como una "ola epidémica", y la proximidad geográfica fue un factor determinante
- Ecuaciones diferenciales acopladas: Berestycki, Nadal y Rodríguez (2015) desarrollaron sistemas que modelan la intensidad del disturbio y la tensión social, incorporando términos de difusión espacial, umbrales y shocks exógenos. Identificaron ondas viajeras de disturbios y describieron matemáticamente su propagación
- Enfoques de reacción-difusión: Berestycki y colaboradores (2020) generalizaron estos modelos para incluir campos de tensión social, mostrando que pueden dar lugar a comportamientos complejos como ondas, ciclos y auto-excitación, validando su uso en contextos urbanos y regionales.



Estos modelos, más allá de describir causas sociales, permiten predecir cómo se expanden los disturbios en el espacio y el tiempo, incorporando la interacción entre zonas, el contagio del comportamiento y la disipación espontánea de la protesta.

2.3 Enfoque epistemológico del modelamiento

El presente trabajo se inscribe en la tradición de modelos fenomenológicos de dinámica colectiva, cuyo objetivo principal no es explicar causas sociales profundas que originan las protestas, sino describir y reproducir regularidades emergentes bajo restricciones espaciales y de movilidad. Este enfoque asume que, aun cuando los fenómenos sociales están determinados por factores históricos, políticos y culturales complejos, es posible identificar patrones macroscópicos recurrentes que emergen de la interacción local entre individuos, multitudes, zonas urbanas y flujos de movilidad.

Esta perspectiva ha sido ampliamente utilizada en el estudio de sistemas sociales complejos. Helbing y Johansson (2010), por ejemplo, muestran que dinámicas colectivas como multitudes, evacuaciones o episodios de violencia pueden modelarse mediante ecuaciones no lineales que capturan interacciones agregadas, sin necesidad de representar explícitamente motivaciones personales. De manera similar, Batty (2013) concibe las ciudades como sistemas complejos autoorganizados, donde patrones globales como congestión, segregación o concentración de actividad emergen a partir de reglas locales simples y restricciones espaciales.

Profundizando en el ámbito específico de la violencia colectiva y los disturbios sociales, Epstein (2002) con su modelo basado en agentes, demuestra como ciclos de calma y estallidos violentos puedenemerger endógenamente a partir de interacciones locales, aun cuando los individuos sigan reglas simples y homogéneas. Esto refuerza la idea de que el interés de estos modelos no radica en explicar las motivaciones profundas de la protesta, sino en comprender como ciertas configuraciones estructurales permiten reproducir la aparición, propagación y disipación de episodios de conflicto.

En esta misma línea, el modelo Bonasse Gahot et al. (2018) y su posterior adaptación al caso chileno por Cartes se centran en reproducir la dinámica espacio temporal de los disturbios urbanos mediante ecuaciones diferenciales acopladas, calibradas con datos



reales de movilidad y actividad urbana. El presente trabajo continúa esta tradición, proponiendo una extensión que incorpora recurrencia temporal de la protesta, sin pretender ofrecer una explicación causal ni predictiva del estallido social, sino evaluar la capacidad del modelo para reproducir patrones de espacio y tiempo consistentes con los observados empíricamente bajo supuestos controlados.

3. Metodología

3.1 Enfoque general

Este estudio adopta una metodología cuantitativa basada en la simulación computacional de un modelo matemático que describe la evolución espaciotemporal de disturbios sociales. En particular, se implementa una versión extendida del modelo propuesto por Cartes, incorporando un término de periodicidad temporal que permite representar la recurrencia de manifestaciones observada durante el estallido social chileno de 2019.

El enfoque busca emular cómo se generan, propagan y reactivan los disturbios en el espacio urbano, utilizando datos reales georreferenciados y simulaciones por métodos numéricos (Runge-Kutta de cuarto orden) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales asociado al modelo.

3.2 El modelo de Bonasse-Gahot y su adaptación por Cartes

Uno de los modelos más influyentes en la representación matemática de disturbios sociales es el propuesto por Bonasse-Gahot et al. (2018), originalmente utilizado para describir los disturbios en los suburbios de París en 2005. Este modelo extiende una



formulación epidemiológica (originalmente de Burbeck et al., 1978) que considera dos variables principales: la actividad de disturbio $\lambda_k(t)$ y la población susceptible a unirse $\sigma_k(t)$, en un conjunto discreto de sitios geográficos. La evolución del sistema se rige por un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas:

$$\frac{d\lambda_k}{dt} = -\omega_k \lambda_k + \sigma_k \Phi[\Lambda_k]$$

$$\frac{d\sigma_k}{dt} = -\sigma_k \Phi[\Lambda_k]$$

Donde Λ_k representa el efecto acumulado de la actividad de los sitios vecinos, ponderado por una función de interacción espacial W_{kj} , la cual decrece con la distancia.

Estas variables evolucionan en función del tiempo y del acoplamiento espacial entre celdas vecinas, reguladas por parámetros como:

- ω : tasa de disipación de los disturbios.
- β : intensidad de acoplamiento (influencia entre celdas).
- δ : exponente que regula el decaimiento espacial de la influencia (distancia).

Este enfoque permite simular cómo los disturbios se expanden desde focos iniciales hacia zonas cercanas, y cómo la presión policial o la pérdida de apoyo social contribuyen a su eventual disipación.

Cartes adaptó este modelo al caso chileno discretizando la ciudad de Santiago en una grilla de 71×78 celdas de 500 metros por lado, incorporando datos reales de movilidad y zonas conflictivas. Además, modificó el kernel espacial: en lugar de utilizar la distancia euclíadiana pura, introdujo la red de transporte metro de Santiago para calcular las distancias efectivas, haciendo que si una parte del trayecto pasa por la red de metro, aquella longitud se multiplique por 0.1, reflejando que es mucho más fácil (y rápido) desplazarse usando el metro que caminando o en superficie, de este modo, el kernel de Cartes no solo mide cercanía física, sino accesibilidad real a través del transporte urbano, lo cual es clave a la hora de representar como se propagan los disturbios en la



realidad de Santiago. Sin embargo, Cartes (2022) descubrió que el modelo como tal de Bonasse-Gahot arrojaba resultados fuera de lo observado en Santiago durante el evento social, por lo que, en su trabajo, también incorporó otras variables, como los orígenes y destinos de los viajes realizados por la población de la capital, finalmente, con esta adaptación, Cartes (2025) pudo obtener resultados similares a la distribución real de los disturbios, logrando así un gran avance para el caso chileno, y contando por primera vez con una herramienta como esta.

3.3 Extensión con periodicidad temporal

Con el fin de extender el modelo original de cartes hacia dinámicas de múltiples ciclos de activación y disipación, se incorporó un término periódico exógeno en la ecuación de evolución de la población susceptible $\sigma(x, y, t)$. Este término no emerge endógenamente del sistema, sino que actúa como un forzamiento temporal externo, cuyo objetivo es representar de manera simplificada la recurrencia observada empíricamente en eventos de protesta de carácter prolongado como el caso chileno.

La periodicidad introducida se modela mediante una función senoidal del tipo:

$$\sigma(x, y, t) = f_0 \cdot (1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) \cdot \sigma_0(x, y)$$

Donde:

- f_0 : amplitud de la perturbación (controla la magnitud del “impulso” sobre la población).
- T : período (en unidades de tiempo de simulación) entre reactivaciones.
- $\sigma_0(x, y)$: valor base de población susceptible.



Para este trabajo se consideró $T=50$, esta elección se fundamenta en la dinámica temporal del modelo base. En las simulaciones realizadas sin periodicidad, el sistema presenta un máximo de intensidad alrededor de $t \approx 25$, seguido de una disipación casi completa cercana a $t \approx 50$. En este contexto, $T = 50$ representa una escala natural del modelo, asociada a un ciclo completo de activación y relajación del sistema.

3.4 Implementación computacional

- Lenguaje utilizado: Python 3.12 con librerías NumPy, Matplotlib y procesamiento de archivos .npy y .dat.
 - Método numérico: Integración temporal mediante Runge-Kutta de cuarto orden.
 - Parámetros espaciales: Grilla de 78×71 celdas que representa la zona urbana de Santiago.
 - Datos utilizados:
 - Densidad de población origen y destino (flujo de movilidad).
 - Núcleo de interacción espacial (matriz de distancias precalculadas)
- Datos reales de intensidad de disturbios para la inicialización.

3.5 Visualización y validación

Durante la simulación se generaron gráficos en tiempo real que permiten observar la evolución de la intensidad de disturbios en el espacio urbano. Estos gráficos incluyen mapas de calor en diferentes momentos clave de la dinámica, lo que facilita identificar la aparición, propagación y decaimiento de la actividad. Asimismo, se calcularon medidas agregadas, como la intensidad total de disturbios en cada instante, con el fin de reconocer patrones de periodicidad introducidos por el término oscilatorio.

La validación del modelo se llevó a cabo en dos etapas:



1. Validación cualitativa: Se compararon visualmente las zonas de mayor intensidad proyectadas por el modelo con los lugares de alta conflictividad conocidos durante el estallido social de octubre de 2019, como Plaza Baquedano, La Moneda y la Alameda. Esta comparación busca establecer si el modelo reproduce patrones espaciales coherentes con la realidad observada.
2. Validación cuantitativa: Además de la inspección visual, la validación del modelo se complementó mediante métricas cuantitativas que evalúan la similitud espacial entre los disturbios simulados y los datos observados. En particular, se utilizó Earth Mover's Distance (EMD), que mide el “trabajo” necesario para transformar la distribución de actividades de protesta simulada B en la distribución observada A , reflejando diferencias en la posición y magnitud de los focos de disturbios.

Se normalizaron ambas matrices de disturbios de tamaño $NY \times NX$ para obtener distribuciones de probabilidad:

$$\sum_{i=0}^{NY-1} \sum_{j=0}^{NX-1} a_{i,j} = \sum_{i=0}^{NY-1} \sum_{j=0}^{NX-1} b_{i,j} = 1$$

La EMD separable se calcula proyectando la masa de disturbios en cada dimensión:

$$A_x[j] = \sum_{i=0}^{NY-1} a_{i,j}, \quad B_x[j] = \sum_{i=0}^{NY-1} b_{i,j}$$
$$A_y[j] = \sum_{j=0}^{NX-1} a_{i,j}, \quad B_y[j] = \sum_{j=0}^{NX-1} b_{i,j}$$

Luego se evalúa la distancia de Wasserstein unidimensional para cada proyección:

$$w_x = EMD_{1D}(A_x, B_x), \quad w_y = EMD_{1D}(A_y, B_y)$$



La EMD total se obtiene como:

$$EMD_{separable} = w_x + w_y$$

Esta métrica refleja tanto la posición de los focos de disturbios como su magnitud relativa, penalizando más los errores en zonas de alta intensidad. Valores moderados de EMD indican que la simulación reproduce adecuadamente la distribución general de disturbios, con desplazamientos mínimos de la “masa” total de eventos.

Adicionalmente, se calculó el índice de autocorrelación espacial de Moran (Morans’I) para evaluar el grado de agrupamiento espacial de los disturbios simulados respecto a los observados, este índice se define como:

$$I = \frac{n}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij}(Z_i - \bar{Z})(j - \bar{Z})}{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2}$$

Donde Z_i representa la intensidad de disturbios en la celda i , w_{ij} son los pesos espaciales entre celdas vecinas, y W es la suma total de los pesos.

Se utilizó un modelo de vecindad tipo rook, considerando como vecinas a las cuatro celdas ortogonales de cada celda, y los pesos se normalizaron por fila. La implementación se realizó en Python mediante las librerías libpysal y esda, aplicando Moran a la matriz de disturbios simulados y observados.



4. Resultados

El modelo propuesto fue implementado en Python utilizando el método de integración numérica de Runge–Kutta de cuarto orden. Para visualizar los resultados se realizaron dos simulaciones principales: en primer lugar, se simuló el modelo elaborado por Cartes, que representa el comportamiento clásico de un disturbio, con un crecimiento inicial seguido por un decaimiento progresivo de la intensidad, y por otro lado, se hizo una simulación del modelo propuesto por esta memoria, que incorpora un término adicional en la ecuación de la población susceptible, simulando la reaparición de disturbios en intervalos regulares de tiempo, tal como ocurrió en el estallido social chileno.

Los resultados se presentan en dos dimensiones:

1. Evolución temporal de la intensidad total, para analizar la dinámica de crecimiento, decaimiento y reaparición de los disturbios.
2. Distribución espacial de la intensidad de disturbios, para visualizar cómo se concentran geográficamente en distintos momentos del tiempo.

Se utilizaron como condiciones iniciales los datos de densidad de origen y destino de viajes urbanos, y se mantuvieron constantes los parámetros del modelo propuesto por Cartes, salvo por la incorporación del término periódico.

4.1 Evolución de la intensidad total

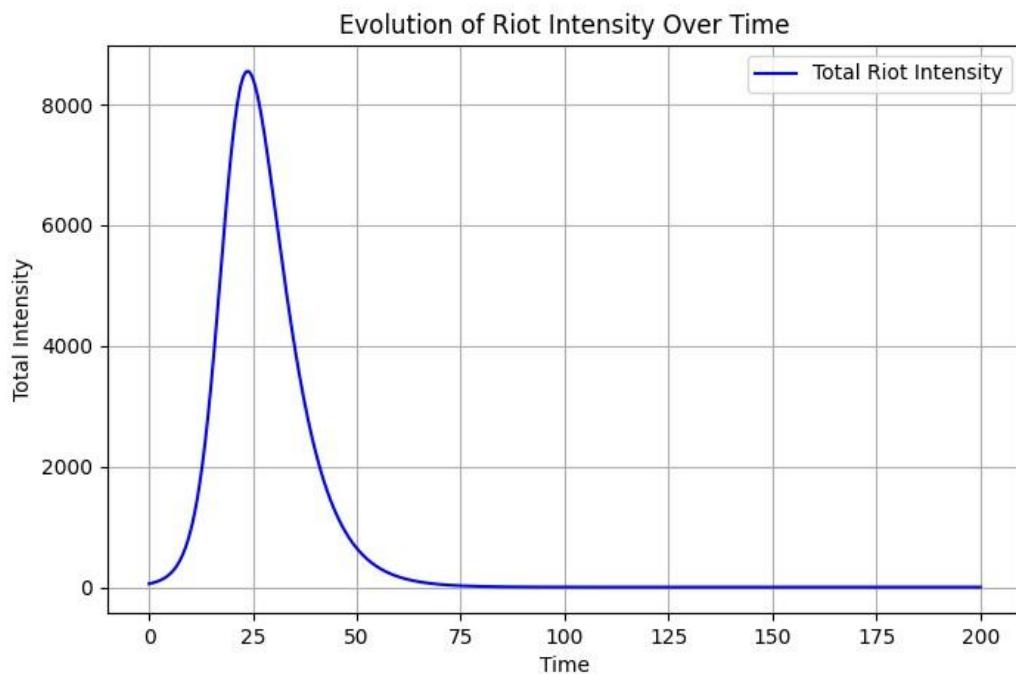
Con el fin de comparar el comportamiento de la intensidad total de los disturbios a través del tiempo, entre el modelo elaborado por Cartes y el modelo propuesto por este trabajo, se realizó también una simulación del modelo original, y se graficó la evolución de $\lambda_k(t)$ para ambos casos.

En la simulación sin periodicidad, la intensidad total de disturbios presenta un rápido crecimiento inicial, alcanzando un máximo en torno a $t = 24$ unidades de tiempo (las



unidades de tiempo “t” son arbitrarias y no reflejan exactamente las horas del día) seguido por una fase de decaimiento progresivo hasta acercarse a cero.

figura 1 evolución de la intensidad de disturbios a través del tiempo para el modelo original



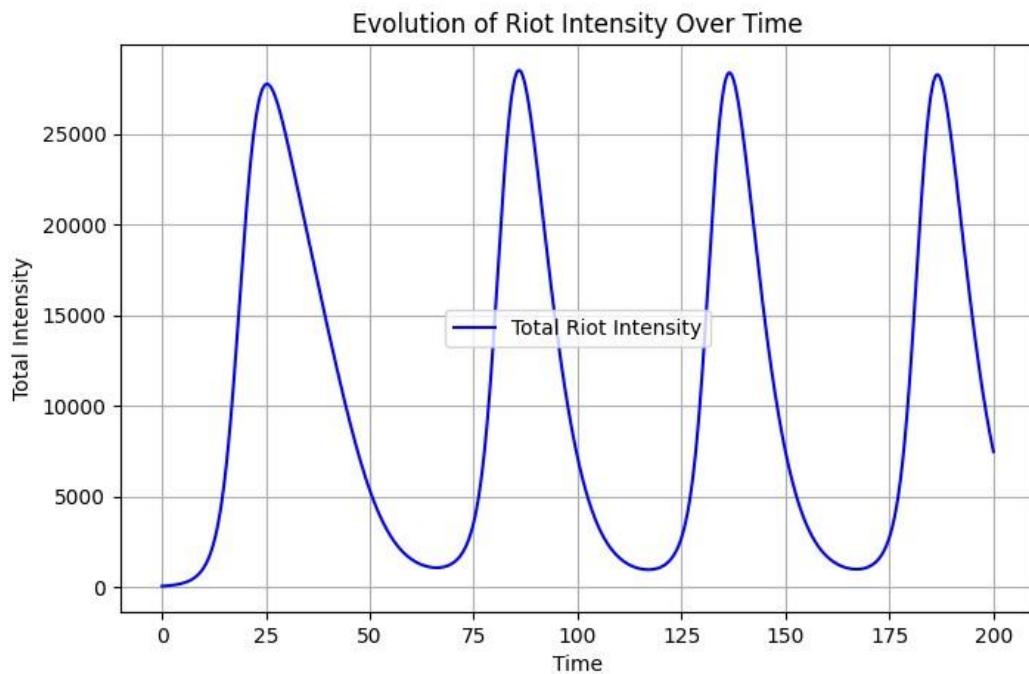
[fuente: elaboración propia]

Por otro lado, en el modelo de este trabajo, la incorporación del término periódico en la ecuación de la población susceptible genera picos recurrentes de intensidad separados por un intervalo T predeterminado. En esta simulación, se consideró un período de $T = 50$ unidades de tiempo, equivalente a un ciclo diario de disturbios.

La intensidad total presenta un patrón de crecimiento–decaimiento–reactivación, permitiendo que después de cada fase de calma parcial la actividad vuelva a concentrarse en las distintas zonas de la ciudad.



figura 2 evolución de la intensidad de disturbios a través del tiempo para el modelo propuesto



[fuente: elaboración propia]

4.2 Distribución acumulada de los disturbios

Con el propósito de analizar la correspondencia espacial global entre el modelo propuesto y la evidencia empírica, se presenta a continuación la distribución acumulada de los disturbios sobre el mapa de la ciudad de Santiago. Esta representación integra la intensidad de los eventos a lo largo de todo el periodo simulado, permitiendo identificar las zonas que concentran la mayor actividad en el tiempo.

En la Figura 3 se muestra el resultado obtenido a partir de la simulación del modelo extendido desarrollado en esta memoria, donde se observa la acumulación espacial de

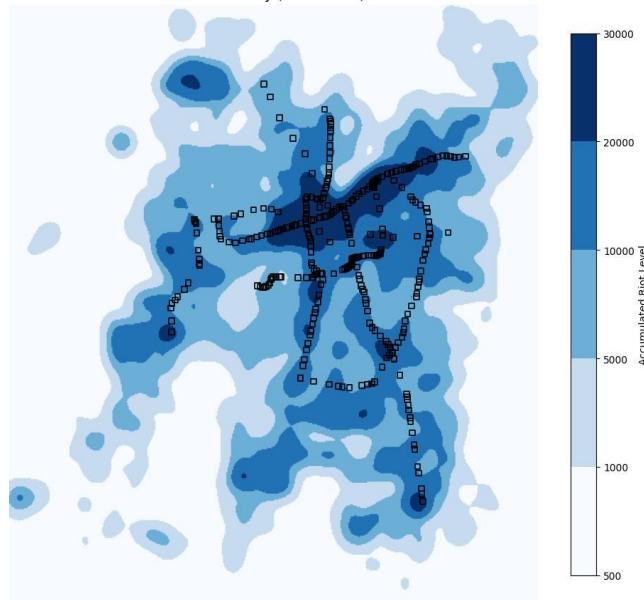


disturbios generada por el mecanismo de propagación y reactivación periódica incorporado.

Por su parte, la Figura 4 corresponde a la distribución acumulada de disturbios reales reportados durante el estallido social chileno, elaborada por Cartes (2022) a partir de los registros de la plataforma SOSAFE. Este mapa sintetiza la localización de los focos de mayor actividad observados en el periodo de estudio.

La comparación visual entre ambas figuras permite evaluar el grado de similitud en la localización de las áreas de mayor concentración de disturbios. Si bien pueden existir diferencias puntuales en la intensidad relativa de ciertos sectores, se aprecia que el modelo reproduce de manera consistente los principales núcleos de actividad presentes en los datos reales, reforzando su capacidad para capturar patrones espaciales agregados del fenómeno.

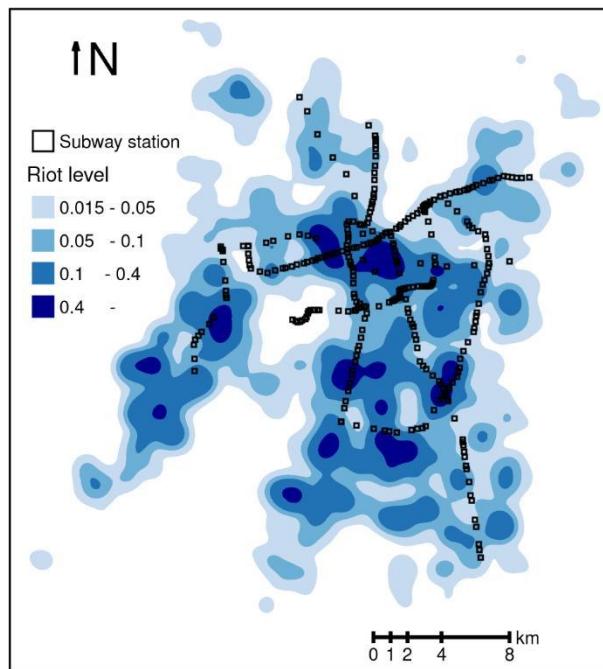
figura 3 distribución acumulada de los disturbios para el modelo propuesto
Riot Intensity (Acumulada)



[fuente: elaboración propia]



figura 4 distribución acumulada de los disturbios para el modelo original



[fuente: (Cartes, Mathematical modeling of the Chilean riots of 2019: An epidemiological non-local approach, 2022)]

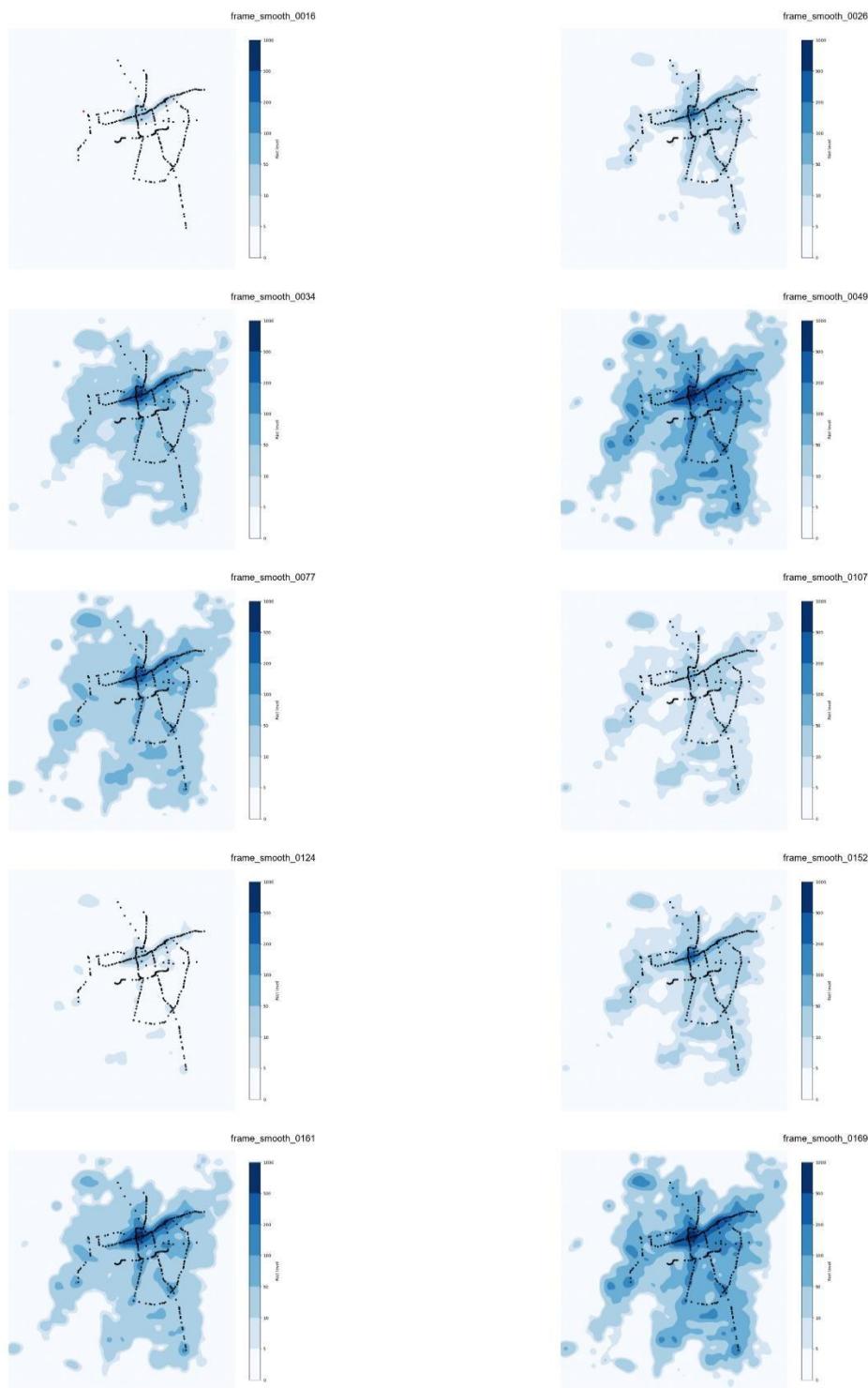
4.3 distribución espacial a través del tiempo

Para demostrar la dinámica del modelo (inicio de disturbios, crecimiento, picos máximos, disipación de los disturbios y reactivación) se han generado diferentes frames de diversos instantes (t) durante la simulación.

Los cuales pueden ser observados a continuación en la figura 5:



figura 5 frames de distribución de disturbios a través del tiempo por el modelo propuesto de periodicidad (evolución de izquierda a derecha)



[fuente: elaboración propia]



4.4 Comparación con datos reales

Con el objetivo de evaluar la validez del modelo, se realizó una comparación entre los resultados de la simulación y datos empíricos recolectados durante el estallido social chileno. Para ello se utilizaron registros de la plataforma SOSAFE, que recopila reportes ciudadanos de incidentes ocurridos en la ciudad. Estos datos fueron procesados previamente por Cartes (2025), quien construyó mapas de calor representando la distribución espacial de los disturbios en distintos momentos del sábado 19 de octubre, correspondientes a las 17:00 (a), 21:00 (b) y 24:00 (c) horas respectivamente.

Para efectos prácticos se decidió representar estos datos de la siguiente forma:

1. Inicio del disturbio: corresponde a los primeros reportes ciudadanos, donde la concentración se encuentra focalizada en un área reducida.
2. Etapa intermedia: momento en el que los disturbios se expanden hacia comunas adyacentes, mostrando un incremento en la intensidad espacial.
3. Etapa de mayor intensidad: cuando la actividad alcanza su máxima expansión y concentración en el territorio.

De manera análoga, se generaron tres mapas de calor con la simulación del modelo extendido, en los mismos intervalos temporales. Al comparar ambos conjuntos de imágenes, se observa que:

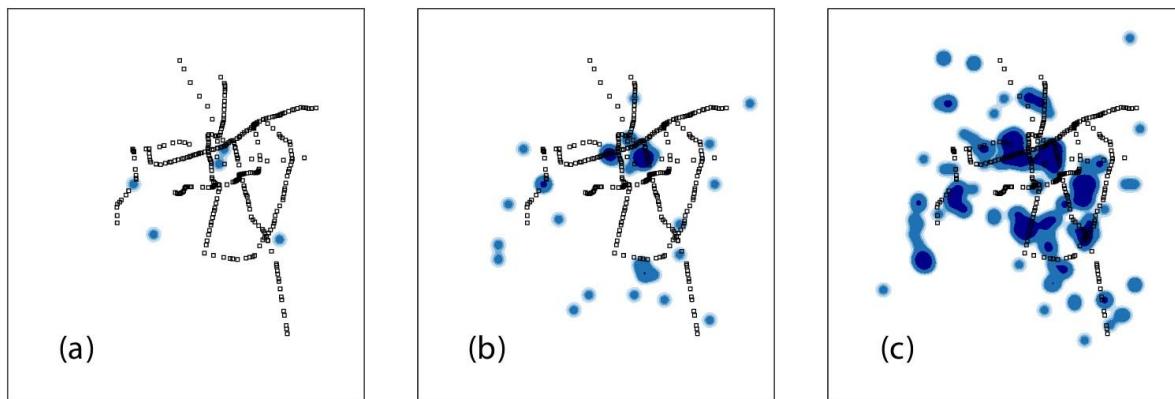
- La simulación reproduce la concentración inicial en torno a los puntos más conflictivos de la ciudad, en concordancia con los datos de SOSAFE.
- En la fase intermedia, el modelo logra emular el proceso de expansión territorial hacia zonas cercanas al epicentro, manteniendo un patrón espacial coherente con la información real.
- Finalmente, en el peak del disturbio, tanto los datos como la simulación exhiben una intensificación en el centro urbano acompañada de una propagación hacia



sectores secundarios, lo que refuerza la capacidad del modelo para representar la dinámica global del fenómeno.

Si bien las magnitudes absolutas no son directamente comparables (debido a que los datos de SOSAFE corresponden a reportes ciudadanos y no a un conteo exhaustivo), la correspondencia en los patrones espaciales y temporales sugiere que el modelo captura de forma razonable la dinámica general de los disturbios urbanos.

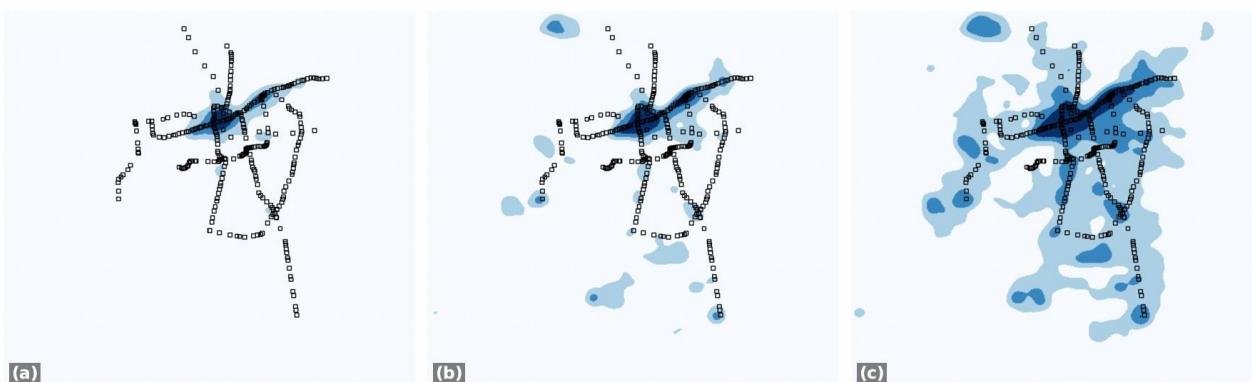
figura 6 distribución de disturbios en tres momentos consecutivos (a) 5 PM, (b) 9 PM y (c) medianoche del día 19 de octubre.



[fuente: (Cartes., Asahi. Daily commuting influence on riot development: evidence from the Chilean unrest of 2019, 2025.)]



figura 7 distribucion de la simulación de los disturbios en 3 momentos claves, seleccionados para compararse con los datos obtenidos por cartes y asahi



[fuente: elaboración propia]

4.4 Resultados Earth Mover's Distance (EDM) e índice de autocorrelación espacial de Moran (Moran's I)

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente el grado de concordancia entre la simulación y la evidencia empírica, se implementaron dos métricas complementarias: Earth Mover's Distance (EDM) y el índice de autocorrelación espacial de Moran (Moran's I) sobre la distribución espacial de los disturbios. Los datos observados corresponden a registros de la plataforma SOSAFE recopilados por Cartes, mientras que los datos simulados provienen del modelo extendido en los mismos intervalos temporales.

Para garantizar una comparación coherente, se aplicó el siguiente procedimiento previo al cálculo de las métricas:

- Ajuste de dimensiones: las matrices de la simulación se redimensionaron para igualar el tamaño de las matrices reales.



- Normalización a proporciones: los valores de cada matriz se escalaron para que la suma total fuera 1, de modo que la comparación se centrara en la forma de la distribución relativa de los disturbios y no en magnitudes absolutas.

Los resultados obtenidos fueron:

Frame	EMD (separable)	Moran observado	Moran simulado
1	13.38	0.6988	0.3412
2	6.98	0.7237	0.4109
3	8.60	0.8034	0.4223

Frame 1: tiene mayor EMD, es decir su distribución es la más distinta a los datos observados, ya que, valores más altos indican mayor diferencia entre las distribuciones. En cuanto al índice Moran, presenta el más bajo, indicando que contiene la menor concentración de los 3, puesto que valores cercanos a 1 indican alta agrupación espacial, valores cercanos a 0 indican distribución aleatoria y valores negativos indican dispersión.

Además, si el valor observado > valor simulado indica agrupación significativa, es decir, los disturbios no son aleatorios, sino que tienden a concentrarse.

Frame 2: presenta la distribución más cercana a la referencia, y con una agrupación moderada.

Frame 3: distribución intermedia, pero con mayor concentración de disturbios.



Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la extensión del modelo de Cartes, mediante la incorporación de un término periódico en la población susceptible, permite reproducir patrones espaciotemporales coherentes con la dinámica observada de los disturbios urbanos durante el estallido social de 2019 en Santiago de Chile. En particular, el modelo es capaz de representar ciclos de activación, peak, decaimiento y reactivación de la intensidad de disturbios, manteniendo consistencia espacial en las zonas de mayor concentración de eventos.

La comparación con datos reales —en particular, los registros de reportes ciudadanos de SOSAFE utilizados por Cartes— mostró que los mapas de calor generados en la simulación presentan similitudes tanto cualitativas como cuantitativas con la localización geográfica de los disturbios en Santiago de Chile. En ambos casos se identificaron focos de alta intensidad en sectores céntricos como Plaza Baquedano, Plaza de Maipú, el paradero 14 de Vicuña Mackenna, entre otros ejes urbanos de alta concentración poblacional, lo que refuerza la validez del modelo en cuanto a la reproducción de patrones espaciales observados. No obstante, también se observan discrepancias: la simulación tiende a producir distribuciones más simétricas de lo que ocurre en la realidad, donde las condiciones sociopolíticas y la geografía urbana influyen de manera más compleja.

No obstante, es fundamental precisar el alcance epistemológico de esta propuesta. El modelo desarrollado no pretende explicar las causas sociales, políticas o económicas que originan un estallido social, ni tampoco predecir el inicio de eventos de protesta. La dinámica modelada se activa a partir de condiciones iniciales y forzamientos exógenos, por lo que el sistema no genera endógenamente la emergencia de un estallido.

Asimismo, el modelo no distingue entre distintos tipos de protesta, tales como manifestaciones pacíficas y eventos violentos, ni incorpora mecanismos explícitos de



represión policial, influencia de medios de comunicación, redes sociales o procesos de coordinación social. Tampoco se considera heterogeneidad socioeconómica explícita en la población, más allá de la estructura espacial impuesta por los datos de movilidad y actividad.

Desde esta perspectiva, el modelo debe entenderse como un modelo fenomenológico espacio temporal, cuyo objetivo es describir regularidades emergentes en la propagación y recurrencia de disturbios bajo restricciones espaciales y de movilidad, y no como un modelo causal o sociológicamente explicativo.

En términos metodológicos, la principal contribución del trabajo radica en la implementación computacional consistente del modelo, su adaptación al caso chileno mediante datos reales y la exploración de dinámicas temporales extendidas más allá de un único evento puntual. Esto posiciona el modelo como una herramienta adecuada para análisis exploratorios y estudios de escenarios bajo supuestos controlados, más que como un instrumento predictivo robusto.

Desde una perspectiva práctica, la posibilidad de emular patrones de recurrencia en los disturbios abre un espacio de aplicación en la planificación preventiva. Si bien el modelo no pretende anticipar las causas sociales profundas que originan las manifestaciones, sí ofrece un marco útil para estimar la evolución espacial y temporal de los disturbios una vez iniciados. Esta capacidad puede ser de valor para autoridades, equipos de emergencia y servicios de salud, en tanto proporciona insumos para dimensionar recursos, identificar zonas de mayor riesgo y planificar rutas de acceso y respuesta en situaciones críticas.

Al mismo tiempo, los resultados ponen en evidencia ciertas limitaciones inherentes al enfoque. La incorporación del término periódico permite emular la recurrencia, pero no explica los factores sociopolíticos que determinan la duración, intensidad o interrupción de las jornadas de protesta. Además, el modelo supone homogeneidad en algunos parámetros (ej.: intensidad de la perturbación, conectividad espacial), lo que puede simplificar en exceso una realidad caracterizada por asimetrías sociales y geográficas.



Ya que el mismo no incorpora ninguna variable de tipo social, económica o política, dejando fuera diversos factores que sin duda alguna resultan interesantes y determinantes a la hora del comportamiento de una protesta.

La recurrencia introducida en este trabajo no depende explícitamente del valor acumulado de λ , es decir, de la intensidad histórica de los disturbios. Esta decisión metodológica es deliberada y responde a dos consideraciones principales.

En primer lugar, el objetivo del modelo no es representar mecanismos de memoria social, agotamiento colectivo o aprendizaje político, los cuales requerirían la incorporación de nuevas variables de estado y parámetros adicionales. Incluir tales mecanismos excede el alcance de este trabajo y modificaría sustancialmente la estructura del modelo original.

En segundo lugar, la recurrencia observada durante el estallido social chileno presenta un carácter marcadamente exógeno, asociado a rutinas sociales, horarios laborales, dinámicas urbanas y convocatorias recurrentes, más que a la intensidad acumulada del disturbio previo. Bajo esta interpretación, la reactivación diaria se modela como un forzamiento externo que renueva la disponibilidad de población susceptible, independientemente del estado instantáneo de λ .

Desde esta perspectiva, el término periódico no pretende emerger endógenamente del sistema, sino representar una regularidad empírica impuesta externamente, coherente con el enfoque fenomenológico adoptado.

Cabe destacar que esta formulación no implica que la periodicidad sea una propiedad intrínseca del sistema dinámico, sino una idealización que permite reproducir patrones temporales observados. Explorar mecanismos endógenos de recurrencia, basados en memoria social o fatiga colectiva, constituye una línea de trabajo futura, pero escapa al objetivo de esta memoria, centrada en la extensión operativa y computacional de un modelo espacio temporal existente.

En síntesis, la investigación confirma el valor de los modelos matemáticos como herramientas exploratorias y preventivas en el análisis de disturbios sociales. La extensión propuesta aporta en la dirección de representar de manera más cercana la



recurrencia empíricamente observada en fenómenos como el estallido social chileno de 2019. Sin embargo, se requiere avanzar en la integración de datos empíricos más detallados y en la incorporación de factores heterogéneos que permitan capturar la complejidad real de estos procesos.

Conclusión

El presente trabajo tuvo como propósito modelar el comportamiento espaciotemporal de los disturbios sociales ocurridos en Santiago de Chile durante el estallido social de 2019, extendiendo el modelo desarrollado por Cartes —basado en Bonasse-Gahot (2018)— mediante la incorporación de un mecanismo de periodicidad. Esta modificación buscó representar la recurrencia de las manifestaciones, fenómeno característico de dicho proceso histórico, en el cual las protestas se sucedieron a lo largo de varios días con distinta intensidad.

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo propuesto es capaz de reproducir tanto la propagación espacial de los disturbios como su comportamiento cíclico en el tiempo. La incorporación del término periódico en la ecuación de la población susceptible permitió generar “olas” sucesivas de intensidad, emulando el patrón de múltiples jornadas de protesta. Al comparar las simulaciones con datos reales — particularmente registros de reportes ciudadanos (SOSAFE) analizados en investigaciones previas— se observaron coincidencias cuantitativas mediante la prueba de valor chi cuadrado en la localización de focos de alta intensidad, como en los sectores céntricos de Santiago, lo que refuerza la validez del enfoque.

Este modelo constituye, por tanto, un aporte metodológico en la construcción de herramientas que, si bien no buscan explicar las causas profundas de las protestas, pueden contribuir a su gestión preventiva. Al anticipar zonas de riesgo y la recurrencia de los disturbios, se generan oportunidades para planificar de mejor forma la



distribución de recursos de seguridad, salud y protección civil, con el objetivo de mitigar daños materiales y, sobre todo, reducir el número de personas heridas o fallecidas en este tipo de eventos.

Sin embargo, el modelo presenta limitaciones claras. No explica el origen de los estallidos sociales, no predice su inicio ni su evolución futura fuera del período analizado, y no incorpora factores sociales, políticos o institucionales relevantes, tales como represión, medios de comunicación, redes sociales o heterogeneidad socioeconómica. En consecuencia, no debe interpretarse como un modelo causal ni como una herramienta predictiva de uso operativo.

A pesar de estas limitaciones, el trabajo aporta una base sólida para futuras extensiones, como incluir la incorporación de mecanismos endógenos de memoria social, agotamiento y reactivación, así como métricas de validación espacial y temporal más robustas. Bajo estos supuestos, el modelo puede servir como plataforma para estudios más avanzados en dinámica colectiva y análisis de disturbios urbanos desde una perspectiva de sistemas complejos.

En conclusión, la propuesta desarrollada constituye un modelo espacio temporal consistente, correctamente implementado y metodológicamente adecuado, cuyo valor reside en su capacidad descriptiva y exploratoria.

el trabajo confirma que los modelos matemáticos son herramientas útiles para explorar y comprender fenómenos sociales complejos como las protestas urbanas. La extensión aquí presentada constituye un avance en la dirección de capturar su carácter recurrente, sentando las bases para futuras investigaciones que integren mayor diversidad de datos y factores explicativos.

Bibliografía.

Corte Interamericana de Derechos Humanos. (1985). *La colegiación obligatoria de periodistas (artículos 13 y 29 Convención Americana sobre Derechos Humanos)*. Opinión Consultiva OC-5/85 de 13 de noviembre de 1985, Serie A, núm. 5. https://www.corteidh.or.cr/docs/opiniones/seriea_05_esp.pdf

Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile. (2020, octubre 2). *Balance del gobierno sobre DD.HH. en el estallido social*. El Mostrador. <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2020/10/02/a-casi-un-ano-del-18-de-octubre-las-cifras-del-gobierno-sobre-los-dd-hh-en-el-estallido-social-3-443-personas-heridas-y-347-contrauma-ocular/>

Ministerio de salud. (20 de diciembre de 2019) Reporte de atenciones de urgencia.
<https://www.minsal.cl/reportes-de-lesionados-y-heridos/>

Instituto nacional de derechos humanos INDH. (2019) Informe anual Situación de los Derechos Humanos en Chile en el Contexto de la Crisis Social. <https://bibliotecadigital.indh.cl/items/aae76b2b-9f30-45fb-a661d94144b17304/full>

Metodij Hadzi-Vaskov, Samuel Pienknagura, Luca Ricci International Monetary Fund (IMF). (2021, July 13). *Could renewed social unrest hinder the recovery?*. IMF Blog. <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2021/07/13/could-renewed-social-unrest-hinder-the-recovery>

Reuters. (2019, julio 18). ‘Yellow vest’ demonstrations cost France billions of euros. Reuters via Fashion Network. https://lb.fashionnetwork.com/news/-yellow-vest-demonstrations-cost-france-billions-of-euros_1121298.html

Berestycki, H., Nadal, J.-P., & Rodríguez, N. (2015). *A model of riots dynamics: Shocks, diffusion and thresholds*. Networks and Heterogeneous Media, 10(3), 443–475.
<https://www.aimsces.org/article/doi/10.3934/nhm.2015.10.443>

Berestycki, H., Nordmann, S., & Rossi, L. (2021). *Modeling the propagation of riots, collective behaviors and epidemics*. Mathematics in Engineering, 4(1), 1–53 <https://repository.hkust.edu.hk/ir/Record/1783.1-110826>

Bonnasse-Gahot, L., Berestycki, H., Depuiset, MA. et al. Epidemiological modelling of the 2005 French riots: a spreading wave and the role of contagion. Sci Rep 8, 107 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18093-4>

Braha, D. (2012). Global civil unrest: Contagion, self-organization, and prediction. PLOS ONE, 7(10), e48596. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0048596>

Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., & Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128503000170?via%3Dhub>

<https://PMC.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC128592/>

Complexity and Systems Science. Springer.

Copyright © 1985 by The MIT Press. All rights reserved.

approach. [\(PDF\) Mathematical modeling of the Chilean riots of 2019: An epidemiological non-local approach](#)

Carles Carter, Raullo Almán (2020). Daily commuting innovation or not: development evidence from the Chilean unrest of 2019. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5065826



Anexos.

Datos de los disturbios

Se consiguieron a través de www.sosafe.cl

Datos sobre la población

Encuesta origen – destino (2012) Sectra <https://www.sectra.gob.cl/>

Coordinadas de metro

Se pueden conseguir desde el Directorio de Transporte Público dtpm.cl

Parámetros de simulación

Algunos parámetros utilizados para la simulación o la generación de gráficos, frames, etc.

Parámetro	Valor / Descripción
nx, ny	78×71 celdas (500 m cada una)
ω	0.216 (parámetro de disipación)
δ	0.67 (exponente del kernel)
d_0	0.016 (distancia característica)
β	4.32e-4 (intensidad de acoplamiento)
dt	0.05 (paso temporal)
N_t	4000 pasos de simulación

