



GEOESTADÍSTICA APLICADA AL MODELAMIENTO PREDICTIVO DE DAÑOS SÍSMICO EN SARMIENTO (SAN JUAN – ARGENTINA)

Luciana Maricel Narváez ¹

(Manuscrito recibido el 20 de mayo de 2025, en versión final 23 de septiembre de 2025)

Para citar este documento

Narváez, L.M., 2025 Geoestadística aplicada al modelamiento predictivo de daños sísmico en Sarmiento (San Juan – Argentina). *Boletín geográfico*, 47, 1-15, <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x/9cn97s8ar>

Resumen

El departamento Sarmiento, al igual que toda la provincia de San Juan, tiene una historia sísmica marcada por importantes terremotos destructivos, como los ocurridos en 1894, 1941, 1944, 1952, 1977 y 2021. Estos terremotos han dejado una huella significativa, causando daños severos o incluso colapsos en viviendas, edificios públicos e históricos, así como importantes impactos económicos en gran parte de la población. Además, lamentablemente, han provocado un número considerable de heridos y fallecidos. En respuesta a esta situación, este trabajo se propone contribuir al conocimiento de los daños poblacionales en el departamento Sarmiento mediante su cuantificación y la aplicación de metodologías avanzadas de análisis espacial. Para ello, se emplea la metodología de la geoestadística en el modelado predictivo de los daños sísmicos, ya que las variables involucradas, al tener continuidad espacial, son adecuadas para este tipo de análisis. Los resultados proporcionan modelos predictivos claros y concisos para la gestión en caso de un evento sísmico.

Palabras claves: Mapas, Cuantificación, Amenaza, Metodologías avanzadas de análisis espacial

GEOSTATISTICS APPLIED TO PREDICTIVE MODELING OF SEISMIC DAMAGE IN SARMIENTO (SAN JUAN, ARGENTINA)

¹ Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes. Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). Instituto de Geografía Aplicada (IGA). Av. Ignacio de la Roza 230 (O) E-mail: lucianamaricelnarvaez@gmail.com

Abstract

The Sarmiento Department, like the entire province of San Juan, has a seismic history marked by powerful and destructive earthquakes, such as those recorded in 1894, 1941, 1944, 1952, 1977, and 2021. These events have left a profound impact, causing severe damage and even the collapse of homes, public buildings, and historic structures, along with substantial economic losses affecting large sectors of the population. Unfortunately, they have also resulted in a significant number of injuries and fatalities.

In response to this context, the objective of this study is to advance the understanding of population-level damage in the Sarmiento Department by quantifying it and applying advanced spatial analysis methodologies. To achieve this, geostatistical methods are employed to develop predictive models of seismic damage, as the variables involved exhibit spatial continuity and are therefore well suited to this type of analysis. The results offer clear and concise predictive models that can support decision-making and management actions in the event of a seismic event.

Keywords: Maps, Quantification, Threat, Advanced spatial analysis methodologies.

Introducción

Uno de los objetivos más importantes de todo estudio de riesgo es salvar vidas humanas. Para ello, es fundamental conocer el número de víctimas esperadas, entendiendo por víctimas tanto los heridos como los fallecidos, que podría provocar un terremoto. La documentación existente acerca del número de víctimas en terremotos pasados es escasa, siendo además muy difícil la estimación de pérdidas humanas, por causa de las diferencias en el número de víctimas dependiendo del momento en que se produce el terremoto y de la intensidad de éste. A pesar de estas limitaciones, se estima que el 25% del total de muertes producidas por terremotos a nivel mundial fueron causadas por daños no estructurales en los edificios o provocadas por otros efectos inducidos por el terremoto, como incendios, caída de bloques o deslizamientos. Este tipo de desastres es muy difícil de predecir, pero normalmente causan una baja proporción de las muertes totales. La mayor parte de las víctimas es debida al colapso de los edificios. En este sentido, el colapso total o parcial de las edificaciones es considerado la causa principal de las muertes y lesiones por el número de edificios con daños de consideración.

Es bien conocido que los desastres sísmicos, aunque tiene su origen y causa principal en el daño físico directo y en la degradación de los edificios, estructuras e infraestructuras, van más allá, golpeando entre otros aspectos, a la población, al sistema de salud y a los sistemas productivos y socioeconómicos. En este estudio se abordan diferentes aspectos que se modelan a partir del daño físico directo; concretamente los daños a la población. Entre los daños esperados a la población se propone cuantificar los fallecidos, heridos, atrapados bajo los escombros y la población sin vivienda. Se aplica la metodología de la geoestadística para el modelado

predictivo de los daños sísmicos esperados, debido a que las variables en cuestión son aleatorias regionalizadas aptas para su tratamiento.

Como base territorial, se ha seleccionado un área pequeña con delimitación político-administrativa: el departamento Sarmiento (Figura 1) en la provincia de San Juan. Esta elección se fundamenta principalmente en su alta sismicidad y gran concentración de la población, lo que lo convierte en un caso testigo interesante para ensayar la metodología propuesta.

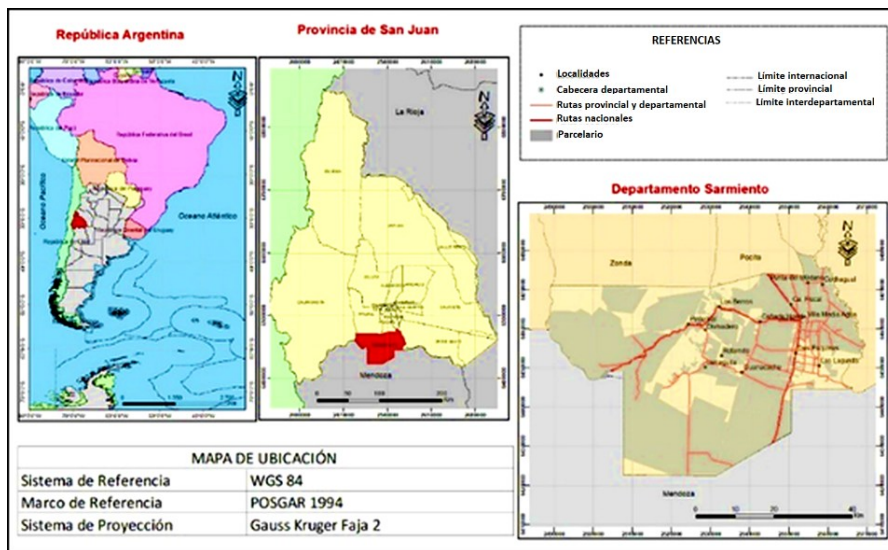


Figura 1. Localización del departamento Sarmiento. Elaborado sobre la base de CFCyC (2016).

A raíz de importantes terremotos ocurridos en diferentes países ubicados en áreas de amenaza sísmica alta, ha sido necesario desarrollar métodos para evaluar el riesgo y daños sísmico con el fin de evitar que el número de víctimas y pérdidas materiales sea mayor. En este sentido, se presenta una recopilación sobre varias metodologías existentes, dentro de las que se destacan los siguientes trabajos:

La metodología Urban System Exposure (USE) fue desarrollada como parte del proyecto de investigación GEMITIS (1996-1999) del Bureau de Recherches Géologiques et Minières, (BRGM). (Mouroux, et al, 2004). Se terminó de desarrollar y fue aplicado, a las ciudades de Barcelona, Bitola, Bucarest, Catania, Niza, Sofía y Thessaloniki como parte del proyecto Rick-EU (Masuere y Lutoff, 2006).

En cuanto a la metodología se utilizó Sistemas de Información Geográficos (SIG) para el análisis de la vulnerabilidad sísmica urbana, Rashed y Week (2003) integraron técnicas de análisis espacial multicriterio y lógica difusa. Este método fue aplicado a la ciudad de Los Ángeles.

Cardona (2001) plantea una estimación holística del riesgo sísmico, teniendo en cuenta un marco conceptual integrador y un enfoque holístico para la evaluación del riesgo de desastre, que no solo tiene en cuenta variables relacionada con los efectos físicos, sino también variables relacionadas con aspectos sociales, económicos, y de capacidad de respuesta o recuperación post-desastre o resiliencia.

A partir de una recopilación de diversos textos relacionados con la temática en estudio, se puso especial atención en cómo ha sido abordado el tema, su nivel de desarrollo y las tendencias actuales. En este contexto, resulta clave la elaboración de mapas de riesgo y modelos predictivos de daños, para diseñar planes de contingencia que deben ser desarrollados por los organismos operativos de respuesta durante la fase de preparación ante emergencias. Cabe destacar que un plan operativo basado en estos mapas puede resultar significativamente más eficaz que uno elaborado sin ese conocimiento previo, ya que permite establecer procedimientos de respuesta más precisos y adecuados para asistir a la población en situaciones de desastre.

Metodología

La geoestadística puede considerarse como una disciplina que se ocupa del análisis estadístico de variables espacialmente distribuidas; es decir se aplica a variables geográficas que se comporten como variables aleatorias regionalizadas (VAR). Se define como variable regionalizada $z(x)$ a la variable distribuida en el espacio con una estructura espacial de correlación. El procedimiento detallado que comprende el estudio geoestadístico para las variables a estimar y modelizar en la elaboración de los mapas predictivos de daños sísmicos se conforma de las siguientes etapas (Márquez, 2018).

Etapas 1: Análisis Estadístico Preliminar.

Las técnicas estadísticas convencionales nos permiten obtener todo un conjunto de información, desconocida a priori sobre la muestra bajo estudio, que es imprescindible para realizar correctamente cualquier análisis estadístico y en particular un análisis geoestadístico. La identificación de valores extremos y su ubicación geográfica, la evaluación de la forma de la distribución y el cálculo de medidas de localización, variabilidad y correlación es muy importante para establecer si algunos supuestos necesarios de la teoría geoestadística son válidos para definir qué procedimiento de predicción es el más conveniente.

En relación a la muestra bajo estudio, para que sea estadísticamente significativa, se opta por trabajar con el muestreo probabilístico y entre los diferentes muestreos (estratificado, aleatorio, conglomerado, sistemático) que existen, se decide por el aleatorio simple. La razón se debe a que los muestreos probabilísticos tienen la ventaja de ser los únicos que permiten realizar inferencias, como calcular el error del muestreo.

Es importante resaltar que el peligro o amenaza sísmica afecta a todos los habitantes del área de estudio, por esta razón, fue posible seleccionar las VAR con continuidad espacial para ser tratadas en la base de datos geográfica. Específicamente se seleccionaron aquellas variables que más daños generan en la población y que son

las que más preocupan frente a la ocurrencia de un terremoto. Estas son: cantidad de fallecidos esperados, cantidad de heridos esperados, cantidad de población sin viviendas y cantidad de población atrapada bajo los escombros.

Para la obtención de la base de cálculo de las variables mencionadas se parte del siguiente enfoque: el método uniparamétrico es utilizado para definir la acción sísmica a partir de la descripción de los daños en la escala de intensidad macrosísmica delimitada por MSK (Medvedev, 1978). El uso de matrices de probabilidad de daños (MPD) nos permite pronosticar los posibles daños en cada una de las tipologías descritas en la escala, según la severidad del evento sísmico esperado. Este enfoque es bien conocido y ampliamente utilizado en la práctica sismológica (Braga, Dolce & Liberatore, 1982).

Etapas 2: Análisis de la continuidad espacial.

El proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial es conocido como análisis estructural. El análisis estructural o estudio variográfico según (Armstrong & Roth, 1997) está compuesto por: el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste de éste a un modelo teórico conocido (modelos autorizados).

El cálculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado. Este análisis tiene como condicionantes: la distribución estadística, la existencia de valores aberrantes o anómalos, la presencia de zonas homogéneas o posibles zonificaciones en la distribución de las leyes.

Ahora, el semivariograma experimental obtenido no es utilizado en el proceso de estimación, debe ser ajustado a este uno a varios modelos teóricos o modelos autorizados, obteniéndose un modelo o función analítica que caracteriza la continuidad espacial de la variable estudiada. Es decir, el modelo de variograma teórico seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental, que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

Como el ajuste de los modelos teóricos al semivariograma experimental, se realiza variando los valores C_0 (efecto de pepita), $C + C_0$ (meseta) y a (alcance), hasta coincidir con los parámetros que mejor se ajustan, es conveniente validar el modelo seleccionado y los parámetros meseta y alcance escogidos. Al respecto se discute la validación cruzada.

El método de validación cruzada ha sido ampliamente utilizado para evaluar el grado de bondad de un modelo de semivariograma y reconocido como un método óptimo de estimación de sus parámetros. La operación de validar un semivariograma teórico ajustado a uno experimental siempre toma mucho tiempo, éste se considera como el último de los pasos importantes del análisis de variabilidad, debido a que una vez obtenido este resultado será utilizado en la estimación por krigeaje en cualquiera de sus variantes. Se van probando diferentes valores de los parámetros del semivariograma hasta que los errores de validación cumplan los siguientes criterios estadísticos (1 a 5):

1. Media del error

$$\text{Media} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z^*(x_i)\} \quad (1)$$

Sea pequeña.

2. Error Medio Cuadrático

$$\text{EMC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z^*(x_i)\}^2 \quad (2)$$

Sea el mínimo posible.

3. EMC estandarizado

$$\text{EMC std} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma_i} \right\}^2 \approx 1.0 \quad (3)$$

4. correlación muestral entre $z(x_i)$ y $z^*(x_i)$ cercana a 1.05. Correlación muestral entre $z(x_i)$ y $\{z(x_i) - z^*(x_i)\} / \sigma_i \approx 0$

donde $Z(x_i)$ son los valores muestrales en el punto x_i y $z^*(x_i)$ los valores estimados mediante kriging y σ_i las desviaciones estándar asociadas a la estimación.

Asimismo, debe verificarse que la Comprobación del RMSE relativo (RMSE_{rel})

$$6. \quad \text{RMSE}_{rel} = \frac{\text{RMSE} \times 100}{\text{Media obs.}} \quad \text{Sea pequeño} \quad (4)$$

$\text{RMSE}_{rel} < 30\% \rightarrow$ aceptable en variables ambientales.

$\text{RMSE}_{rel} < 15\% \rightarrow$ muy bueno.

$\text{RMSE}_{rel} < 10\% \rightarrow$ excelente.

Etapas 3: Estimación.

Todo lo expresado hasta aquí tiene un único objetivo, conocer la información disponible para realizar estimaciones, es decir, estimar valores desconocidos y representarlos en una cartografía, a partir, no sólo de los conocidos, sino también de su estructura de continuidad espacial. A diferencia de otra gran variedad de métodos de interpolación que no utilizan estas características y que se emplean actualmente con diferentes fines. Hay dos grupos principales de técnicas de interpolación: determinísticas y geoestadísticas. Las técnicas de interpolación determinísticas generan superficies continuas mediante el grado de similitud o suavizado. Las técnicas de interpolación geoestadísticas crean superficies continuas a partir de las propiedades estadísticas de los datos de partida (Márquez, 2018).

Estas dos técnicas de estimación utilizan directamente los valores muestreados en el proceso de estimación y refieren pesos de acuerdo a las distancias entre los datos, sin tener en cuenta la continuidad espacial de la información disponible. Veamos ahora el krigeaje, interpolador de la geoestadística, que sí utiliza los resultados que discutidos del análisis estructural.

El krigeaje es una técnica de estimación que proporciona el mejor estimador lineal imparcial (BLUE, en inglés, Best Linear Unbiased Estimator) y que además proporciona un error de estimación conocido como varianza de krigeaje que depende del modelo de variograma obtenido y de las localizaciones de los datos. Esto brinda la posibilidad de hacer análisis sobre la calidad de las estimaciones.

Uno de los problemas encontrados al modelar semivariogramas es la existencia de tendencia en los datos, es decir, que los valores medidos aumentan o disminuyen en alguna dirección en el área de estudio. Este es el caso de un fenómeno no estacionario, lo que hace imposible la aplicación del krigeaje presentado hasta aquí. Con el objetivo de solucionar este problema Matheron (1970) propuso el Krigeaje Universal (KU), que consiste en extraer de la variable original $Z(x)$ la parte no estacionaria por medio de una componente determinística $m(x)$ que representa la deriva, hasta encontrar la parte estacionaria del fenómeno, obteniéndose un componente estocástico $R(x)$ relacionados por la siguiente (5):

$$Z(x) = m(x) + R(x) \quad (5)$$

Validación con los criterios de Akaike y Bayesiano.

El objetivo de la evaluación de modelos es seleccionar aquellos que presenten el mejor balance entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad. Modelos con un mayor número de parámetros tienden a ajustar mejor una base de datos, no obstante, tienden a ser más inestables y a modelar la variabilidad de esos datos más que su tendencia. Los modelos pueden ser evaluados de acuerdo con los siguientes criterios:

- Criterio de información Akaike (AIC): el criterio combina la teoría de máxima verosimilitud, información teórica y la entropía de información, y es definido por la ecuación (6):

$$AIC = -2 * \log LIK + 2K \quad (6)$$

donde $\log(L(\theta_b))$ es el logaritmo de la máxima verosimilitud, que permite determinar los valores de los parámetros libres de un modelo estadístico, y K es el número de parámetros libres del modelo. Este criterio tiene en cuenta los cambios en la bondad de ajuste y las direcciones en el número de parámetros entre los modelos. Los mejores modelos son aquellos que presentan el menor valor de AIC.

- Criterio de información bayesiano (BIC): calculado para los diferentes modelos como una función de la bondad de ajuste del $\log Lik$, el número de parámetros ajustados (K) y el número total de datos (N). El BIC está definido por (7):

$$BIC = 2 * \log LIK + \log(N) * K \quad (7)$$

El modelo con el más bajo valor de BIC es considerado el mejor en explicar los datos con el mínimo número de parámetros.

Resultados

En este estudio, se buscó avanzar en la estimación de los daños sísmicos esperados en la población de Sarmiento. La evaluación total de las pérdidas humanas causadas por terremotos de gran intensidad se basó únicamente en los daños físicos directos (estructurales) provocados en las edificaciones, excluyendo los daños indirectos.

La implementación del plan de muestreo (Figura 2 y Figura 3): el tamaño de la población denominada “1”, es de 1.785 viviendas. Mediante la aplicación de la fórmula del cálculo del tamaño muestral se obtuvieron 317 viviendas con un nivel de confianza del 95%. El tamaño de la población “2” del objeto a estudiar comprende 71.710 viviendas. Con la aplicación de la fórmula del cálculo del tamaño muestral se obtuvieron 365 viviendas considerando el mismo nivel de confianza.

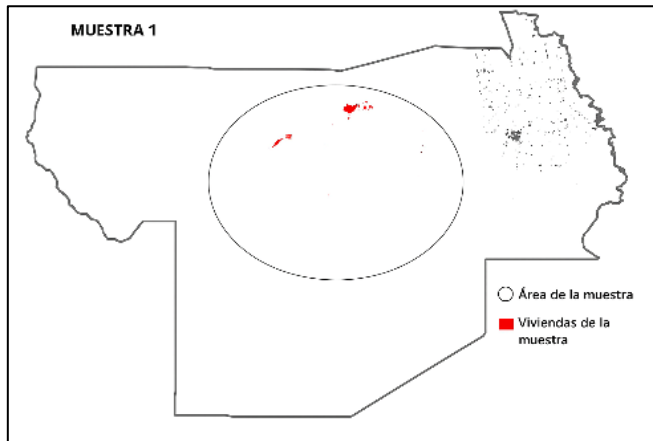


Figura 2. Implementación del plan de muestreo 1. Elaboración propia sobre los datos de CFCyC (2016) y DGyCSJ (2019).

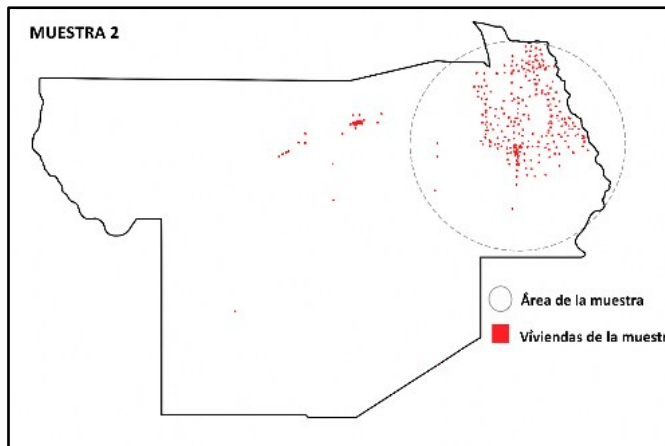


Figura 3. Implementación del plan de muestreo 2. Elaboración propia sobre los datos de CFCyC (2016) y DGyCSJ (2019).

El primer paso del método, conocido como análisis preliminar de la base de datos indicó, en términos generales, que ninguna de las variables en estudio sigue una distribución normal, aunque algunas podrían considerarse cuasinormales según el valor de su asimetría. En cuanto a la dispersión de los datos, ninguna variable mostró una medida de dispersión calculada igual a cero, lo que sugiere la presencia de datos extremos que disminuyen la confiabilidad de la medida considerada como el centro de gravedad de la serie de datos. Se detectaron errores en algunas variables, los cuales fueron considerados como atípicos debido a que las mediciones realizadas indican que los valores están dentro del rango esperado en la realidad del tema en cuestión. En cuanto a la tendencia espacial de los datos en el departamento Sarmiento se puede describir, lo siguiente para las distintas muestras:

-Muestra 1 (M1): se observa una distribución heterogénea de los datos y con una marcada delimitación territorial. Se observa un predominio en los extremos orientales y occidentales de las variables con áreas intermedias vacías, posiblemente debido a la influencia de los accidentes del relieve, entre otros limitantes.

-Muestra 2 (M2): se representa una distribución regular con valores localizados a menor distancia y cubriendo todo el territorio. Podemos decir que las variables están distribuidas en forma más regular en el departamento con tendencia decreciente en sentido oeste a este.

En esta etapa se estudia la correlación espacial de las VAR requerido por el proceso de estimación y modelación. Dicho análisis se compone primeramente por el cálculo del semivariograma experimental de cada una de las variables correspondientes a población fallecida, heridos, atrapados bajo los escombros y población sin vivienda, en las muestras. El cálculo del semivariograma experimental es una importante herramienta para la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno en estudio. En este sentido, tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra, es el aspecto más importante de la geoestadística para el análisis del fenómeno o de la variable de distribución espacial en estudio.

Posteriormente se lleva a cabo el ajuste de estos semivariogramas experimentales a diferentes modelos teóricos conocidos con la variación de los parámetros correspondientes (pepita, alcance, meseta). El modelo teórico final que mejor se ajusta es determinado mediante la validación cruzada y los coeficientes correspondientes a diferentes técnicas estadísticas. Esta información es crucial para identificar el mejor interpolador que comprende cada variable a predecir de los daños sísmicos.

Estos análisis comprueban la existencia de anisotropía en todas las VAR, ya que la correlación entre los datos depende de la dirección en que se calcule. Esto determina, que la esperanza matemática de las variables no es la misma o no es constante en todas las direcciones o que la varianza depende del sentido en que se determina, indicando concretamente que no hay estacionariedad.

Ahora bien, el punto crucial en el proceso geoestadístico radica en la selección del modelo teórico y los parámetros adecuados para ajustarse a las características del semivariograma empírico de cada VAR. En este sentido, la validación cruzada y los

coeficientes de Akaike y Bayesiano son métodos reconocidos como óptimos. Como resultado de este proceso, se determinó que los variogramas teóricos que mejor se ajustan a los variogramas experimentales de las variables de población fallecida, heridos, sin vivienda y atrapados bajo los escombros corresponden a los de tipo geoestadísticos. Sintéticamente las funciones de mejor ajuste son:

Semivariogramas teóricos - M1

- Población fallecida -----→ Circular
- Población de heridos -----→ Circular
- Atrapados bajo los escombros-----→ Esférico
- Población sin vivienda-----→ Circular

Semivariogramas teóricos – M2

- Población fallecidos-----→ Esférico
- Población de heridos-----→ Circular
- Atrapados bajo los escombros-----→ Gaussiano
- Población sin vivienda-----→ Esférico

Estos resultados de validación se utilizan en la estimación por krigeado en la variante Universal, dada la naturaleza no estacionaria y asumiendo una hipótesis intrínseca en la estructura espacial de las VAR que comprenden los daños sísmicos.

A diferencia de otra gran variedad de métodos de interpolación que no utilizan estas características, el krigeaje, interpolador de la geoestadística, sí utiliza los resultados obtenidos del análisis estructural realizado en cada una de las VAR. En el caso particular de las VAR en estudio en función del análisis estructural estamos en presencia de la existencia de tendencia en los datos, es decir los valores medidos aumentan o disminuyen en alguna dirección en el área de estudio. Este es el caso de variables no estacionarias, lo que hace corresponder la aplicación del krigeaje Universal (KU) propuesto por Matheron, (1970).

Finalmente se presentan los modelos predictivos de daños sísmicos en el departamento Sarmiento para las variables población fallecida (Figura 4 y figura 5), población de heridos (Figura 6 y Figura 7), población atrapada bajo los escombros (Figura 8 y Figura 9) y población sin viviendas (Figura 10 y Figura 11). Los mapas responden a una graduación de daños establecida por la metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) que propone nos porcentajes de <1% - <50% para el daño leve, moderado, severo y completo respectivamente.

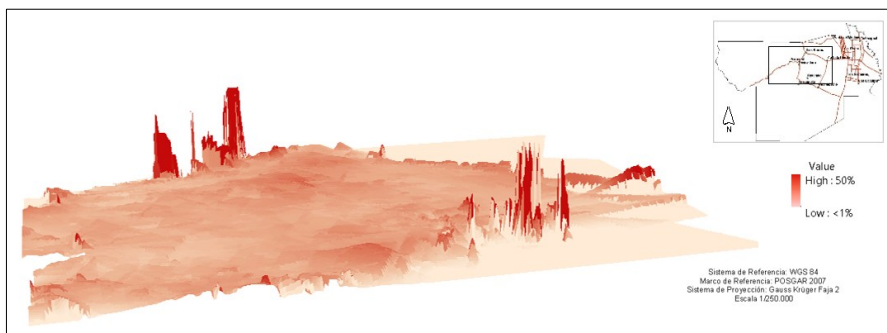


Figura 4. Modelo Predictivo de Población Fallecida – M1. Fuente: elaboración propia sobre los datos del INDEC (2022). DGyCSJ (2019).

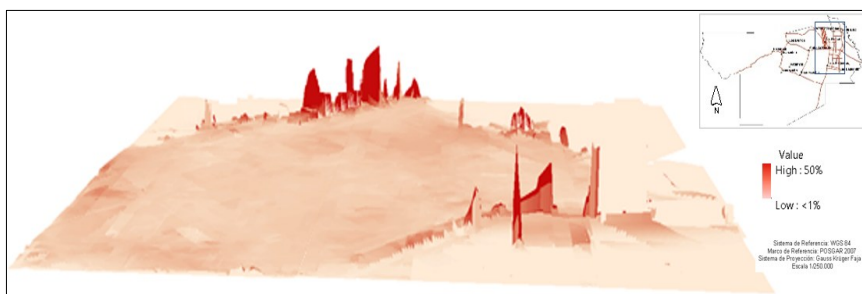


Figura 5. Modelo Predictivo de Población Fallecida – M2. Fuente: elaboración propia sobre los datos del INDEC (2022). DGyCSJ (2019).

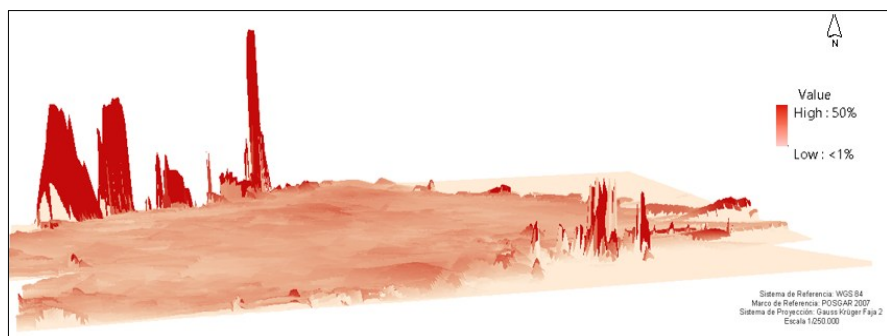


Figura 6. Modelo Predictivo de Población Herida – M1. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

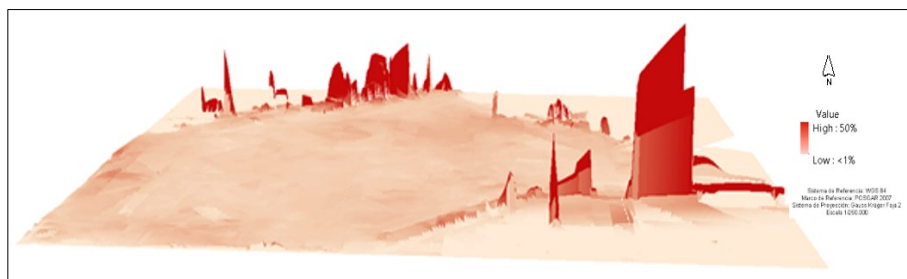


Figura 7. Modelo Predictivo de Población Herida – M2. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

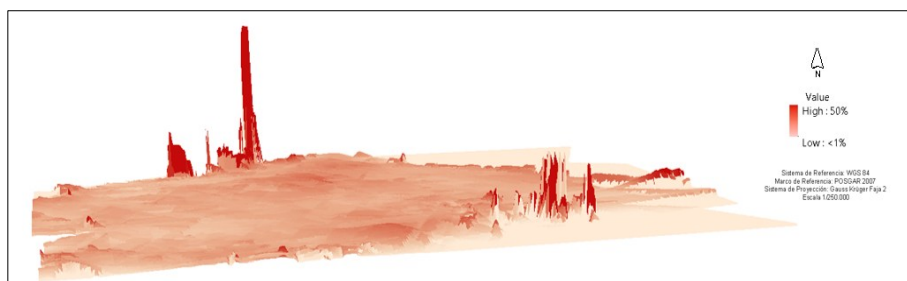


Figura 8. Modelo Predictivo de Población Atrapada bajo los escombros – M1. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

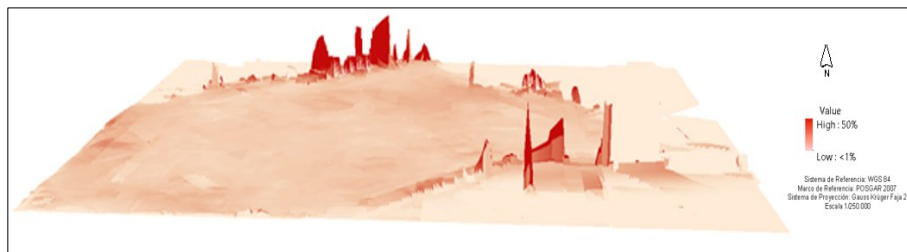


Figura 9. Modelo Predictivo de Población Atrapada bajo los escombros – M2. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

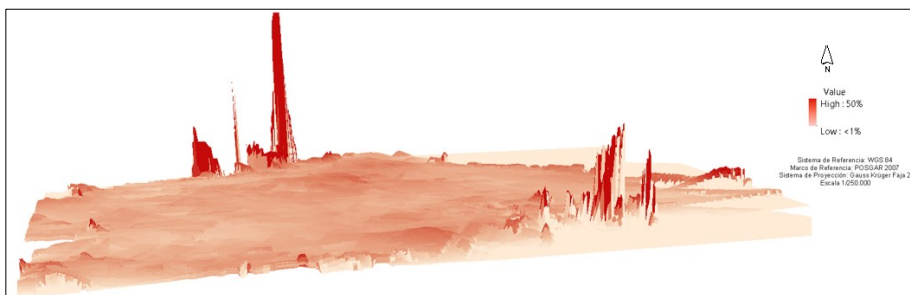


Figura 10. Modelo Predictivo de Población Sin Viviendas– M1. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

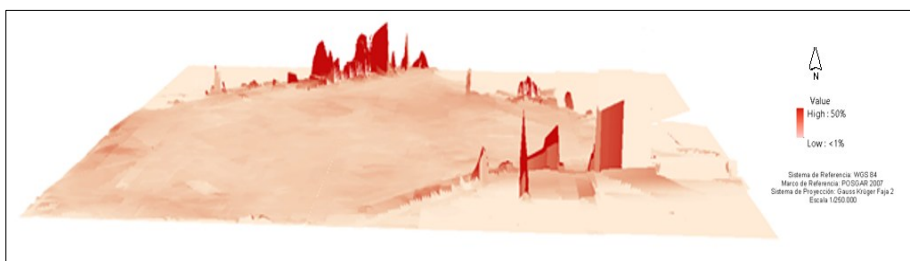


Figura 11. Modelo Predictivo de Población Sin Viviendas– M2. Fuente: elaboración propia en base a INDEC (2022) y DGyCSJ (2019).

El enfoque uniparamétrico con un terremoto potencial, que provoque una intensidad de IX y las matrices de daños propuestos por MSK-78 con las ecuaciones de cálculo para la estimación de la población fallecida, población herida, población de atrapados bajo los escombros y población sin viviendas para la muestra; y la posterior interpolación con el método de la geoestadística siguiendo rigurosamente las etapas que comprende, delimitan claramente dos áreas opuestas a los daños sísmicos esperados en el departamento Sarmiento. Los modelos predictivos representan las siguientes distribuciones territoriales:

- Áreas con alto nivel de daños sísmicos (hasta 50%): se representa para las áreas que obtendrán los elevados daños potenciales ante la ocurrencia de un evento sísmico con intensidad de IX. Se compone de las viviendas que sufrirían las peores consecuencias de tipo C con sus habitantes. Las áreas que sobresalen en los mapas corresponden a las localidades de: Tres Esquinas, Las Lagunas, Cochagual, Los Berros, Pederal y Cañada Honda.

- Áreas con bajo nivel de daños sísmicos (inferiores a 1%): en este nivel se localizan las áreas que presentan la mayor extensión territorial en cuanto a los daños sísmicos esperados para un terremoto con una intensidad de IX. Se agrupan las viviendas que están construidas mayormente de tipo A siendo las sismorresistentes y favoreciendo a sus habitantes ante un sismo. Las localidades que se localizan en estas

áreas comprenden: Media Agua, Colonia Fiscal, Punta del Médano, Cieneguita, Divisadero y Guanacache.

Esta delimitación areal, si bien se manifiesta en todas las variables estudiadas, representan diferentes extensiones. Tal es el caso, de la población herida que presenta la mayor extensión territorial, diferente a la distribución de la población fallecida que representa la menor extensión en el departamento.

Conclusiones

El presente trabajo se centró en la modelización predictiva de daños sísmicos en el departamento Sarmiento, San Juan, Argentina, con la aplicación de geoestadística. Esto fue posible porque el peligro sísmico afecta a todo el territorio, de aquí que hacer interpolaciones espaciales y realizar mapas de distribución de los daños tienen sentido porque las predicciones sobre todo en el área se manifiestan de forma continua.

Los modelos predictivos de daños sísmicos generados brindan cartografías con resultados fiables y concisos, delimitando áreas con niveles de daños que comprende la escala de HAZUS y que alcanzan hasta el 50% de probabilidad y otra área con bajo nivel de daños menores a 1%. Así también esta delimitación territorial se repite en todas las variables estudiadas de población fallecida, población herida, población sin viviendas y población atrapada bajo los escombros.

Los resultados obtenidos de los modelos predictivos de daños sísmicos para todas las VAR estimadas, marcan una coincidencia en la distribución territorial en el departamento Sarmiento. Destacándose, por un lado, las áreas con daños sísmicos menores en las localidades con mayores viviendas de tipo A como el caso de Media Agua o localidades con menor cantidad de habitantes como Guanacache, Cieneguita o Divisadero. Opuesto, se localizan las áreas con mayores probabilidades de daños compuestas mayormente de viviendas tipo C y más ocupación de habitantes como Tres Esquinas, Los Berros, Pederal. Asimismo, se observan diferencias en la extensión de la distribución territorial de las VAR, encontrado áreas con mayor extensión como es el caso de la población herida y lo contrario se manifiesta en las áreas que representa a la población fallecida.

La información que aportan los modelos predictivos de daños sísmicos son un recurso fundamental para brindar una ayuda eficaz, para la prevención y minoración del riesgo sísmico, la elaboración de planes de emergencia y para la toma de decisiones referentes a la ordenación del territorio.

Referencias

- CFCyC (2016). Atlas Socioeconómico de la provincia de San Juan. Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Armstrong, M., & Roth, C. (1997). Notas del curso Geoestadística. Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.

- Braga, F., Dolce, M., & Liberatore, D. (1982). A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale, 7th. *European Conference on Earthquake Engineering*. Atenas, Grecia.
- Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- DGyCSJ, Dirección de Geodesia y Catastro de la Provincia de San Juan. (2019). Base de datos de edificaciones del Departamento Sarmiento [Archivo shapefile no publicado]. Gobierno de San Juan.
- FEMA/NIBS (1999), Federal Emergency Management Agency. HAZUS technical manual. Washington D. C.
- INDEC (2022) Instituto Nacional de Estadísticas y Censo. Servicios estadísticos: Datos de población. Recuperado de <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-165>
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P. & The Risk-UE Team (2004). The european Risk-Ue Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 3329.
- Masure, P. & Lutoff, C., 2006, Urban system exposure to natural disasters: an integrated approach, in Oliveira C.S, Roca A., Goula X, "Assessing and managing earthquake risk. Geoscientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques", Ed Springer, pp. 239-259.
- Márquez, E. (2018). Recopilado y compilado de la Geoestadística. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
- Matheron, G. (1970). *La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau (Fascicule 5). Ecole de Mines de Paris.
- Medvedev, S. V. (1978). *Seismic intensity scale MSK-76*. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Rashed, T., & Weeks, J. (2003) Metodología SIG para el análisis de la vulnerabilidad sísmica: Ciudad de Los Ángeles. *International Journal of Geographical Information Science* 17(6), 574-576.