

Análisis espacial de eventos de riesgo en el municipio de Medellín

Alejandro Ospina Urán

Prof. Edier Aristizábal

Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Se realizó un análisis geoespacial de los eventos de riesgo registrados en el municipio de Medellín desde el 2004 hasta el 2023. Los principales eventos de riesgo registrados corresponden a eventos estructurales y a movimientos en masa. Mediante técnicas de análisis geoespacial, se encontró que los eventos de riesgo se agrupan espacialmente en los barrios periféricos caracterizados como de bajos ingresos, donde la vulnerabilidad física y económica deriva en la evacuación de las viviendas expuestas. También se realizó un análisis de las condiciones de lluvia en las cuales se presentaron estos eventos, donde se encontró una correlación positiva entre la lluvia antecedente acumulada y la espacialidad de los eventos de movimientos en masa.

1. Introducción

El municipio de Medellín hace parte de la segunda área metropolitana más poblada de Colombia. El municipio se encuentra en la parte más ancha del Valle de Aburrá, donde principalmente desarrolló el área urbana, la cual, desde el último siglo, experimenta una rápida expansión hacia las laderas de mayor pendiente. Esta expansión, en general se dio de manera descontrolada, llegando a ocupar zonas susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa y con la edificación de estructuras con bajos estándares sismoresistentes (Serna Quintana, 2011; Hermelin, 2007; Fernández et al., 2019).

Las características sociales y geomorfológicas del municipio han resultado en la ocurrencia de múltiples desastres, especialmente asociados con movimientos en masa e inundaciones (Aristizábal & Gómez, 2007), por lo cual, las situaciones de riesgo asociadas a estas amenazas son comunes en la actualidad. Otro escenario de riesgo común en el municipio de Medellín está asociado a los eventos estructurales, siendo el más común el colapso parcial o total de edificaciones residenciales provocado por el deterioro estructural, mala calidad de los materiales, regulares técnicas de construcción, deformaciones en el sistema de fundación, etc. Estas situaciones o eventos de riesgo son atendidas por la Alcaldía de Medellín, a través de su sistema de emergencias, el cual registra los eventos a solicitud de la comunidad o del cuerpo de bomberos.

El sistema de emergencias cuenta con una base de datos donde registra el tipo de evento, la prioridad en la atención (baja, media, alta o emergencia), la dirección domiciliaria o de referencia, el barrio y las evacuaciones recomendadas por un profesional que inspecciona el escenario. Se busca realizar un análisis geoespacial con el fin de identificar los patrones espaciales y temporales de los eventos de riesgo y la relación de estos con otras variables topográficas, sociales y ambientales. Esta información podría ser útil para el sistema de emergencia, con el fin de plantear políticas y estrategias que reduzcan la ocurrencia de situaciones de riesgo en el municipio de Medellín.

2. Datos

La base de datos cuenta con el registro de 74900 eventos de riesgo, de los cuales el 90 % se caracterizaron como movimientos en masa y eventos estructurales, la mayoría de los datos se encuentran en la zona urbana (Figura 1). Se agruparon los eventos por mes y por año, en la Figura 2 se identificó un patrón bimodal igual al régimen de lluvias del municipio de Medellín. De igual manera, en la Figura 3 se observa un comportamiento similar, en donde se registraron más eventos en los años de mayores lluvias; adicionalmente, se observa que los años de mayores eventos registrados fueron entre 2008 y 2011.

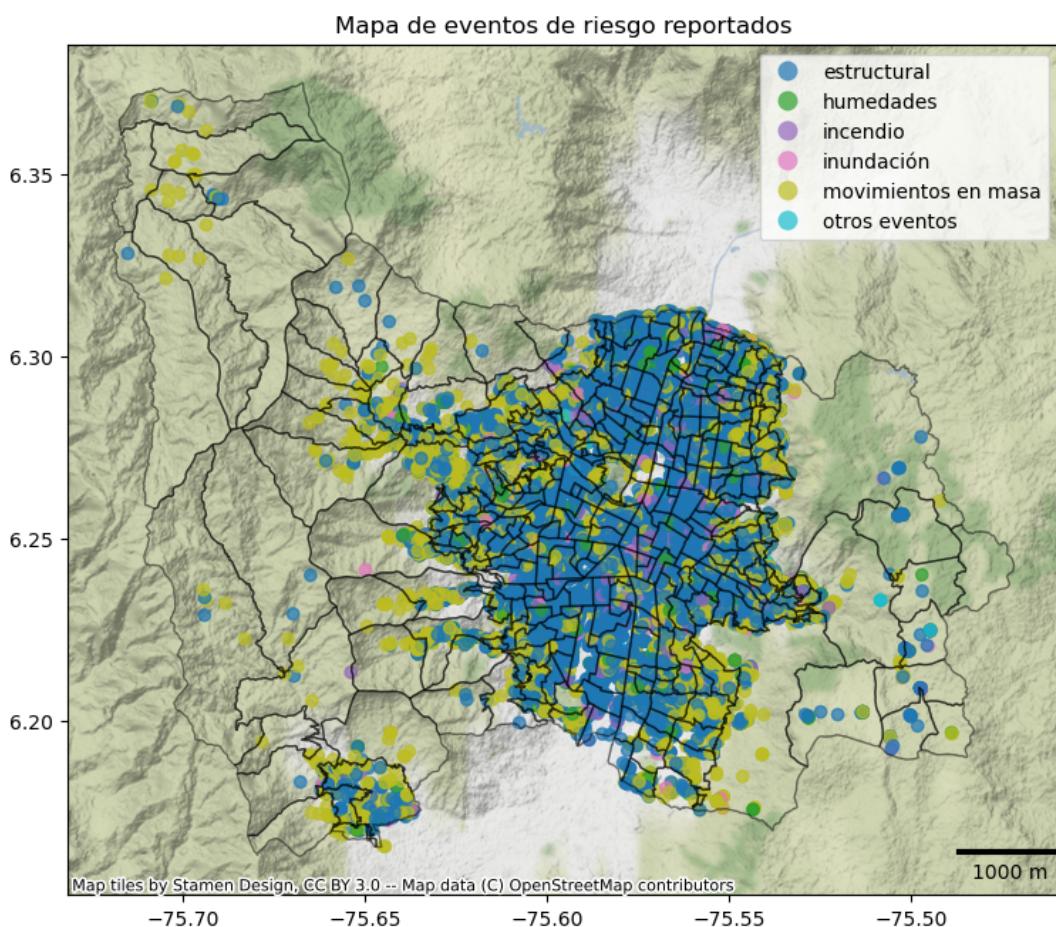


Figura 1: Eventos de riesgo registrados en el municipio de Medellín. La geocodificación se realizó en la plataforma catastral de la Alcaldía de Medellín, este es el proceso en el cual se le asignan coordenadas norte-este a un dato de entrada como un lugar o una dirección domiciliaria.

A simple vista, no se observan patrones espaciales en la Figura 1 más allá de la concentración en la zona urbana, lo que indicaría que los eventos tienen una espacialidad aleatoria o dispersa; sin embargo, no es así. Para realizar análisis de estos datos, se requiere aplicar técnicas de análisis geoespacial y geovisualización, además del uso de herramientas y software especializados en el manejo de datos geoespaciales. Para este análisis se utilizaron diversas librerías de *Python* especializadas en análisis geoespacial y la plataforma *Google Earth Engine*, además, se utilizaron recursos externos como modelos de elevación digital, mapa de pendientes, drenajes, estratos socioeconómicos; con el fin de entender la espacialidad de los eventos de riesgo.

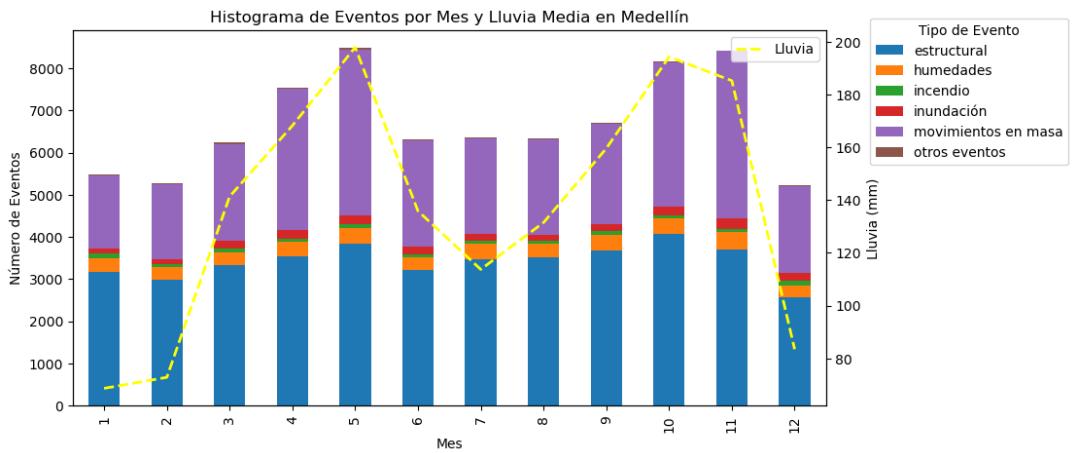


Figura 2: Eventos de riesgo registrados en el municipio de Medellín (conteo mensual).

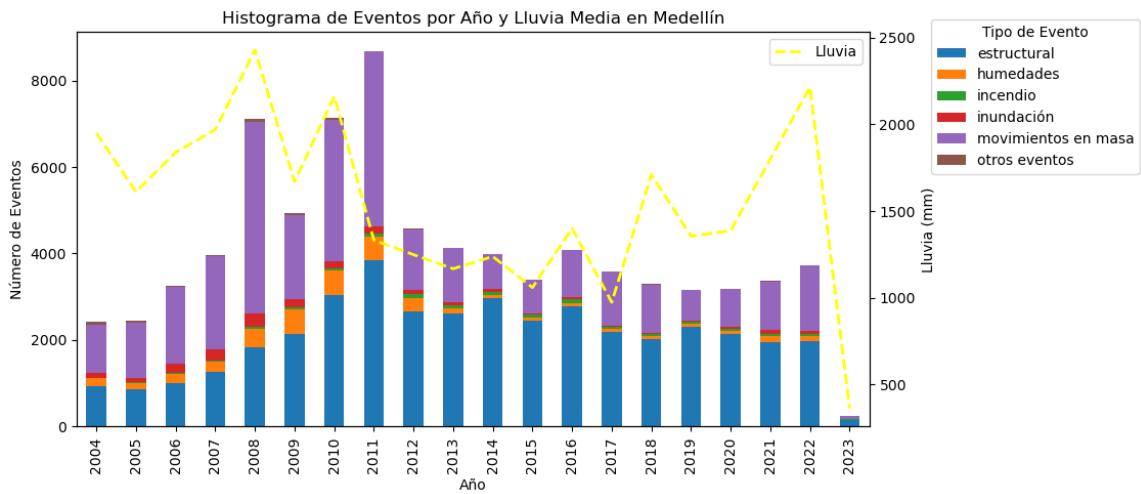


Figura 3: Eventos de riesgo registrados por año en el municipio de Medellín.

go.

3. Metodología

Este análisis consta de dos componentes principales. En el primero, se busca comprender la distribución espacial de los eventos de riesgo y explorar las posibles variables independientes asociadas a ellos. Se comienza identificando las áreas donde ocurren los eventos de riesgo y luego se analizan diversas variables que podrían explicar esta distribución espacial.

En el segundo componente, se examina la relación entre los eventos de riesgo y la variable espacio-temporal de lluvia. Se busca determinar si existe una asociación entre los eventos de riesgo y los patrones de precipitación, considerando tanto la dimensión espacial como la temporal de la lluvia. Con estos dos enfoques combinados, se pretende obtener una comprensión más completa de los eventos de riesgo y sus posibles

factores desencadenantes, incluyendo tanto aspectos espaciales como temporales.

3.1. Geovisualización

Una de las técnicas más comunes en la geovisualización de puntos son los mapas de cloropletas (*choropleth*), los cuales asocian un polígono irregular a una variable, en este caso, el número de eventos de registrados en un barrio de Medellín. La Figura 4 corresponde al mapa de número de eventos de movimientos en masa por barrio, en este mapa se observa que los barrios que presentan mayor cantidad de eventos se encuentran en la parte alta de la ladera nororiental y en la ladera occidental (los barrios corresponden a los polígonos pequeños, los polígonos de mayor tamaño son veredas de la zona rural). La Figura 5 corresponde al mapa de número de eventos estructurales por barrio, donde se observa que los barrios con más eventos se encuentran al norte de Medellín.

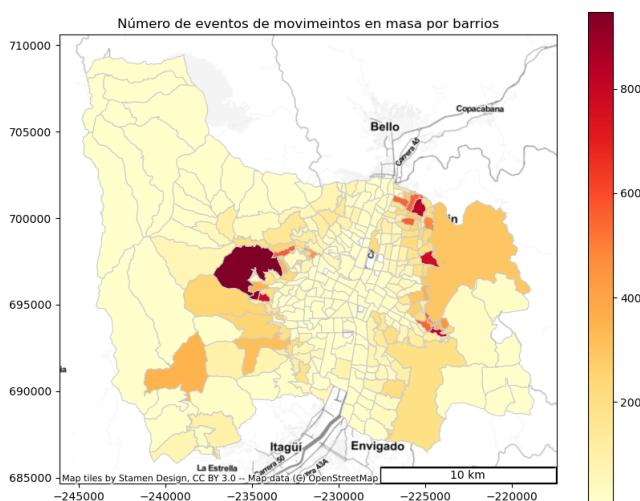


Figura 4: Mapa cloroplético de movimientos en masa en el municipio de Medellín.

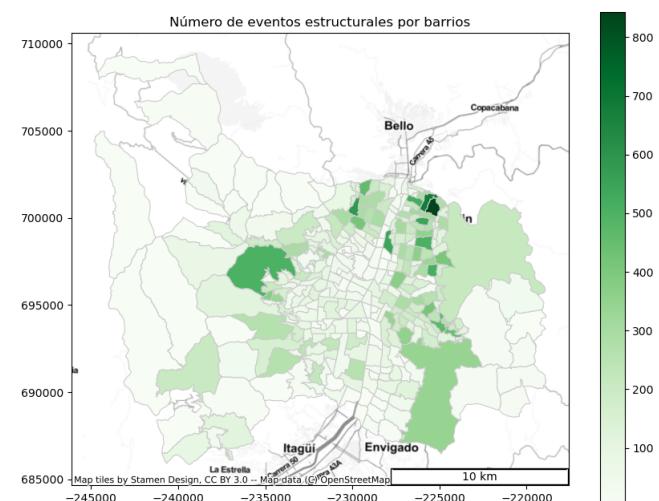


Figura 5: Mapa cloroplético de eventos estructurales en el municipio de Medellín.

Los mapas de coropletas pueden ser sumamente útiles en la identificación de áreas en las cuales se concentra un alto número de eventos. No obstante, es importante tener en cuenta que los polígonos que representan los barrios en estos mapas poseen límites arbitrarios. Esto podría resultar en que algunas zonas con una densidad de eventos muy baja queden incluidas dentro de un polígono extenso, lo que a su vez podría crear una representación errónea, dando la impresión de que dicha área tiene una gran cantidad de eventos.

Para abordar esta problemática, se puede emplear una técnica conocida como “Densidad de Kernel”, la cual utiliza una densidad de puntos que varía de manera dinámica en un área determinada, permitiendo así una mejor representación de la ubicación de los eventos. Las Figuras 6 y 7 representan la densidad de kernel para los eventos de movimientos en masa y eventos estructurales respectivamente. Se observa una mejor representación de las zonas donde se concentran los eventos reportados.

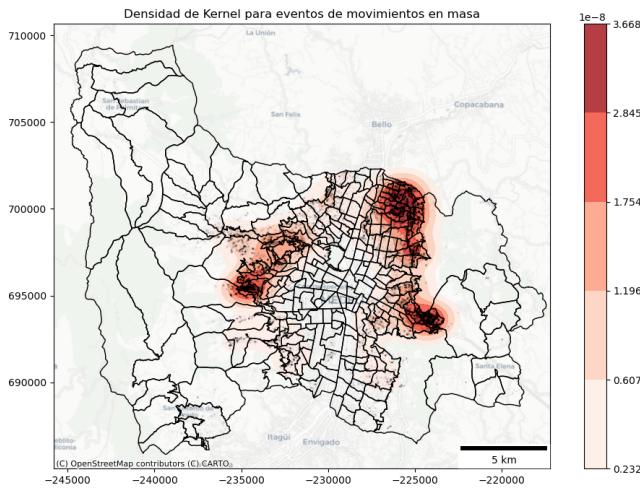


Figura 6: Densidad de Kernel de eventos de movimientos en masa en el municipio de Medellín.

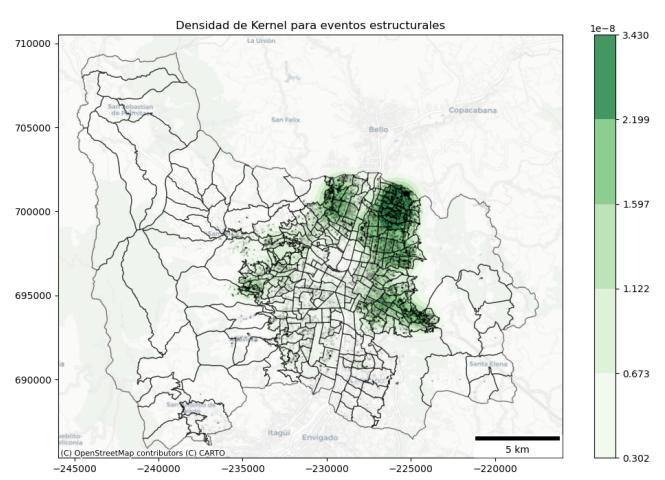


Figura 7: Densidad de Kernel de eventos estructurales en el municipio de Medellín.

3.2. Clustering o agrupamiento

Son técnicas de aprendizaje de máquinas que buscan identificar agrupamientos en los datos basados en sus similitudes y diferencias. En este análisis se usó el método “Clustering espacial basado en la densidad de aplicaciones con ruido” o DBSCAN por sus siglas en inglés. Este método agrupa una cantidad mínima de puntos que se encuentren en una determinada área, agrupando todos los datos que comparten esa misma mínima densidad. La Figura 8 muestra los 8 clústeres de eventos de movimiento en masa que se agruparon con los parámetros 10 puntos en 500 m a la redonda. Los clústeres resultantes se encuentran en los barrios periféricos de la ladera nororiental y occidental. La Figura 9 muestra los 12 clústeres de eventos estructurales que se agruparon con los mismos parámetros, destaca el agrupamiento en barrios centrales (parte baja del valle), además de los barrios del norte de Medellín.

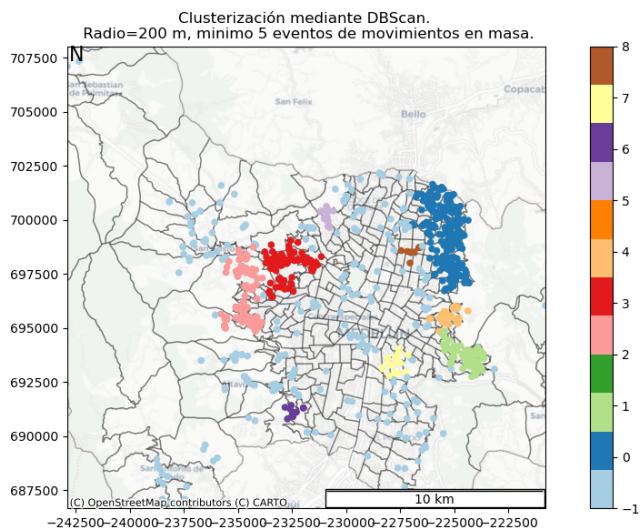


Figura 8: Clustering DBSCAN de eventos de movimientos en masa en el municipio de Medellín.

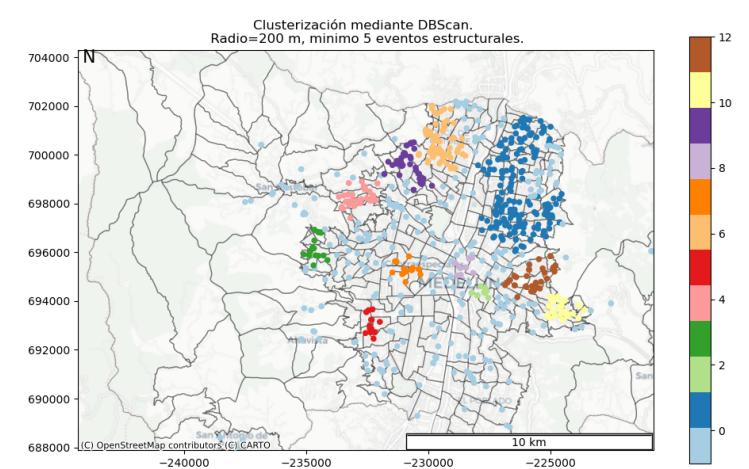


Figura 9: Clustering DBSCAN de eventos estructurales en el municipio de Medellín.

Con este análisis de clúster se encontró agrupamiento de eventos en zonas de alta pendiente y cercanas a quebradas, por tal razón, se buscaron variables que pudieran explicar la ubicación de los eventos. A través de *Google Earth Engine*, se asignó a cada punto la elevación sobre el nivel del mar, la pendiente, la altura sobre el drenaje más cercano (HAND); además, se calculó la distancia al drenaje más cercano y se asoció el estrato socioeconómico del lugar del evento, el cual puede interpretarse como un indicador de la vulnerabilidad económica y física, pues las edificaciones en zonas de bajos estratos socioeconómicos tienden a ser menos sismorresistentes ante la falta de control en la construcción.

Teniendo estas variables, se aplicó un método de clasificación no supervisada conocido como *K-Means*, el cual agrupa los datos en un número de valores que puede ser asignado por la metodología del “codo”. El “codo” indica el número óptimo de clústeres (k) relacionando la varianza dentro del clúster contra el número K de clúster. En el caso de estudio, se agruparon los datos en 5 clústeres para eventos estructurales y de movimientos en masa (ver Figuras 10 y 11 respectivamente).

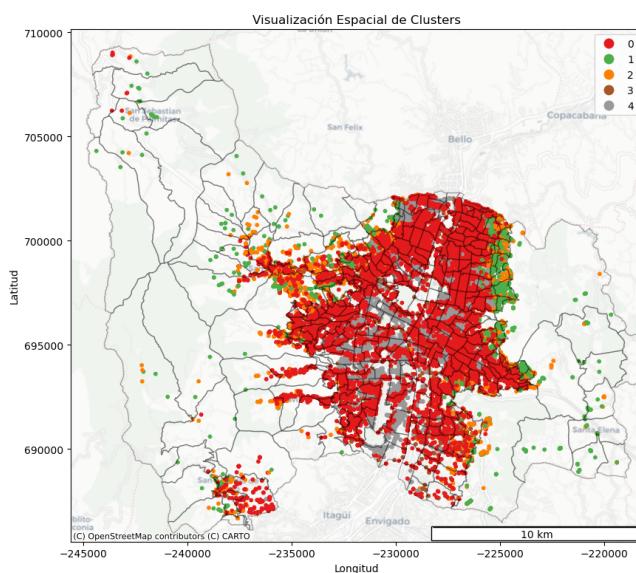


Figura 10: Clustering K-means de eventos de movimientos en masa en el municipio de Medellín.

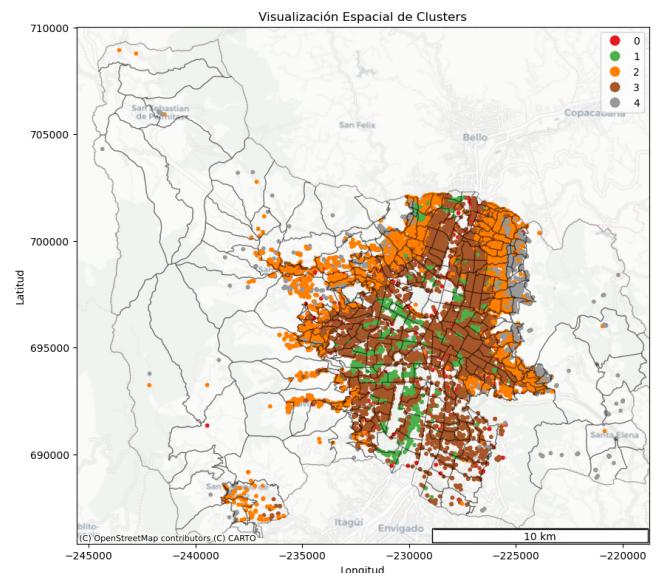


Figura 11: Clustering K-means de eventos estructurales en el municipio de Medellín.

Otro interés que se tiene es conocer la relación con las variables, para esto se realizó un análisis de Regresión geográfica ponderada o GWR (*Geographically Weighted Regression*), tomando como variables la altura sobre el drenaje más cercano (HAND), elevación, pendiente, distancia a drenaje más cercano, estrato socioeconómico y como variable dependiente la ocurrencia de evacuaciones asociadas a los eventos de riesgo. Se encontró que el R^2 es muy bajo para eventos por movimiento en masa (Tabla 1) y eventos estructurales (Tabla 2), lo cual indica que esas variables no se ajustan bien al modelo; sin embargo, se observa un aumento en el R^2 espacial (resultado del GWR), por lo cual la variación espacial explica mejor el modelo. También se encuentra que para eventos por movimientos en masa, las evacuaciones se relacionan a las variables significativas ($P\text{-value}>0.05$) pendiente y estrato socioeconómico, mientras que para eventos estructurales, las evacuaciones se relacionan con la elevación y el estrato socioeconómico.

El resultado de estos análisis muestra la variación espacial de los coeficientes que representan la regresión

Cuadro 1: Resultados GWR para eventos de movimiento en masa con evacuaciones

Variable	R ²	p-value
R ² Global (sin GWR)	0.084	N/A
R ² (GWR Result)	0.107	N/A
1. HAND	N/A	0.612
2. Elevación	N/A	0.381
3. Pendiente	N/A	0.000
4. Distancia a drenaje	N/A	0.379
5. Estrato socioeconómico	N/A	0.000

Cuadro 2: Resultados GWR para eventos estructurales con evacuaciones

Variable	R ²	p-value
R ² Global	0.115	N/A
R ² (GWR Result)	0.177	N/A
1. HAND	N/A	0.226
2. Elevación	N/A	0.010
3. Pendiente	N/A	0.235
4. Distancia a drenaje	N/A	0.194
5. Estrato socioeconómico	N/A	0.000

lineal (Figuras 12 y 13)

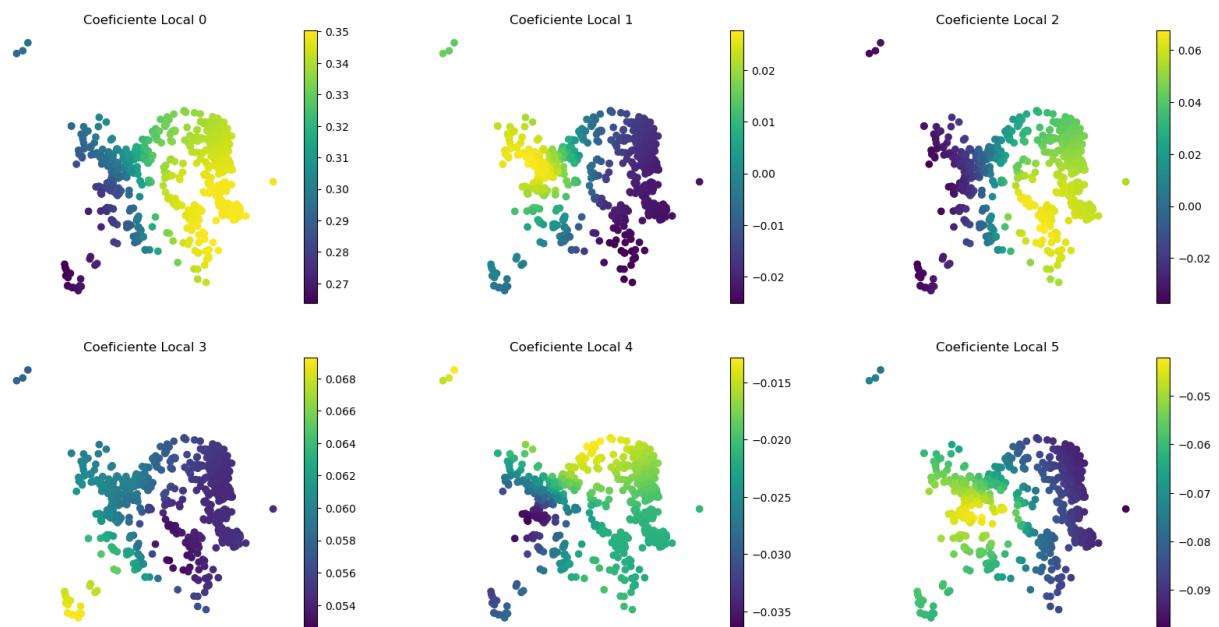


Figura 12: Variación espacial de coeficientes según el modelo GWR para movimientos en masa con evacuación. Los coeficientes corresponden a las variables: 1. La altura sobre el drenaje más cercano (HAND). 2. Elevación. 3. Pendiente. 4. Distancia a drenaje más cercano. 5. Estrato socioeconómico

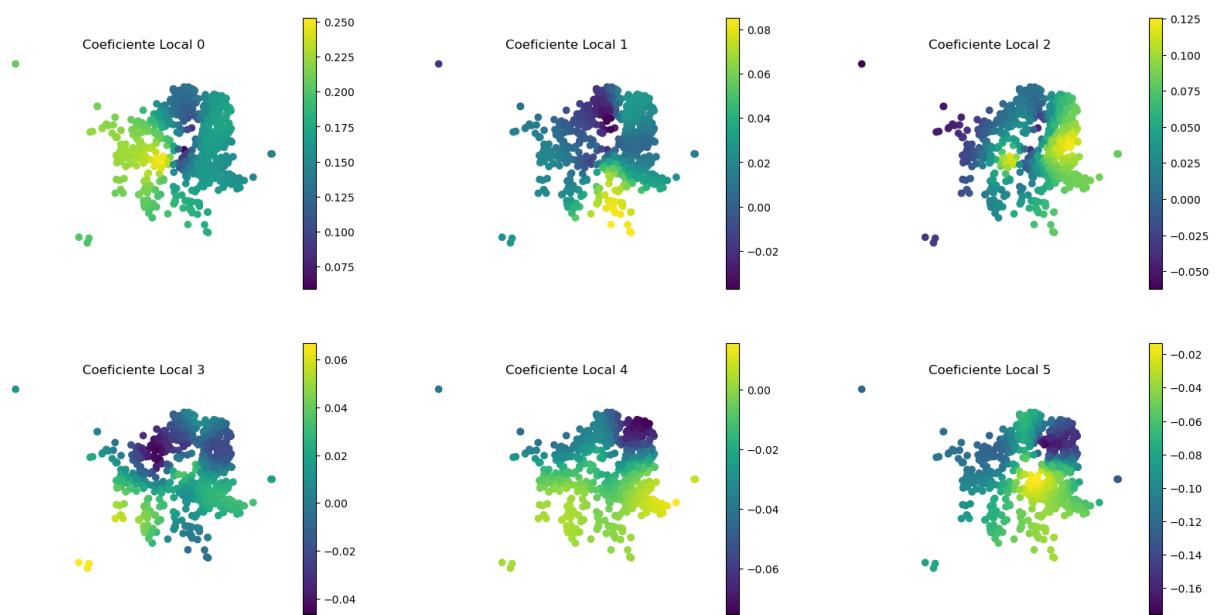


Figura 13: Variación espacial de coeficientes según el modelo GWR para eventos estructurales con evacuación. Los coeficientes corresponden a las variables: 1. La altura sobre el drenaje más cercano (HAND). 2. Elevación. 3. Pendiente. 4. Distancia a drenaje más cercano. 5. Estrato socioeconómico

3.3. Lluvia

En el análisis de eventos de riesgo en el municipio de Medellín, una variable que requiere atención es la lluvia. Esta variable es de naturaleza espacio-temporal, dado que se ha observado una aparente correlación entre los eventos de movimientos en masa y las temporadas de lluvias en el Valle de Aburrá. De hecho, las precipitaciones son consideradas uno de los principales factores desencadenantes de estos movimientos en masa (Aristizábal et al., 2011). Parte de este análisis también busca determinar si existe una relación espacial entre las lluvias y los eventos estructurales. Como primer paso, cada evento de riesgo fue asociado con los datos del pluviómetro más cercano, utilizando registros de las redes de EPM y SIATA (14).

Se calcularon acumulados diarios y de lluvia antecedente de 3, 7, 15 y 30 días previos a la fecha del registro. Se realizaron gráficos de distribución de kernel para comparar las condiciones de lluvia para eventos estructurales y movimientos en masa. En estos gráficos se encontró una tendencia en la que los movimientos en masa ocurren en mayores acumulados de lluvia antecedente; sin embargo, gran parte de la curva de densidad se traslape con la zona donde ocurren eventos estructurales (ver Figura 15).

Para evaluar el intervalo de lluvia antecedente que mejor explica la relación, se realizó un análisis de regresión logística, en el cual se tomaron como positivos los eventos donde ocurrieron movimientos en masa (1) y negativos los eventos donde ocurrieron eventos estructurales (0). Se analizaron acumulados diarios y los acumulados de lluvia antecedente de 3, 7, 15 y 30 días. Este ensayo debe examinarse con cuidado, pues las variables son colineales o dependientes entre ellas; por lo cual, este análisis solo tiene como objetivo seleccionar un intervalo, que para este caso es el acumulado de 3 días antecedentes, ya que tiene el mayor coeficiente y la mayor significancia (menor P-value).

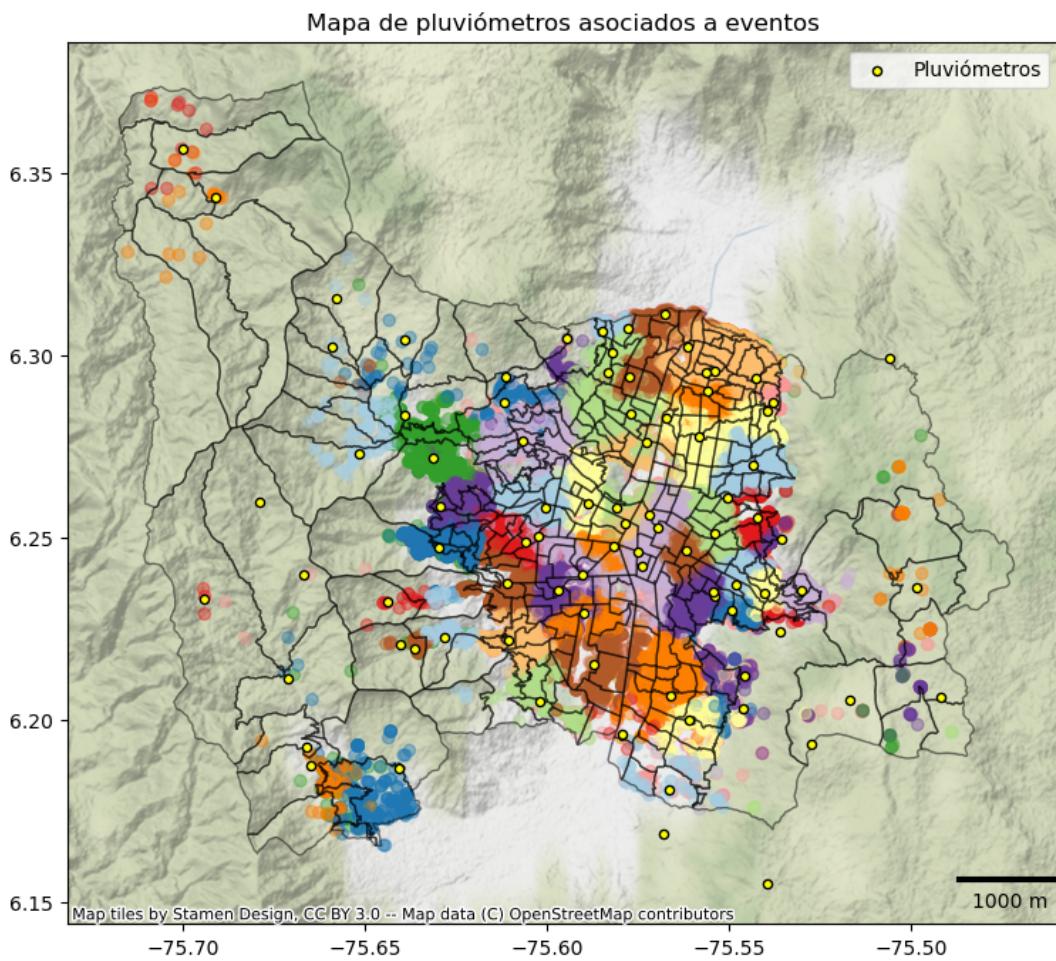


Figura 14: Reportes de eventos de riesgo asociado al pluviómetro más cercano.

Cuadro 3: Resultados del modelo de regresión logística

Variable	Coeficiente	P-valor
Acum_diario	-0.0058	0.232
Acum_3dias	0.0101	0.015
Acum_7dias	0.0007	0.824
Acum_15dias	0.0047	0.020
Acum_30dias	0.0019	0.057

Se evaluó mediante el índice de Moran si hay una autocorrelación espacial de cada evento con la lluvia de 3 días antecedentes acumulados, encontrando una débil autocorrelación positiva con los eventos de movimientos en masa (Índice de Moran = 0.06), lo que quiere decir que si un evento se registró con valor alto de 3 días de lluvia antecedente acumulada, el promedio de sus vecinos ($k=10$ vecinos más cercanos) es también alto (Figura 16). Contrario al comportamiento con movimientos en masa, los eventos estructurales no tienen una autocorrelación espacial (Índice de Moran = 0.00), como se observa en la Figura 17.

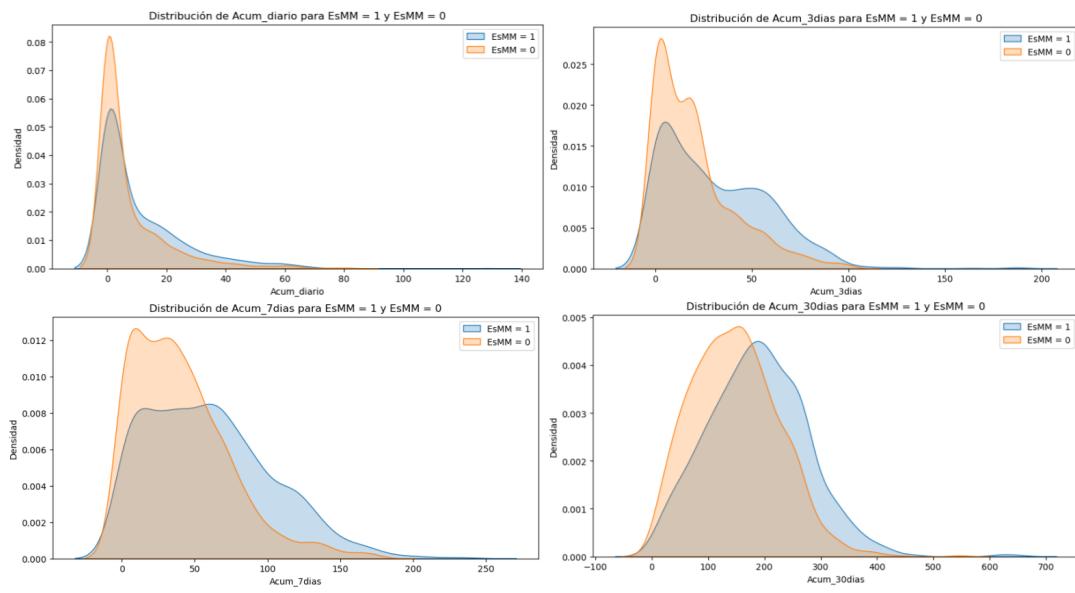


Figura 15: Distribución de densidad de Kernel para la lluvia diaria y antecedente acumulado de 3, 7 y 30 días. Línea azul indica eventos de movimientos en masa, línea naranja indica eventos estructurales.

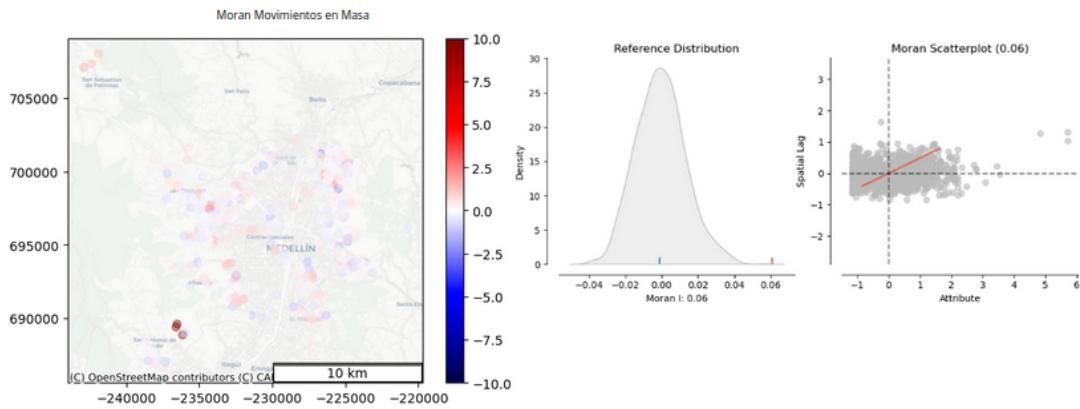


Figura 16: Gráficas de distribución de Moran e Índice de Moran para acumulados de 3 días antecedentes en eventos de movimientos en masa.

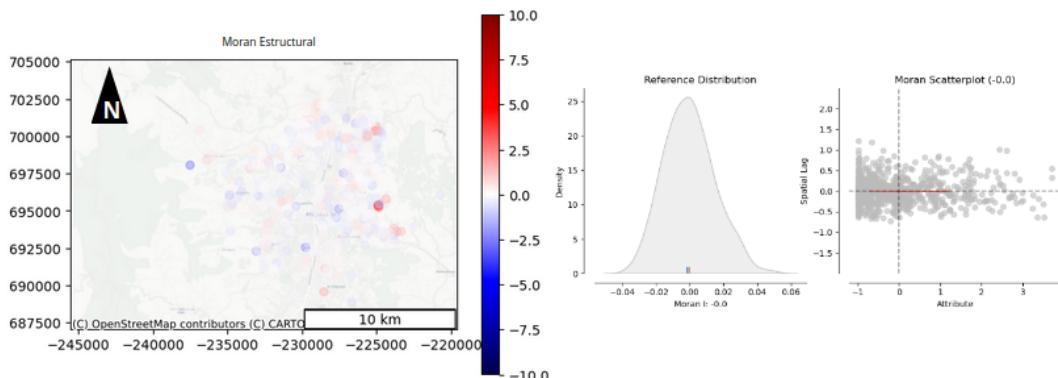


Figura 17: Gráficas de distribución de Moran e Índice de Moran para acumulados de 3 días antecedentes en eventos estructurales.

4. Discusión

En los mapas de cloropletas y de densidad de Kernel (Figuras 4, 6), se identificó que los eventos por movimientos en masa se agrupan en tres zonas; la ladera nororiental, la parte central de la ladera oriental y la parte central de la ladera occidental. Estos mismos resultados se identificaron en el análisis de clúster DBSCAN (Figura 8). El análisis de clasificación no supervisado de clúster con el método K-Means no identificó los clústeres espaciales con las variables suministradas (HAND, elevación, pendiente, distancia a drenajes y estrato socioeconómico); probablemente, este análisis sesgó su clasificación a la altura, pendiente y HAND (Figura 10), esto debido a la colinealidad, ya que todos estos insumos parten del mismo producto: un modelo de elevación digital DEM.

La colinealidad de las variables posiblemente influya también en la baja explicación de las variables en el modelo GWR; sin embargo, las variables que mejor se ajustan al modelo son la pendiente y el estrato socioeconómico; la primera es considerada un factor condicionante crucial en la ocurrencia de movimientos en masa, mientras que el estrato socioeconómico podría ser un índice de la vulnerabilidad física y económica ante un evento de riesgo por movimiento en masa, siendo más probable que se reporten eventos de riesgo con evacuaciones en esas zonas (ver Figura 18).

Por otro lado, los eventos estructurales tienden a agruparse en la zona norte del municipio de Medellín (Figuras 5, 7 y 8). El análisis de la clasificación no supervisada tiene las mismas limitaciones enunciadas para los eventos de movimientos en masa. El análisis de GWR indicó que las variables que mejor se ajustan al modelo son la elevación y el estrato socioeconómico, esta última podría asociarse a las situaciones de riesgo asociadas a una alta vulnerabilidad física y económica. Sin embargo, no es claro cómo la elevación se relaciona con los eventos de riesgo que derivan en evacuaciones. Se tiene la hipótesis de que está relacionado con la antigüedad de las edificaciones, ya que los barrios ubicados en la parte baja del valle fueron los primeros en desarrollarse según Serna Quintana (2011) (ver Figura 19).

Tras el análisis de autocorrelación espacial mediante el Índice de Morán, se observa una correlación espacial tenue entre la acumulación de lluvia antecedente y la ocurrencia de movimientos en masa. Esta leve correlación podría atribuirse a imprecisiones en las fechas de registro de los eventos. No obstante, para un mejor entendimiento de la relación entre lluvias y eventos de riesgo en el municipio de Medellín, se

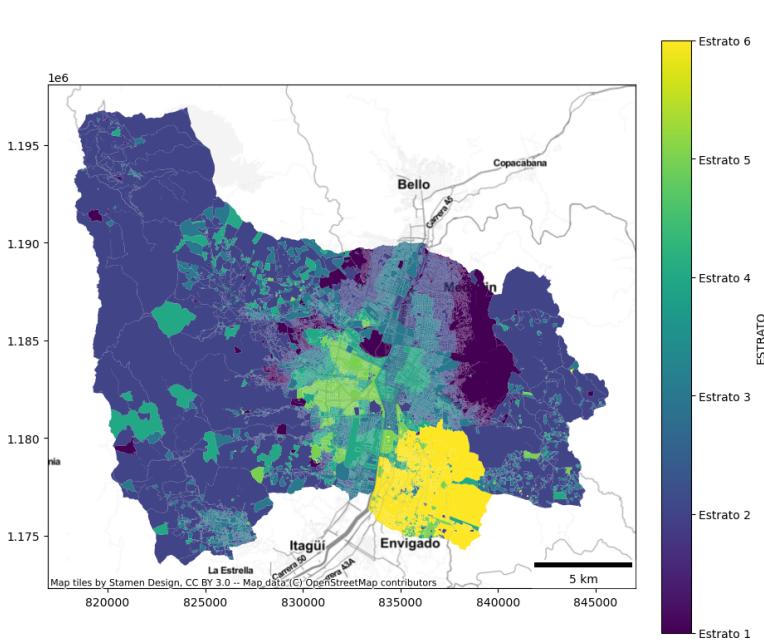


Figura 18: Estratos en el municipio de Medellín.

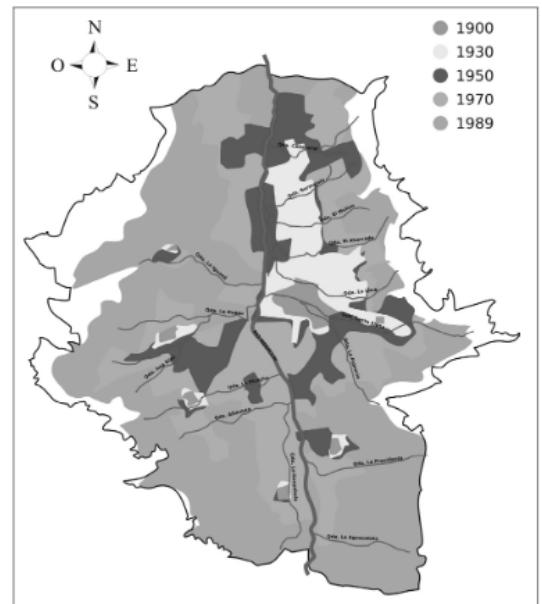


Figura 19: Expansión urbana en el municipio de Medellín. Figura tomada de (Serna Quintana, 2011)

recomienda examinar otras variables vinculadas a la precipitación, tales como la intensidad y duración de los eventos de lluvia, así como el comportamiento hidrogeológico de las laderas. En la Figura 2 se encuentra un tenue comportamiento bimodal en la ocurrencia de eventos estructurales, según el análisis de autocorrelación con el Índice de Moran, estos eventos no tienen una correlación espacio-temporal con las precipitaciones.

5. Conclusiones

Las técnicas y herramientas de análisis geoespacial usadas en este análisis fueron de gran utilidad para lograr un adecuado entendimiento de la espacialidad de los eventos de riesgo en el municipio de Medellín. Se logró identificar patrones espaciales de los eventos de riesgo e identificar posibles variables que influyen en la ocurrencia de estos.

Se encontró que el componente de vulnerabilidad física y económica, asociadas a las características de las edificaciones residenciales, puede ser más importantes que la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de eventos de riesgo.

Se requiere evaluar otras técnicas y variables para realizar los análisis de regresión logística y lineal usados, pues en este análisis se usaron variables colineales, lo cual implica gran incertidumbre en los modelos.

Referencias

- Aristizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el valle de aburrá. originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007. *Gestión y ambiente*, 10(2), 17–30.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de aburrá, colombia. *Revista EIA*, (15), 95–111.
- Fernández, R., Gonzalez, R., Garcia, A., & Yamin, L. (2019). Funciones de vulnerabilidad sísmica para mam- postería no reforzada.
- Hermelin, M. (2007). Valle de aburrá:¿ quo vadis? *Gestión y ambiente*, 10(2), 07–16.
- Serna Quintana, C. A. (2011). La naturaleza social de los desastres asociados a inundaciones y deslizamientos en medellín (1930-1990). *Historia crítica*, (43), 198–223.