

Modelo SLX para predicción de inundaciones basado en sistema de alerta temprana SIATA en cuenca del río Aburrá.

Mateo López Mogollón^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. matlopezmog@unal.edu.co

Abstract

Flood prediction has become increasingly essential in recent years, especially in urban areas due to changes in land cover. Medellín has experienced several recent flood events, particularly in areas along channel corridors that discharge into the Aburrá River. The city has already implemented a system that monitors rising stage heights in some tributaries. This data can be used to identify areas vulnerable to flooding. The proposed model aims to simulate flood scenarios to map risk zones, incorporating predictive variables that help explain increases in surface water levels and enhance the performance of the existing system.

Keywords: Spatial regression, Flood, Model, Imperviouness.

Resumen

La predicción de inundaciones se ha vuelto cada vez más esencial en los últimos años, especialmente en zonas urbanas debido a los cambios en la cobertura del suelo. Medellín ha experimentado varios eventos recientes de inundación, particularmente en áreas a lo largo de los corredores de canales que desembocan en el río Aburrá. La ciudad ya ha implementado un sistema que monitorea el aumento del nivel superficial del agua (altura del nivel del agua) en algunos afluentes. Estos datos pueden aprovecharse para identificar zonas vulnerables a inundaciones. El modelo propuesto busca simular escenarios de inundación para mapear zonas de riesgo, incorporando variables predictivas que ayuden a explicar los incrementos en los niveles de agua superficial y a mejorar el desempeño del sistema existente.

Palabras clave: Regresión espacial, Inundación, Modelo, Impermeabilidad.

1. Introducción

La urbanización acelerada conlleva la sustitución de la vegetación natural, el suelo y las superficies de cuerpos de agua por estructuras impermeables como edificios y áreas de transporte, lo que altera significativamente el patrón natural del paisaje (Antrop, 2004; Wang et al., 2014; Wang et al., 2018; Grimm et al., 2008; Li et al., 2022). La urbanización ha transformado el paisaje natural, reemplazando las áreas verdes por concreto, asfalto y otras superficies impermeables. El desarrollo de vías, edificaciones residenciales y comerciales altera el coeficiente de escorrentía de la cuenca e influye en el proceso de conducción del flujo, lo que a su vez incrementa el caudal pico de aguas lluvias y la vulnerabilidad ante inundaciones (Suriya & Mudgal, 2012).

En lo que respecta al riesgo de inundación, esto significa que la situación actual de riesgo (ya sea cuantificable o no) es siempre producto de acciones o decisiones humanas, como por ejemplo establecerse en una llanura de inundación (o no), construir medidas de protección (o no), etc. Estos aspectos deben tenerse en cuenta al evaluar los riesgos. No obstante, utilizamos la fórmula del riesgo en lo que sigue, ya que

creemos que incluso una estimación incierta de una medida de riesgo puede ser una base valiosa de información para nuevas decisiones humanas (Meyer et al., 2008).

Con base en lo anterior cobra relevancia apoyarse en el sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) como red base para el registro y análisis de información de variables hidrometeorológicas e hidrológicas.

En este estudio se tiene como objetivo presentar las potenciales zonas de inundación a partir de un criterio de aumento en nivel de agua registrado por estaciones de medición SIATA en tierra. A partir del uso de modelos de regresión espacial y la incidencia de variables explicativas que representen el fenómeno de crecientes durante eventos extremos para el Valle de Aburra.

2. Área de estudio y datos

La zona de análisis corresponde a la cuenca hidrográfica del río Aburra, desde su nacimiento en el alto de San Miguel, municipio de Caldas hasta llegar a Barbosa, área delimitada políticamente por el Valle de Aburrá, tiene una extensión de

1152 km² y abarca a los municipios de Caldas, Sabaneta, Envigado, La Estrella, Itagüí, Medellín, Bello, Girardota, Copacabana y Barbosa.

Dentro de la cuenca del río Aburrá, se pueden discretizar mas de 270 microcuencas correspondientes a los tributarios que desemboca sobre el río, y se encuentran distribuidos sobre todo el Valle. En algunos puntos específicos de los tramos de corriente se encuentran estaciones con sensores en tierra que miden variables hidrometeorológicas, en particular para los cauces, el nivel del agua con resoluciones variables según el sensor.

Es a partir de esta información que se determinaron los puntos de análisis representativos para la red de drenaje, y que presentan registros de inundación con base en métricas definidas en el SIATA. Estos umbrales se definen con base en la geometría hidráulica de las secciones transversales y una cota de referencia máxima permisible para catalogar los eventos como una amenaza para la población en la zona. En la red del SIATA se encuentran 118 corrientes instrumentadas incluyendo las que monitorean sectores del río Medellín en su corriente principal, de estas estaciones se analizaron los registros correspondientes al mes de abril del 2025, y se realizó un primer barrido en función de la calidad de información.

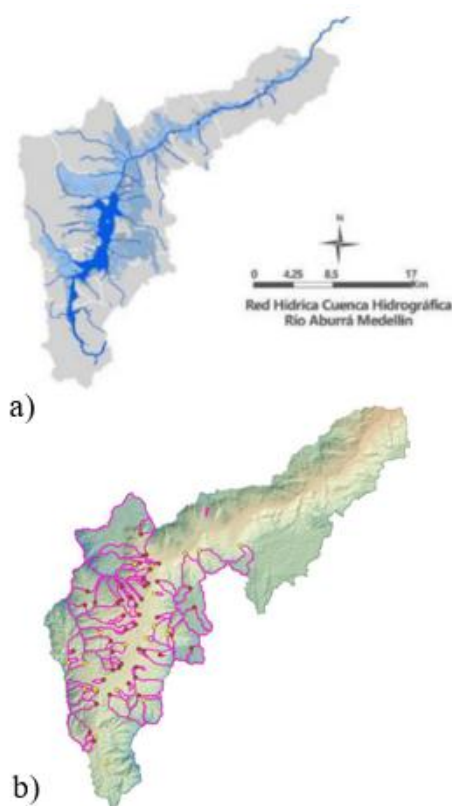


Figure 1. Cuenca río Aburrá (a), microcuencas de análisis (b)
Fuente: POMCA AMVA, 2015.

Después se analizó la ubicación espacial de cada estación respecto a la red de drenaje existente en cartografía oficial en

escala 1:25000 (IDEAM, 2018), como resultado se trabajó con 68 estaciones de las cuales se revisaron los eventos de aumento de nivel, y se determinó que había 20 estaciones las cuales registraron alertas de amenaza en la red. Estos reportes se catalogaron de forma binaria asignando una codificación de (0) si no se presentó nivel de inundación, y de (1) si se presentó nivel de inundación.

2.1. Variables explicativas

Para representar las variables explicativas del fenómeno físico de inundación a modelar, se emplearon mapas de precipitación media para el mes de abril, generado a partir de datos puntuales de estaciones de precipitación en tierra, y mediante interpolación IDW y Krigging. Para la variable de elevación en metros sobre el nivel del mar, se partió de información de satélite ALOS PALSAR, la cual cuenta con una resolución de píxel de 12.5 m, para la determinación de coberturas en AMVA se utilizó el mapa de coberturas del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) en escala 1:25000 del 2018 obtenido del portal Colombia en Mapas (fig. 2).

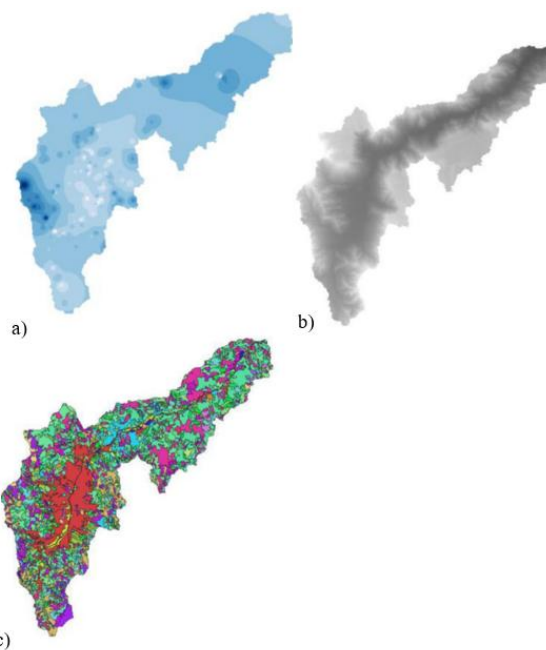


Figura 2. Mapa de precipitación [mm/mes] (a), mapa de elevación (b), mapa de coberturas de la tierra (c).
Fuente: IDEAM, Colombia en Mapas, ALOS PALSAR (2018).

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta otras variables explicativas como el área de cada microcuenca caracterizada (fig. 1) y su relación con el tipo de cobertura de suelo respecto al total, esta relación se expresó en porcentaje como el porcentaje de área impermeable total (total impervious area) ó TIA. También se tuvo en cuenta la densidad de drenaje y la longitud de cada tramo de corriente desde su nacimiento hasta el punto de ubicación de la estación de medida en tierra. Esto se realizó teniendo en cuenta la red de drenaje del AMVA en resolución 1:25000 de los productos cartográficos Colombia en Mapas (fig. 3)

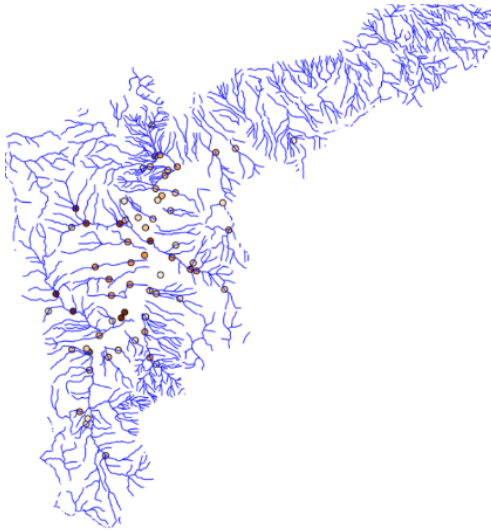


Figura 3. Red de drenaje sencillo AMVA y estaciones de nivel SIATA.
Fuente: Colombia en Mapas 2018, SIATA 2025.

A cada punto de estación se le asociaron variables descriptoras las cuales serán tratadas como independientes.

3. Metodología

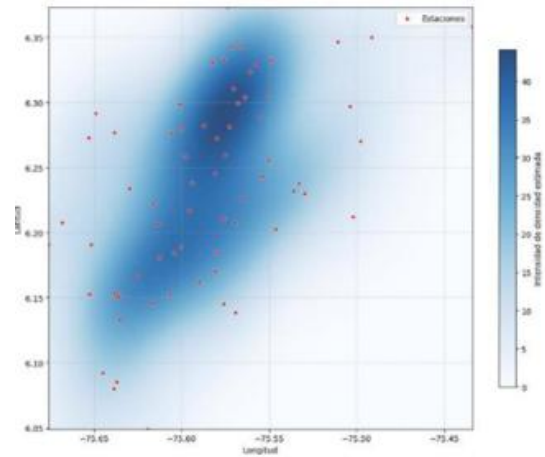
Los datos obtenidos anteriormente se agrupan en una matriz tipo data frame, y se le asignan coordenadas espaciales específicas para analizar dependencias y comportamientos de la información respecto a sí misma y su entorno espacial.

Para la aplicación del modelo de regresión espacial, se comenzó por determinar si los puntos base de la red seleccionados tienen un comportamiento de distribución espacial específico, si son de carácter aleatorio o se agrupan de alguna forma. Para tal fin se hace uso de las densidades de Kernel y los análisis con K de Ripley.

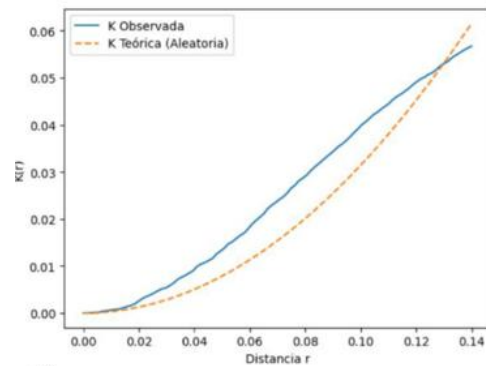
Posteriormente se aplica el modelo de regresión espacial con rezago en variables independientes, spatial lagged (SLX), definiendo primero una matriz de vecindad de la forma KNN para los datos como input, esta matriz es de carácter radial, y en particular se generó teniendo en cuenta los 6 vecinos más cercanos.

4. Resultados

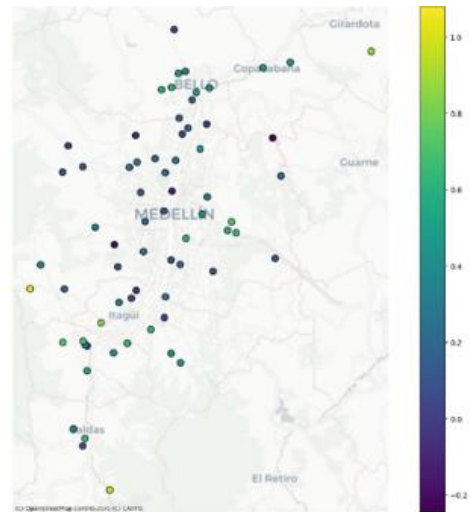
A continuación, se presentan los resultados obtenidos después de aplicar las metodologías propuestas para el modelo de predicción.



a)



b)



c)

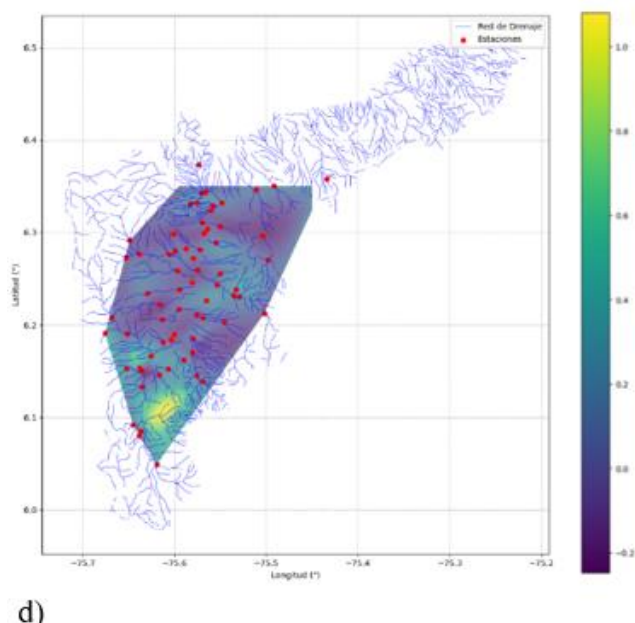


Figura 4. Densidad de Kernel (a), función K de Ripley (b), Mapa de predicción SLX (c), campo de predicción SLX (d).

5. Discusión y conclusiones

Con base en los resultados presentados en (fig. 4) se observa en particular que los datos exhiben una distribución concentrada en el centro del valle de Aburrá, y que la localización de las estaciones no tiene carácter aleatorio, lo cual tiene sentido ya que la red de monitoreo SIATA ubica sus estaciones de medición en puntos determinados con base en las necesidades de prevenir y controlar situaciones de riesgo en puntos críticos de la red de drenaje en la ciudad.

En cuanto al modelo de predicción, este presentó un ajuste con R^2 de 37%, lo cual representa que el modelo explica la probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación en los puntos evaluados el 37% de las veces, este valor si bien es alto, no es representativo en su totalidad de los fenómenos físicos modelados.

De las variables descriptoras seleccionadas para el modelo, aquellas que presentaron mayor significancia estadística ($p < 0.05$) corresponden en orden a la precipitación (PPT) la longitud de tramo (Ld) y la cota de elevación (COTA). La variable de zona impermeable (TIA) no reflejó significancia estadística para el modelo empleado. Esto puede deberse a la caracterización gruesa de las coberturas y aproximaciones realizadas para determinar zonas duras en la cuenca del AMVA.

Para los mapas de predicción presentados, se observa una distribución de probabilidad de ocurrencia focalizada en la zona sur, lo cual coincide con los reportes de eventos de inundación en la ciudad para el mes de abril de 2025 a través de medios locales, y presenta menos probabilidad de ocurrencia en las zonas norte del valle.

Se propone como continuación y trabajo futuro, describir de forma precisa y asistida las coberturas y tramos de canalización de corriente, además de emplear series de tiempo más amplias, para tener un espectro de información con mejor resolución, ya que los datos empleados corresponden al mes de abril del 2025.

También se recomienda corregir la ubicación cartográfica de drenajes para que conversen de forma adecuada con los puntos de estaciones en la red SIATA. De esta forma podrían utilizarse la totalidad de las 118 estaciones, mejorando la muestra de información

6. Referencias

- [1] Antrop M. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*. 2004;67(1–4):9–26.
- [2] Wang J, Liu Y, Qiu Y, Wang Y. Spatiotemporal variation of urban impervious surface and its driving forces in China. *Remote Sensing*. 2014;6(6):3241–3258.
- [3] Wang Y, Zhang X, Li X. Urban expansion and its impact on flood risk in the Pearl River Delta. *Natural Hazards*. 2018;93(1):131–147.
- [4] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, Redman CL, Wu J, Bai X, Briggs JM. Global change and the ecology of cities. *Science*. 2008;319(5864):756–760.
- [5] Li X, Zhou Y, Asrar GR, Imhoff M, Li X. The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. *Science of the Total Environment*. 2022;806:150902.
- [6] Suriya S, Mudgal BV. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed—A case study. *Journal of Hydrology*. 2012;412–413:210–219.
- [7] Meyer V, Scheuer S, Haase D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards*. 2008;48(1):17–39.
- [8] IDEAM. Mapa de coberturas de la tierra, escala 1:25.000. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018.
- [9] Colombia en Mapas. Plataforma de visualización geográfica del territorio colombiano [en línea]. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018 [consulta: julio de 2025]. Disponible en: <https://colombiaenmapas.gov.co/>
- [10] JAXA. ALOS PALSAR Digital Elevation Model (12.5 m resolution). Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2018. Disponible en: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>