

Análisis hidrológico de caudales máximos en la cuenca alta del río Medellín (Colombia) con condiciones estacionarias y no estacionarias

Peak flows hydrological analysis in the upper basin of the Medellín river (Colombia) with stationary and non-stationary conditions

Juan Guerrero-Gallego¹  Gabriel Rosado Cantillo¹  Luis F. Carvajal-Serna²  Lilian Posada García² 

¹Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos, Medellín

²Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Minas - Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.

Resumen

En la cuenca alta del río Medellín (Colombia) se realizó un estudio hidrológico con el fin de analizar las relaciones lluvia-escorrentía a escala de eventos en esta zona, para la estimación del régimen de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno en la cuenca del río y subcuencas tributarias, mediante modelación hidrológica considerando cambio climático. Este estudio está compuesto por la caracterización de la cuenca de la zona de estudio, así como la caracterización hidrológica, la cual abarca el análisis de datos medidos con alta resolución temporal de precipitación y niveles del río. Se tienen en cuenta también diferentes métodos para la obtención de la información necesaria para la correcta ejecución de actividades de modelación hidrológica semidistribuida, utilizando el software HEC-HMS. El modelo fue calibrado simulando 5 eventos máximos de caudal del año 2021, y luego ejecutado con distintas configuraciones de condición de humedad antecedente, modelos lluvia-escorrentía y la consideración de condiciones estacionarias y no estacionarias (en la precipitación), estas últimas con el fin de evaluar potenciales efectos debido al cambio climático. Según los resultados obtenidos, las diferencias relativas entre los caudales máximos obtenidos simulando las curvas IDF estacionarias y no estacionarias (estos últimos siendo usados como proxy para condiciones de cambio climático) no presentan diferencias significativas y oscilan entre 3-5%, obteniéndose las mayores magnitudes en los casos no estacionarios.

Abstract

In the upper basin of the Medellín River (Colombia) a hydrologic study was carried out to analyze the rainfall-runoff relationships in an event-scale, for the estimation of the maximum streamflow regime associated with different return periods in the basin and its tributary sub-basins, through hydrological modeling that considers the existence of climate change. This study is composed of the characterization of the basin of the study area, as well as the hydrological characterization, which includes the analysis of measured data with high temporal resolution of precipitation and the river levels. Different methods were considered to obtain the necessary information for the execution of a semi-distributed hydrological modeling activities, using the HEC-HMS. The model was calibrated by the simulation of 5 maximum streamflow events of the year 2021 and then it was run with different configurations of the antecedent moisture condition, rainfall-runoff models and stationary and non-stationary conditions (in rainfall), the latter to assess potential effects of the climate change. According to the results, the relative differences between the modeling cases with stationary and non-stationary conditions are, on average, negligible, with values between 3 and 5% in the considered cases, with the non-stationary cases having higher magnitudes of streamflow.

Palabras clave: caudales máximos, Modelación hidrológica semidistribuida, cambio climático, condiciones no estacionarias.

Keywords: peak flows, Hydrological semi distributed modeling, climate change, non-stationarity conditions

¿Cómo citar?

Guerrero-Gallego, J., Rosado, G., Carvajal-Serna, L.F., Posada, L., Análisis hidrológico de caudales máximos en la cuenca alta del río Medellín (Colombia) con condiciones estacionarias y no estacionarias. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(2)e-20112931.

<https://doi.org/10.25100/iyv26i2.20112931>

Recibido: 26-04-23

Aceptado: 06-01-24

Correspondencia:

jjguerre@unal.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses: ninguno declarado



¿Por qué se llevó a cabo?

Es muy importante hacer buenas estimaciones de las condiciones de riesgo hidrológico en los estudios de inundaciones y establecer una guía para la estimación de caudales máximos en zonas altamente urbanizadas y montañosas de Colombia.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

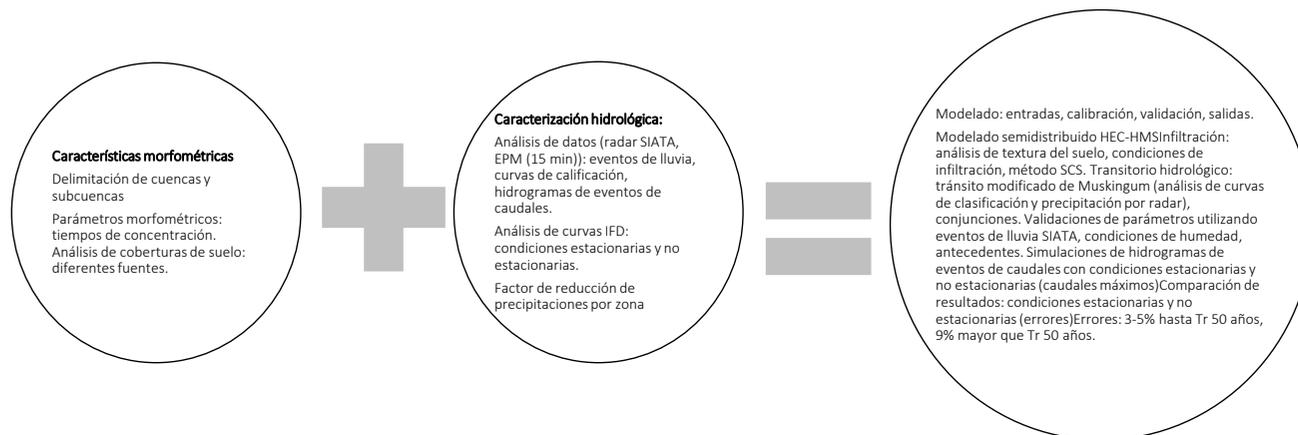
Este trabajo muestra la importancia de la estimación del riesgo hidrológico en condiciones estacionarias y no estacionarias para tener en cuenta el cambio climático y su impacto en áreas urbanas bajo diferentes condiciones de humedad antecedentes. Según los resultados, las diferencias entre los casos estacionarios y no estacionarios están entre el 3% y el 5% para períodos de retorno de hasta 50 años y flujos máximos más altos para los casos no estacionarios. Para periodos de retorno superiores a 50 años, las diferencias aumentan hasta el 9% a medida que aumentan los periodos de retorno. Este resultado indica que para eventos extremos comienza a ser importante tener en cuenta la variabilidad en parámetros estadísticos como la media y la varianza en el análisis de frecuencia.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados muestran la necesidad de nuevas estrategias o metodologías para la estimación del riesgo hidrológico con el cambio climático y su impacto en los caudales máximos de diseño en áreas altamente urbanizadas.

Graphical Abstract

Análisis hidrológico de caudales máximos en la cuenca alta del río Medellín (Colombia) con condiciones estacionarias y no estacionarias



Introducción

Además de la versatilidad natural que experimentan las variables relacionadas con el ciclo hidrológico, es necesario tener en cuenta el cambio climático asociado con las actividades humanas, el cual está referido a cambios en la composición de la atmósfera global y el estado medio de largo plazo de las características climáticas por cuenta de estas actividades (1, 2). Los cambios observados en los registros de variables hidrometeorológicas como la temperatura del aire y la precipitación, el aumento significativo en los caudales del río Medellín que han ocasionado desbordamientos (3) y el incremento de la frecuencia de eventos extremos, pueden obedecer a efectos de la variabilidad climática natural o a procesos relacionados con las actividades humanas. Estos procesos pueden afectar la forma de las curvas intensidad-frecuencia-duración (IDF) y los procesos de lluvia - escorrentía para la estimación de caudales máximos (3), lo cual establece la necesidad de considerar escenarios de variabilidad climática en la estimación de eventos extremos. Esto se da gracias a la relación importante entre el agua, el cambio climático, las crisis relacionadas con la energía, suministro y precio de alimentos, crecimiento poblacional, cambios en las actividades económicas y de uso del terreno y con los problemas sociales y en los mercados financieros. Y, a menos que esas relaciones sean tenidas en cuenta y las crisis del agua resueltas, otras crisis podrían intensificarse, lo que podría generar inseguridad y conflictos sociales en varios niveles (4, 5).

Ante el notable aumento en la intensidad y frecuencia de la precipitación en el Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia) (6, 7), la continua antropización de la cuenca, los cambios en el uso del suelo, además de factores asociados al cambio climático y la intensificación de los efectos de las fases del ENSO (8, 9), se ha establecido la necesidad por parte de los entes gubernamentales de la región de realizar un estudio hidrológico de la cuenca alta del río Medellín, en el cual se estime el comportamiento del flujo en el río Medellín para distintos periodos de retorno, capturando tanto las condiciones actuales como las condiciones futuras del comportamiento desde el punto de vista hidrológico de la cuenca. Se busca que los resultados sirvan como insumo para que entidades de planeación, gestión del riesgo y gestión de los recursos hídricos tengan un mejor entendimiento del comportamiento de los procesos hidrológicos para la correcta toma de decisiones.

En este trabajo se muestra el estudio hidrológico realizado para la cuenca alta del río Medellín (Colombia), el cual se puede dividir en tres grupos de actividades. Primero se hizo la caracterización de la cuenca de estudio, que consiste en el análisis del relieve, cobertura y usos del suelo y en el cálculo de parámetros geomorfológicos y de comportamiento de la infiltración en las subcuencas. Luego, se realizó la caracterización hidrológica, la cual consiste en el análisis de datos de las estaciones pluviográficas existentes en la cuenca, y los datos de niveles y caudales medidos en el cauce principal del río. Con el análisis de datos se obtuvo la precipitación de diseño y los eventos de precipitación que sirven como datos de entrada para la modelación.

Y finalmente se implementaron las actividades de modelación hidrológica, las cuales se realizaron usando el sistema HEC-HMS (10). Estas actividades incluyen pruebas de calibración y validación usando información medida, así como pruebas de sensibilidad a algunos parámetros y modelos como son el tiempo de rezago, los tipos de modelo lluvia-escorrentía a usar y las condiciones de humedad antecedente para el modelo de pérdidas hidrológicas.

Metodología

El Valle del Río Aburrá o Río Medellín está localizado en la cordillera Central de los Andes colombianos, entre las latitudes 6°00'N y 6°30'N y las longitudes 75°15'W y 75°45'W, con una longitud aproximada de 80 km y una amplitud variable de 30 km en el sector más ancho y 10 km en el sector más angosto. Comprende un área de aproximadamente 1,152 km² (11). La zona objeto de estudio corresponde a la parte alta de la cuenca del río Medellín, la cual atraviesa los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí y Envigado, pertenecientes a lo que se denomina el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia, Colombia. En la Figura 1 se observa la cuenca en estudio con respecto a la cuenca total del río Medellín y la ubicación en el territorio nacional colombiano. Se delimitó la cuenca del río Medellín desde su nacimiento en el

sector conocido como La Clara en el municipio de Caldas, hasta la desembocadura de la quebrada La Presidenta, en el barrio El Poblado del municipio de Medellín. La cuenca delimitada cuenta con un área total de drenaje de 306 km².

Esta región está caracterizada por una alta variabilidad climática, la cual se ve reflejada en variables como la precipitación, influenciada en gran medida por la ubicación en la zona ecuatorial, la configuración orográfica de la zona y los diferentes fenómenos macro climáticos como el ENSO, el Chorro del Chocó, las oscilaciones Maden-Julian y la migración latitudinal de la Zona de Confluencia Intertropical (8, 9, 12). El efecto de este último proceso se puede apreciar en los ciclos anuales de la precipitación (Figura 1), que presentan un comportamiento bimodal con dos máximos anuales (marzo - mayo y septiembre - noviembre) y dos mínimos anuales (junio - septiembre y diciembre - febrero).

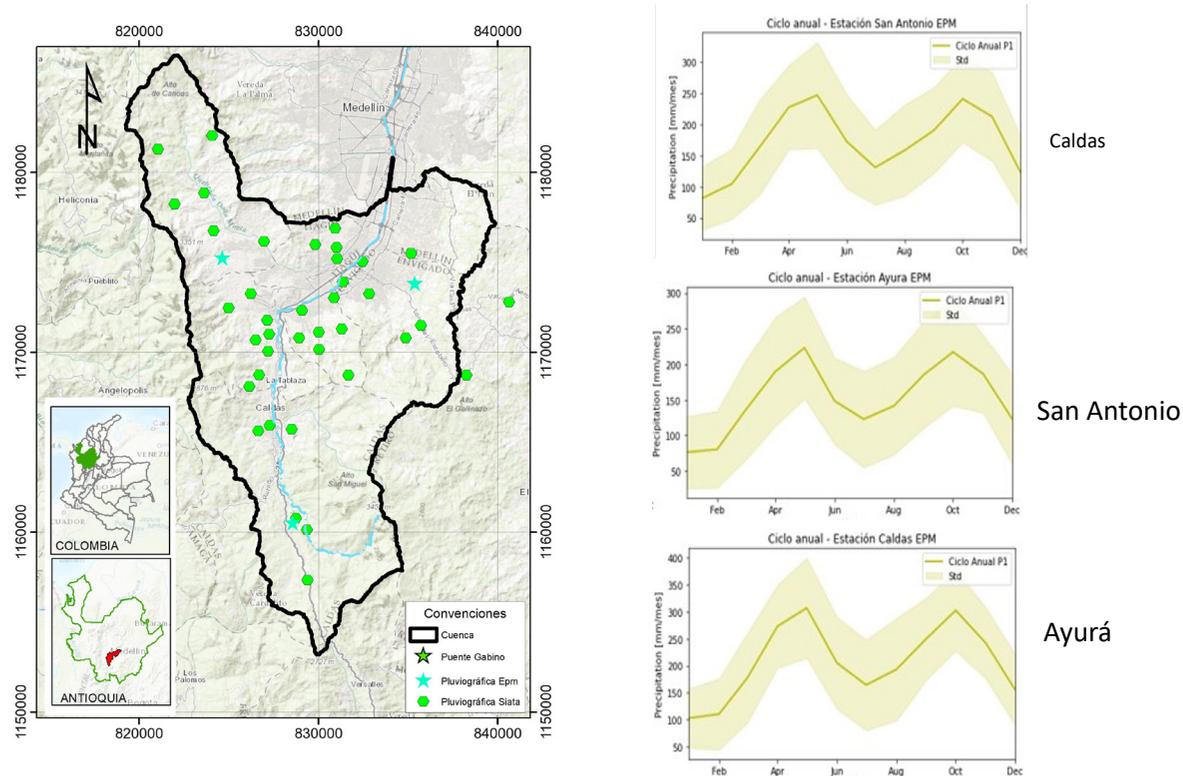


Figura 1. Zona de estudio: cuenca Alta del Río Medellín. En el cuadro del panel izquierdo se muestra la ubicación de la cuenca dentro de Colombia y la localización de las estaciones pluviográficas operadas por EPM y el SIATA. El panel de la derecha muestra los ciclos anuales mensuales de la precipitación en las estaciones pluviográficas de EPM.

Este estudio hidrológico puede ser dividido en tres partes. En primer lugar, se tiene la caracterización de la cuenca en la cual se estudian las características relativas a la forma y al relieve de las cuencas, consideradas de interés general dentro del área de influencia del proyecto. Así mismo, se analizan las relaciones y parámetros que permiten comprender el comportamiento hidrológico de cada una de las cuencas y la red de canales que las conforman. En segundo lugar, se tiene la caracterización hidrológica, donde se analizan los datos de mediciones de variables hidrológicas, en este caso precipitación y caudales, con el fin de establecer el comportamiento histórico de los procesos hidrológicos de superficie en la zona y poder hacer cálculos que permitan establecer proyecciones del comportamiento probable de estos procesos. Finalmente, se tienen las actividades de modelación hidrológica, las cuales parten de los resultados obtenidos en la caracterización de la cuenca y la caracterización hidrológica. Para estas actividades se implementaron estrategias de modelación hidrológica semidistribuida, utilizando el software HEC-HMS desarrollado por el cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (10).

Caracterización de la Cuenca

Para el análisis morfométrico los datos de cartografía utilizados fueron procesados vía sistemas de Información Geográfica SIG, apoyados en la hidrografía digital que referencia el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (11) y datos geospaciales proporcionados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (13, 14). Para la estimación de los parámetros morfométricos, se usó el modelo digital del terreno proporcionado por el equipo de trabajo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), el cual tiene una resolución de 2.0 x 2.0 m. La cuenca del río Medellín fue dividida en 37 subcuencas (se tuvieron subcuencas con áreas mayores a 0,6 km²) y 4 zonas de drenaje lateral al cauce principal del río Medellín (que aglomeran las zonas no incluidas en las subcuencas mayores), como se puede ver en el panel izquierdo de la Figura 2. Con base en esta delimitación se puede establecer que existen algunas cuencas con una mayor concentración del área, como son la quebrada Doña María (78,84 km²), La Ayurá (33,89 km²), La Presidenta (29,51 km²) y la Doctora (11,3 km²), que equivalen a aproximadamente el 50% del área total de la cuenca.

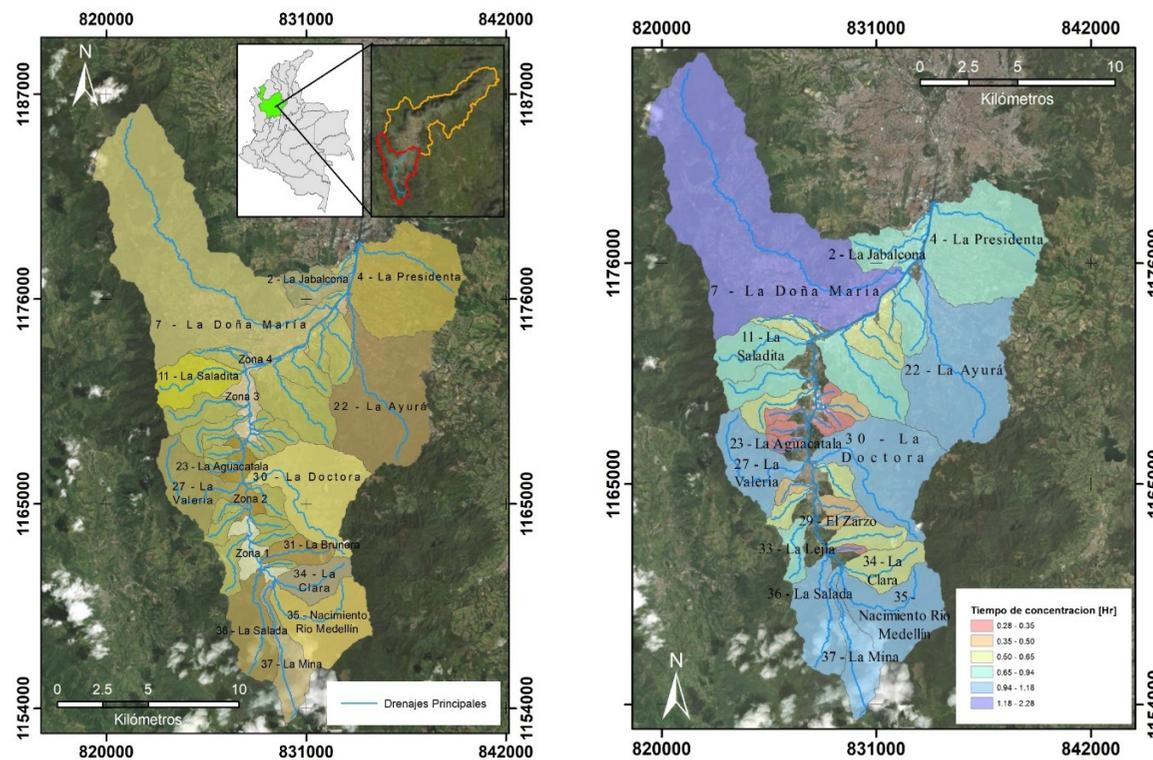


Figura 2. Delimitación de las microcuencas del río Aburrá y estimación de tiempos de concentración

El uso de estos parámetros además de la caracterización de la zona de estudio desde el aspecto morfométrico es para obtener los tiempos de concentración, el cual es un parámetro de entrada para el análisis de hidrológico. Para el cálculo de los tiempos de concentración se utilizaron doce métodos de cálculo, entre los que se cuentan Témez (1978), Kirpich (1990), California Culverts Practice (1942), SCS - Ranser (1958), Williams (1922), Johnstone y Cross (1949), Linsey, Snyder, Ventura - Heron (1978); (15). Para obtener el valor del tiempo de concentración para cada subcuenca, se definió como el valor promedio (removiendo valores atípicos) de los resultados obtenidos aplicando los distintos métodos utilizados. Los valores obtenidos para cada microcuenca pueden ser observados en el panel derecho de la Figura 2, teniendo valores de hasta 2,28hrs, como es el caso de la subcuenca de la quebrada la Doña María.

Para la estimación de las pérdidas hidrológicas para cada subcuenca se empleó la metodología del Número de Curva del SCS - Soil Conservation Services (14). Esto se hizo usando mapas de cobertura y tipo de suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (11) y el mapa de coberturas y uso del suelo del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Aburrá - POMCA (16), el cual está basado en la metodología de Corinne Land Cover planteada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (17). De acuerdo con la información del IGAC parte de los suelos que componen las cuencas del Valle de Aburrá están compuestos por suelos heterogéneos con un drenaje bueno o excelente, y se clasificaron en el grupo A; otra parte, compuesto por suelos de texturas finas a medias se clasificaron como tipo B. Las zonas urbanas presentes en la cuenca, los cuales tienen la condición de drenaje más desfavorable se clasifican en el grupo D. Para el cálculo del número de curva se obtiene el mapa de cobertura de suelos para cada una de las microcuencas, luego se calcula el área de cada tipo de cobertura dentro de la cuenca y se asigna un grupo hidrológico para cada uno de ellos según el criterio mencionado anteriormente. Se procede a asignar un valor del número de curva según las tablas de la metodología Corine Land Cover y finalmente, se realiza un promedio ponderado por el área para obtener cada uno de los números de curva que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de curva estimado para cada una de las microcuencas

Microcuenca	CN II	CNIII	Imp [%]	Microcuenca	CN II	CNIII	Imp [%]
1	98.00	99	100%	2 - La Jabalcona	89.81	96	83%
3	98.00	99	100%	4 - La Presidenta	79.61	90	65%
5	98.00	99	100%	6	94.16	98	100%
7 - Doña María	60.58	78	25%	8 - La Sucia	91.12	96	88%
9 - La Heliodora	88.84	95	84%	10 - La Honda	86.17	94	80%
11 - La Grande	49.60	70	14%	12 - La Tablacita	73.55	87	47%
13 - La Bermejala	51.61	72	12%	14 - Miraflores	65.96	82	37%
15 - La Doctora	65.14	82	40%	16 - Palosanto	60.89	79	33%
17 - La Polvosa	59.54	78	30%	18 - La Culebra	55.06	74	32%
19	71.28	86	52%	20 - La Raya/La Manuela	55.88	75	29%
21 - La Cano	50.99	71	8%	22 - La Zúñiga/Ayurá	56.76	76	29%
23 - La Aguacatala	64.02	81	32%	24 - La Corrala	70.27	85	50%
25 - La Chuscala	63.55	81	34%	26	39.45	60	2%
27 - La Valeria	49.56	70	4%	28 - La Loca/La Piedrahita	53.43	73	8%
29 - El Zarzo	46.45	67	0%	30 - La Miel	47.39	68	8%
31 - La Brunera	40.30	61	0%	32 - La Chapola	46.39	67	0%
33 - La Lejía	52.37	72	20%	34 - La Clara	40.65	62	0%
35 - Nacimiento río Medellín	42.1	63	0%	36 - La Salada	51.11	71	8%
37 - La Mina	45.6	66	2%				
Zona 1	59.86	78	23%	Zona 2	74.82	88	57%
Zona 3	86.07	94	79%	Zona 4	98.22	99	89%

Caracterización Hidrológica

La caracterización hidrológica se hizo usando dos grupos de información: datos medidos en estaciones pluviométricas y de nivel instaladas en la zona y curvas IDF (estacionarias y no estacionarias) de la zona obtenidas por Grajales (11), estas últimas para la estimación de las precipitaciones de diseño para periodos de retorno desde los 2 hasta los 100 años. Los datos medidos corresponden a estaciones instaladas por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y el SIATA. Por parte de EPM se contó con registros en 3 estaciones con resolución diaria (Ayurá, Caldas y San Antonio) y registros comunes entre 1972 y 2020. Las curvas IDF utilizadas en este caso corresponden a las ubicaciones de las estaciones de EPM. Los datos medidos por SIATA de 39 estaciones de precipitación y 6 estaciones de medición de nivel dentro de la zona de estudio, con información desde 2015 hasta finales de 2021, los cuales están dados a una resolución de 1 minuto. En la Figura 1 se presenta la distribución espacial de las estaciones pluviográficas empleadas en los análisis, tanto de EPM como de SIATA. En la Figura 3 se muestran las estaciones de nivel y velocidad superficial a lo largo del río Medellín de SIATA, además del comportamiento de los caudales máximos y medios en una de las estaciones de medición de niveles consideradas. Además de analizar el comportamiento histórico de la precipitación y de los caudales, también se hizo el análisis de eventos máximos, con el fin de seleccionar eventos para los procesos de calibración y validación en la fase de modelación hidrológica, así como para la estimación de los parámetros requeridos para la evaluación del tránsito de crecientes en el canal del río Medellín.

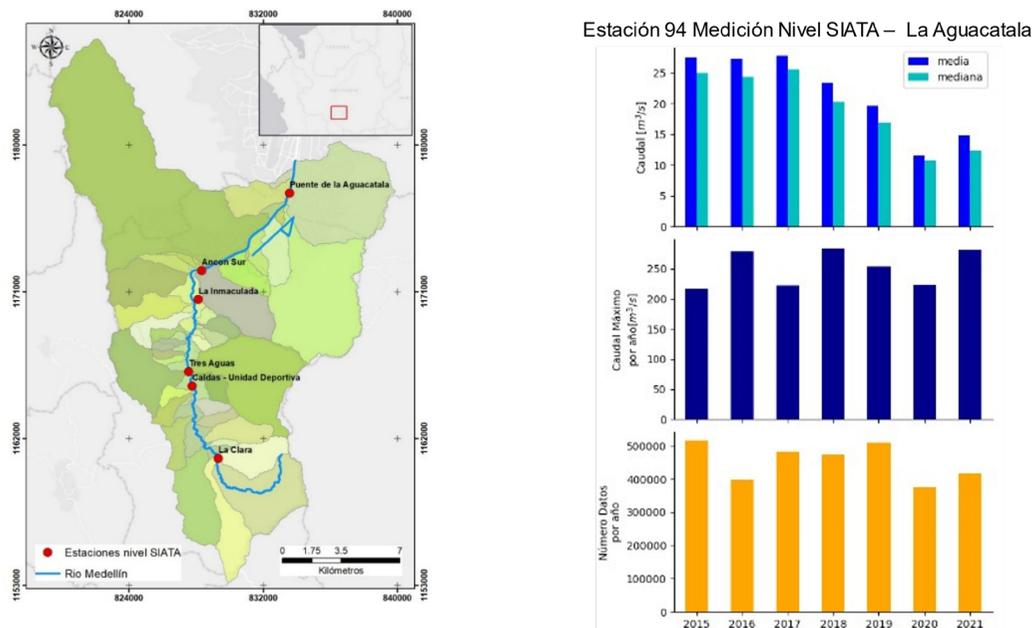


Figura 3. Estaciones disponibles de nivel y velocidad del SIATA a lo largo del río Medellín. Símbolos: Círculos rojos: Estaciones de nivel y velocidad SIATA. Línea Azul: Cauce Principal Río Medellín. Se presenta también el comportamiento por año de los caudales máximos y medios en la estación La Aguacatala.

Teniendo en cuenta que la cuenca presenta información robusta de precipitación y de caudal, se realizó un seguimiento de eventos de precipitación y la respuesta hidrológica de la cuenca en las diferentes estaciones de caudal instaladas a lo largo del río. Para ello, de las seis estaciones disponibles se seleccionaron tres: La Clara, Tres Aguas y La Aguacatala. para caracterizar el cauce principal del Río Medellín en su curso alto, medio y bajo. Con base en los datos de estas estaciones se seleccionaron eventos para las actividades de modelación y para la estimación del tránsito de crecientes.

De los distintos métodos que existen para hacer este análisis y teniendo en cuenta su disponibilidad en el sistema HEC-HMS, se escoge el método Muskingum, el cual representa relaciones caudal-almacenamiento dentro de un canal de análisis. En la Figura 4 se muestra

como ejemplo la mayor creciente registrada en el mes de octubre de 2021 en las estaciones Aguacatala y Tres Aguas, junto con los hietogramas registrados en las estaciones de precipitación aledañas. Como es de esperarse, el hidrograma registrado en las estaciones aguas abajo (estación Aguacatala) presenta valores de caudales significativamente más altos que el registrado en la estación aguas arriba (estación Tres Aguas). Esto es debido a los aportes laterales que tienen lugar en la cuenca de estudio.

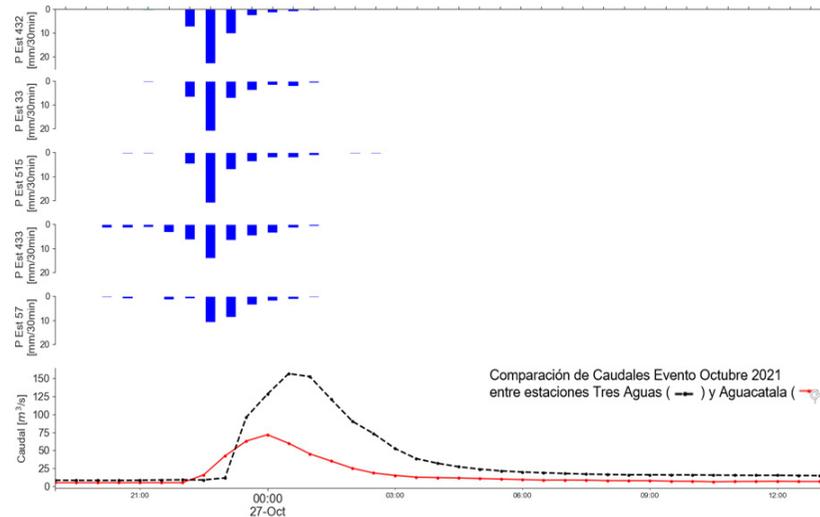


Figura 4. Hidrogramas del evento de creciente del 27/10/2021, registrados en las estaciones Aguacatala y Tres Aguas y los hietogramas asociados a este evento en distintas estaciones de medición de precipitación del SIATA.

El método Muskingum tradicional no está diseñado para tener en cuenta los aportes laterales, que se emplearon en el método Muskingum de tres parámetros presentado en O'Donnell (18), el cual asume que el flujo lateral varía de forma lineal a lo largo del tramo de análisis y puede ser representado como un factor del caudal de entrada, de la siguiente manera:

$$S = K[XI(1 + \alpha) + (1 - X)Q] \quad [1]$$

Con valores promedio de diferencias relativas de 7% para el tramo entre Tres Aguas y la Aguacatala y del 10% para el tramo entre La Clara y Tres Aguas, se puede considerar que el método da resultados útiles para las actividades de modelación hidrológica, al menos como primeras aproximaciones. En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros del método Muskingum que sirven como valores de entrada en el HEC-HMS.

Tabla 2. Valores obtenidos para los parámetros de Muskingum (modificación de O'Donnell, 1985) para los dos tramos considerados en la zona de estudio

Tramo	K (horas)	X	α
La Clara (169)- Tres Aguas (106)	1.36	0.36	1.36
Tres Aguas (106)- La Aguacatala (94)	1.92	0.25	1.68

Se trabajó curvas IDF estacionarias generadas por EPM para sus estaciones de medición y las curvas IDF no estacionarias fueron tomadas del estudio realizado por Grajales (6, 7) partiendo de series históricas a resolución de 15 minutos en 34 estaciones pluviográficas. Para las curvas IDF se ve más marcada la no-estacionariedad (variaciones temporales en

la media de las series de tiempo) en duraciones menores a 50 min, con diferencias poco significativas en periodos de retorno inferiores a 5 años (Figura 5).

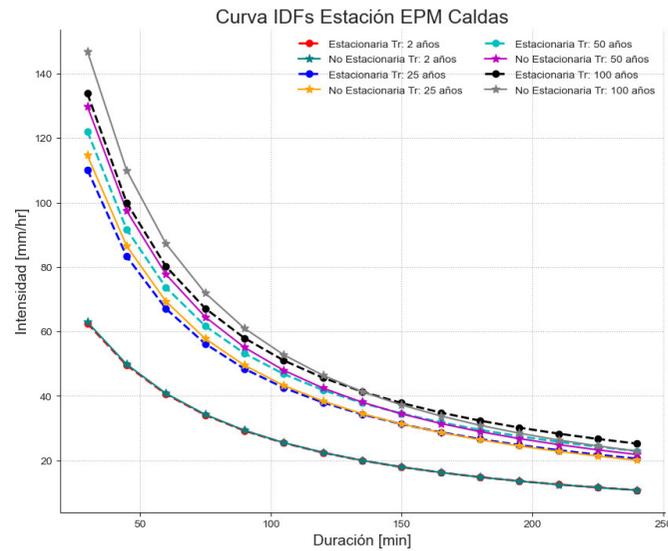


Figura 5. Comparación de curvas IDF estacionarias y no estacionarias para la estación Caldas operada por EPM

Modelación Hidrológica Semidistribuida: HEC-HMS

Para la transformación de la precipitación directa en escorrentía se propone un modelo hidrológico semidistribuido de crecientes en el cual, la cuenca de estudio fue dividida en una serie de subcuencas y canales interconectados entre sí, lo cual permite considerar de forma detallada la variabilidad espaciotemporal de las características geomorfológicas y climáticas de la cuenca en consideración. Para este fin, se hace uso del software HEC-HMS del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos (10), el cual integra diversas metodologías de cálculo para la estimación de crecientes en el diseño hidrológico.

En la Figura 6 se presenta la gráfica de la toponimia del modelo y su distribución espacial. En total se representa la cuenca de interés mediante 41 modelos de subcuencas (37 cuencas de afluentes y 4 zonas de drenaje lateral), 20 puntos de confluencia o descarga y 19 tramos de río para transitar los hidrogramas.



Figura 6. Representación de la cuenca de interés para el modelo hidrológico semidistribuido (HEC-HMS). Símbolos: Cuadrados Vinotinto: Estaciones pluviográficas EPM, Círculos Rojos: Estaciones de Nivel SIATA. Línea Azul: Cauce Principal Río Medellín

Para incluir el efecto de la variabilidad espacial se introdujo el concepto de factores de reducción por área (FRA) de Bell (19), el cual consiste en comparar la precipitación máxima de una de las estaciones de registro, para los diferentes periodos de retorno, con la precipitación máxima ponderada mediante los factores de Thiessen de cada una de las estaciones. Se realiza este procedimiento para diversos puntos de cierre dentro de la cuenca de estudio, con el fin de analizar cómo cambia el factor de reducción según la influencia de las estaciones pluviométricas. Se obtienen valores de FRA que varían entre 0,69 y 0,74, con un factor promedio de 0,72.

Resultados y discusión

Para la validación del modelo hidrológico se seleccionaron 5 eventos máximos ocurridos en año 2021 (ocurridos en los meses abril, mayo, agosto, septiembre y octubre), registrados en la estación de nivel Aguacatala del SIATA y en estaciones de pluviográficas de la zona, las cuales fueron seleccionadas según polígonos de Thiessen. Se implementaron modelos del Soil Conservation Services (SCS), Clark y Snyder (16, 20), obteniendo mejores ajustes en los dos primeros modelos.

En la Figura 7 se presenta un resumen de los resultados de la validación de los modelos hidrológicos HEC-HMS, se puede observar que para la mayoría de los eventos el modelo es capaz de representar adecuadamente el comportamiento del régimen de caudales máximos y sus hidrógrafas con diferencias relativas de entre 1-20% en la magnitud del caudal pico y diferencias menores a 20 minutos en el tiempo al pico. Adicionalmente, la respuesta hidrológica de la cuenca está fuertemente asociada con las condiciones de saturación de la cuenca, en general, se tienen mejores ajustes para las condiciones CNII y CNIII con tiempo de rezago equivalente al 60% del tiempo de concentración de las subcuencas. El uso de CNII o CNIII dependerá de la condición climática que se analice, i.e. si corresponde a época de lluvias o a la época seca. Por otra parte, no se notan diferencias significativas entre los hidrogramas de Clark y SCS, obteniendo valores más atenuados para el hidrograma de Clark.

Comparación modelo HEC-HMS Vs Estación 94 SIATA año 2021

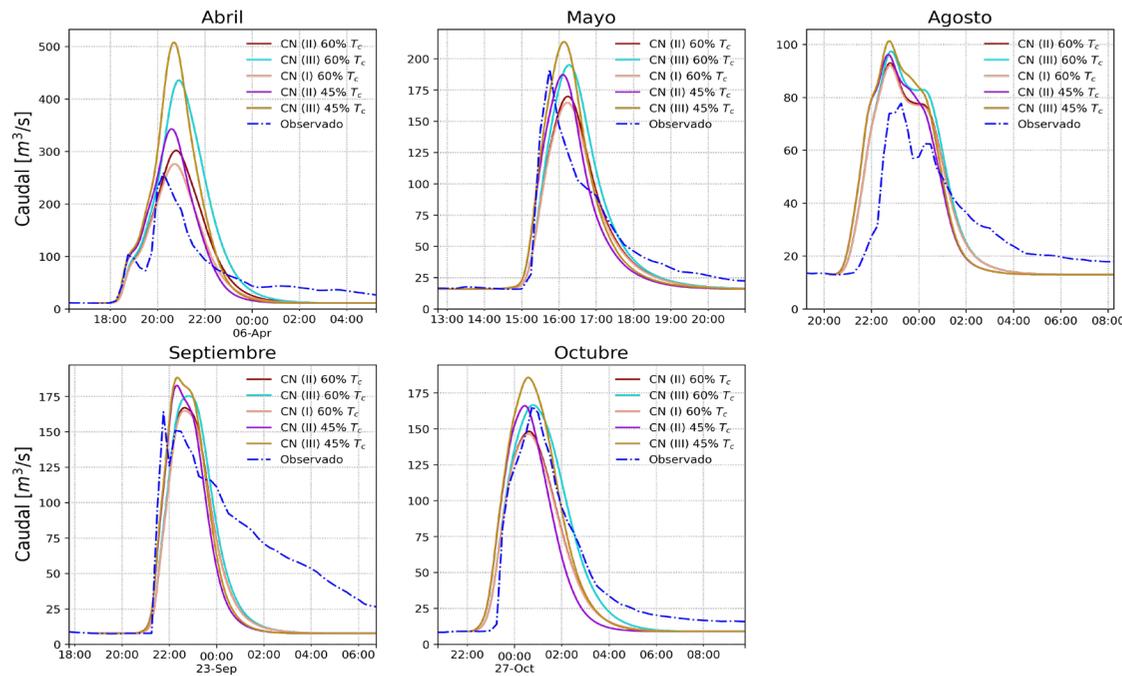


Figura 7. Validación del modelo hidrológico en la Estación Aguacatala del SIATA para cinco eventos de caudales máximos registrados en el año 2021

La Figura 8 muestra las diferencias entre las configuraciones implementadas en los modelos hidrológicos considerando contexto estacionario (E) y no estacionario (NE), condición de humedad antecedente del suelo normal (CN II) y húmeda (CN III) y los modelos de lluvia-escorrentía de Clark y SCS. Dicho gráfico se construyó calculando el promedio del error relativo entre los modelos que tienen la misma configuración de parámetros para cada uno de los puntos de salida. No se observan diferencias significativas (< 5%) entre los resultados de los modelos cuando se utilizan condiciones de lluvia estacionarias y no estacionarias, debido que, como se mencionó anteriormente, las diferencias entre las lluvias se vuelven significativas para periodos de retorno mayor a 50 años. Sin embargo, se observan diferencias significativas importantes en la magnitud de los caudales, cuando se cambian las condiciones de humedad antecedente, entre suelo normal y suelo húmedo (Condiciones II y III), esto se debe a que el suelo se encuentra saturado al momento de la lluvia, generando mayor precipitación efectiva, situación similar a lo que ocurre en épocas de lluvia en el Valle de Aburrá.

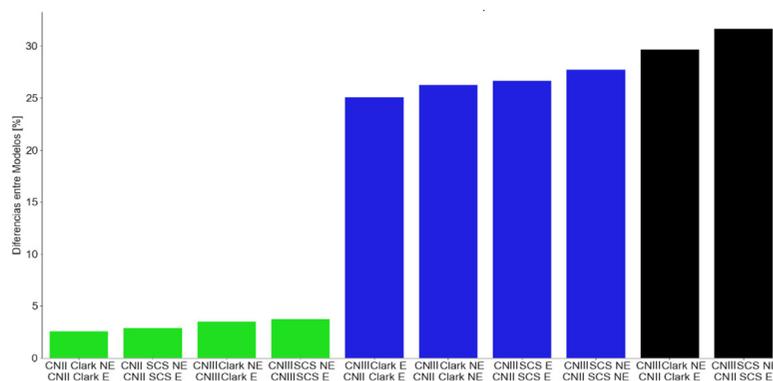


Figura 8. Diferencias relativas entre modelos implementados.

Al analizar los resultados de la simulación para los eventos máximos ocurridos en el año 2021, en las estaciones 94 y 106 de SIATA y con base en los resultados obtenidos de la Figura 8, se decide optar por las condiciones de humedad antecedente III y un tiempo de rezago equivalente al 60% del tiempo de concentración. De manera general, esta combinación es la que mejor describe el comportamiento de los diferentes eventos. La Figura 9 muestra los hidrogramas de respuesta obtenidos para el periodo de retorno de 100 años en diferentes puntos de salida, con condición antecedente de humedad III (suelo húmedo), modelo de lluvia-escorrentía de Clark y lluvia en condición no estacionaria.

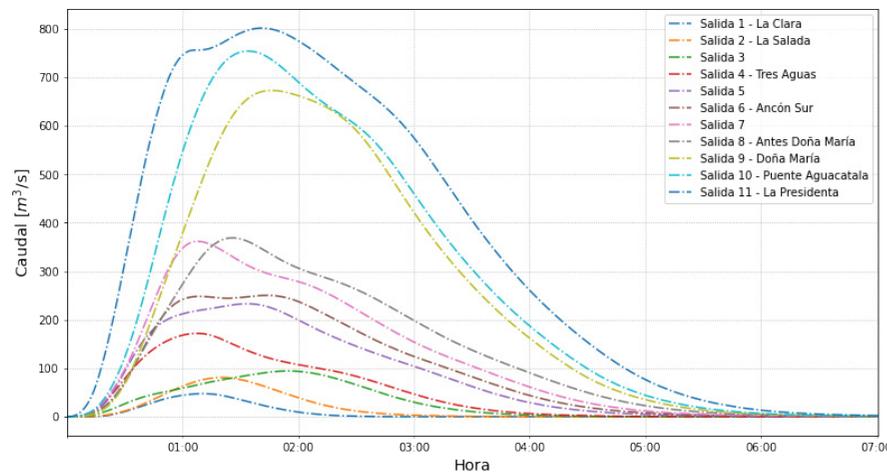


Figura 9. Hidrogramas de respuesta en los diferentes puntos de salida asociados a crecientes de 100 años de periodo de retorno.

Conclusiones

Los resultados de este estudio capturan apropiadamente el comportamiento esperado de la escorrentía superficial en la zona de interés. Se hizo la comparación con distintas configuraciones del modelo, así como la validación usando eventos medidos dentro de la cuenca, lo cual es un avance significativo en la zona de estudio, dado que en estudios anteriores no había registros suficientes para hacer este tipo de análisis de validación. La existencia de redes de medición de variables hidrometeorológicas como las del proyecto SIATA y la de EPM permitieron realizar las validaciones y calibraciones del modelo hidrológico.

Para la calibración del modelo se seleccionaron cinco eventos aleatorios de caudales máximos ocurridos en el 2021, en las estaciones 94 y 106 de SIATA. Los resultados permitieron identificar que, las condiciones de humedad antecedentes en la cuenca influyen la respuesta hidrológica; sin embargo, los mayores caudales registrados presentaron un mejor ajuste con las condiciones de humedad antecedente CNIII y un tiempo de rezago del 60% del tiempo de concentración.

Se implementaron además escenarios estacionarios y no estacionarios, con el fin de evaluar los efectos que puede tener en los caudales de diseño el tener en cuenta las tendencias de los registros, las cuales pueden servir como inferencia tanto de las condiciones de variabilidad climática natural como de efectos de cambio climático.

Según los resultados las diferencias que hay entre los casos estacionarios y no estacionarios (estos últimos siendo usados como proxy para condiciones de cambio climático), en promedio no son tan significativas, habiendo diferencias porcentuales de entre 3-5% entre los casos considerados, obteniendo en este caso magnitudes mayores en los casos no estacionarios. Las diferencias van aumentando conforme incrementan los periodos de retorno, tendiendo estas a ser hasta de alrededor del 9%, lo cual indica que para eventos extremos comienza a cobrar importancia el tener en cuenta la variabilidad en los parámetros estadísticos como la media y la varianza a la

hora de hacer análisis de frecuencia que sirvan como insumo para temas de diseño y también de prevención y mitigación de eventos extremos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Área Metropolitana del Valle de Aburrá por el financiamiento del proyecto CI 743 de 2021, en el cual está enmarcado este estudio. También a los equipos del SIATA y de Empresas Públicas de Medellín por facilitar la información utilizada para este estudio.

Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis report: Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2] Salas, J.D. and Obeysekera, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), pp. 554-568, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820.
- [3] Cheng, L. and AghaKouchak, A (2014). Nonstationary precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for infrastructure design in a changing climate, *Scientific Reports* 4(7093), pp. 1-6
- [4] Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, et al (2007). Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- [5] World Water Assessment Programme, WWAP (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO, and London: Earthscan
- [6] Grajales, D. and Carvajal-Serna, L. F. (2019). Nonstationary intensity- frequency-duration curves for Medellín River basin. *DYNA*, Medellín, Colombia, 86 (208), pp 321-328. DOI:10.15446/dyna.v86n208.69300
- [7] Grajales, D and Carvajal-Serna L. F. (2021). Estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración no estacionarias para el Departamento de Antioquia. *XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ed IAHR, Acapulco, México, Issbn: 979-888722468-8, pp 194-205.
- [8] Poveda, G. (2004). *La Hidroclimatología De Colombia: Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal Hasta La Escala Diurna*. *Ciencias de La Tierra*, 201–222.
- [9] Rojo, J. (2018). *Spatial and Temporal Characterization of Colombia's Hydroclimatology*. PhD Thesis Dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69017>
- [10] U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2012). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System, User's Manual, Version 4.0, CPD-74A*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- [11] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (2014). *Mapa Digital de Suelos del Departamento de Antioquia, República de Colombia*. Escala 1:100.000. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- [12] Rojo, J. & Mesa, O. J. (2018). MJO Influence over northern South American Observations and Modeling, AGU Fall Meeting. DOI: 10.13140/RG.2.2.35057.10087



- [13] AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. 745 p.
- [14] AMVA - Universidad Nacional de Colombia (2018). Estudios y Diseño de Estabilidad de la Vía Regional Nororiental (Fases 1, 2 y 4) Asociada a la dinámica del Río Medellín y Estudios Básicos de Amenaza de Inundación Asociada al Río Medellín entre la Descarga de la Quebrada La Rodas y El Puente de La Troncal Nordeste En Barbosa. CI 1109 de 2016. 81p.
- [15] Smith, R. and Vélez, M. V. (1997). Hidrología de Antioquia. Secretaría de Obras Públicas, Antioquia-Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 176 p.
- [16] AMVA, CORNARE, CORANTIOQUIA, 2018. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Aburrá.
- [17] IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- [18] O'Donnell, T. (1985) A Direct Three-Parameter Muskingum Procedure Incorporating Lateral Inflow. Hydrological Sciences Journal, 30:4, PP. 479-496.
- [19] Bell, F. C. (1976). The Areal Reduction Factor in Rainfall Frequency Estimation. United Kindom: Institute of Hydrology, No. 35, Wallingford, England.
- [20] Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, 580 pp.
- [21] UNAL – Universidad Nacional de Colombia. <https://medellin.unal.edu.co/noticias/3989-se-debe-respetar-red-de-drenaje-natural-del-rio-medellin-para-evitar-nuevas-emergencias.html>