

Monitoreo **HIDRÁULICO**



Contenido

1. Introducción	12
2. Objetivos del informe	13
3. Metodología y descripción de las estaciones	14
3.1. Metodología.	14
3.1.1. Materiales y equipos.	14
3.1.2. Características de la sección de aforo.	16
3.1.3. Tipos de aforos.	17
3.1.4. Método para calcular el caudal.	18
3.1.5. Estrategia de trabajo.	21
3.1.6. Administración y manejo de datos.	21
3.1.7. Método para calcular los caudales horarios.	21
4. Resultados de Campaña realizada en 2017	22
4.1. Campaña 22 de Febrero	27
4.1.1. Análisis de Lluvia	27
4.1.2. Análisis de resultados	28
4.2. Campaña 08 de Marzo	30
4.2.1. Análisis de Lluvia	30
4.2.2. Análisis de resultados	31
4.3. Campaña 09 de Marzo	33
4.3.1. Análisis de Lluvia	33
4.3.2. Análisis de resultados	34
4.4. Campaña 26 de Abril	36
4.4.1. Análisis de Lluvia	36
4.4.2. Análisis de resultados	37

4.5.	Campaña de modelación del 21 de Junio- Q. La Madera	39
4.5.1.	Análisis de Lluvia	40
4.5.2.	Análisis de resultados	41
4.6.	Campaña de modelación del 22 de Junio - Q. La García	42
4.6.1.	Análisis de Lluvia	43
4.6.2.	Análisis de resultados	43
4.7.	Campaña 10 de Julio	46
4.7.1.	Análisis de Lluvia	46
4.7.2.	Análisis de resultados	47
4.8.	Campaña de modelación del 12 de Julio - Q. La Hueso	50
4.8.1.	Análisis de Lluvia	51
4.8.2.	Análisis de resultados	52
4.9.	Campaña de modelación del 12 de Julio - Q. Doña María	54
4.9.1.	Análisis de Lluvia	55
4.9.2.	Análisis de resultados	56
4.10.	Campaña de modelación del 13 de Julio- Q. Santa Elena	58
4.10.1.	Análisis de Lluvia	59
4.10.2.	Análisis de resultados	59
4.11.	Campaña 26 de Julio	61
4.11.1.	Análisis de Lluvia	61
4.11.2.	Análisis de resultados	61
4.12.	Campaña 27 de julio	64
4.12.1.	Análisis de Lluvia	64
4.12.2.	Análisis de resultados	64
4.13.	Campaña 02 de Agosto	67
4.13.1.	Análisis de Lluvia	67
4.13.2.	Análisis de resultados	68
4.14.	Campaña 13 de Septiembre	70
4.14.1.	Análisis de Lluvia	70

4.14.2. Análisis de resultados	71
4.15. Campaña 14 de Septiembre	73
4.15.1. Análisis de Lluvia	73
4.15.2. Análisis de resultados	74
4.16. Campaña 27 de Septiembre	76
4.16.1. Análisis de Lluvia	76
4.16.2. Análisis de resultados	77
5. Resultados de Campaña realizada en 2018	79
5.1. Campaña 25 de Abril	81
5.1.1. Análisis de Lluvia	81
5.1.2. Análisis de resultados	82
5.2. Campaña 09 de Mayo	85
5.2.1. Análisis de Lluvia	85
5.2.2. Análisis de resultados	86
5.3. Campaña 10 de Mayo	89
5.3.1. Análisis de Lluvia	89
5.3.2. Análisis de resultados	90
5.4. Campaña 13 de Junio	93
5.4.1. Análisis de Lluvia	93
5.4.2. Análisis de resultados	94
5.5. Campaña de tiempos de viaje 18, 19 y 20 de Junio.	96
5.5.1. Análisis de Lluvia	96
5.5.2. Análisis de resultados	96
5.6. Campaña de modelación 5 y 6 de Julio.	99
5.6.1. Análisis de Lluvia	99
5.6.2. Análisis de resultados	99
5.7. Campaña del 10 de Octubre de 2018	103
5.7.1. Análisis de Lluvia	103
5.7.2. Análisis de resultados	103

6. Análisis global de resultados	108
6.1. Análisis de los acumulados de precipitación a escala mensual	108
6.2. Comportamiento general de los caudales sobre el cauce principal del río Aburrá-Medellín	114
6.3. Clasificación del régimen de caudal para los aforos realizados en el cauce principal del Río Aburrá-Medellín durante el 2017.	116
6.4. Clasificación de caudales en las quebradas para el año 2017 según los aforos históricos	117
6.5. Clasificación del régimen de caudal para los aforos realizados en el cauce principal del Río Aburrá-Medellín durante el 2018.	122
6.6. Clasificación de caudales en las quebradas para el año 2018 según los aforos históricos	125
6.7. Clasificación de niveles de acuerdo a las estaciones automáticas de nivel de SIATA.	126
6.8. Curva de calibración estaciones automáticas de SIATA.	128
7. Conclusiones	132

Índice de Figuras

3.1. OTT MF PRO.	15
3.2. Correntometro OTT-c31.	15
3.3. Pistola Stalker ATS II.	16
3.4. Aforo por vadeo en el Río Medellín.	18
3.5. Aforo por suspensión.	18
3.6. Método Velocidad-Área: Discretización de las verticales en la sección transversal y su perfil de velocidad media.	19
3.7. Toma de datos con correntómetro y sensor de velocidad superficial.	20
4.1. Mapa de estaciones de aforo sobre el río Aburrá-Medellín	24
4.2. Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona sur.	25
4.3. Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona norte.	26
4.4. Lluvia Campaña 22 de Febrero.	27
4.5. Resultados Campaña 22 de Febrero	29
4.6. Lluvia Campaña 08 de marzo	30
4.7. Resultados Campaña 8 de Marzo de 2017.	32
4.8. Lluvia Campaña 09 de marzo	33
4.9. Resultados Campaña 09 de marzo.	34
4.10. Lluvia Campaña 26 de Abril	36
4.11. Resultados Campaña 26 de Abril	37
4.12. Mapa Campaña 21 de Junio.	39
4.13. Lluvia Campaña 21 de Junio.	40
4.14. Resultados Campaña 21 de Junio.	41
4.15. Mapa Campaña 22 de Junio.	42
4.16. Resultados Campaña 22 de Junio.	44

4.17. Lluvia Campaña 10 de Julio.	46
4.18. Resultados Campaña 10 de Julio.	48
4.19. Mapa Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso.	50
4.20. Lluvia Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso	51
4.21. Resultados Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso.	52
4.22. Mapa Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.	54
4.23. Lluvia Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.	55
4.24. Resultados Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.	56
4.25. Mapa Campaña 13 de Julio.	58
4.26. Resultados Campaña 13 de Julio.	59
4.27. Resultados Campaña 26 de Julio.	62
4.28. Resultados Campaña 27 de julio.	65
4.29. Lluvia Campaña 02 de Agosto	67
4.30. Resultados Campaña 02 de Agosto	68
4.31. Lluvia Campaña 13 de Septiembre	70
4.32. Resultados Campaña 13 de Septiembre	71
4.33. Lluvia Campaña 14 de Septiembre	73
4.34. Resultados Campaña 14 de Septiembre	74
4.35. Lluvia Campaña 27 de Septiembre	76
4.36. Resultados Campaña 27 de Septiembre.	77
5.1. Lluvia Campaña 25 de Abril.	81
5.2. Resultados Campaña 25 de Abril	82
5.3. Estaciones de aforo sobre el río Aburrá-Medellín, campaña del 25 de Abril de 2018.	84
5.4. Lluvia Campaña 09 de Mayo	85
5.5. Resultados Campaña 09 de Mayo de 2018.	86
5.6. Estaciones de aforo sobre los afluentes del río Aburrá-Medellín, campaña del 9 de mayo de 2018.	88
5.7. Lluvia Campaña 10 de Mayo	89
5.8. Resultados Campaña 10 de Mayo.	90

5.9. Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona norte.	92
5.10. Lluvia Campaña 13 de Junio	93
5.11. resultados Campaña 13 de Junio	94
5.12. Lluvia Campaña de tiempos de viaje	96
5.13. Resultados Campaña de tiempos de viaje	98
5.14. Lluvia Campaña de modelación	99
5.15. Caudales aforados a lo largo del río Aburrá-Medellín.	100
5.16. Caudales aforados en los afluentes localizados a largo del río Aburrá-Medellín.	101
5.17. Lluvia Campaña 10 de Octubre.	103
5.18. Caudales aforados a lo largo del río Aburrá-Medellín.	104
5.19. Comportamiento de los caudales en las estaciones automáticas el 10 de octubre de 2018, La línea naranja representa la magnitud de los caudales horarios, y la línea azul es la magnitud de los caudales minuto a minuto, la línea punteada roja es el máximo valor alcanzado minuto a minuto, y la línea verde punteada es la magnitud máxima del caudal hora a hora.	105
5.20. Mapa de estaciones de aforos sobre el río Aburrá Medellín para la campaña de muestreo de octubre 10 de 2018	107
6.1. Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas.	108
6.2. Comportamiento de la lluvia para el valle de Aburrá durante el 2017	110
6.3. Comportamiento de la lluvia para el valle de Aburrá durante el 2018 según las estaciones de EPM	111
6.4. Comportamiento de la lluvia en las estaciones del SIATA para el valle de Aburrá durante 2017.	113
6.5. Comportamiento de la lluvia en las estaciones del SIATA para el valle de Aburrá durante 2018.	114
6.6. Comportamiento del río Aburrá-Medellín durante las campañas de aforo del año 2017 y 2018	115
6.7. Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del sur del Valle de Aburrá	120
6.8. Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del norte del Valle de Aburrá	121
6.9. Diagrama de bigotes para las diferentes estaciones sobre el río Aburrá Medellín.	123

6.10. Diagrama de bigotes para las diferentes Quebradas afluentes del río Aburrá Medellín.	126
6.11. Clasificación de los niveles de la estación del SIATA 169 - San Miguel (E1) .	127
6.12. Clasificación de los niveles de la estación del SIATA 99 - Aula Ambiental (E8)	128
6.13. Cambio de la relación V_{med}/V_{sup} con respecto a la profundidad del canal, La línea roja corresponde a la evolución de la mediana por intervalos de clase, las líneas negras al rango intercuartil 25-75 %	130
6.14. Curvas de calibración estimadas en los puntos evaluados. La banda de colores representa la velocidad superficial registrada. La línea negra corresponde al ajuste realizado a partir de los datos tomados por el sensor de velocidad, y la roja a estimaciones previas realizadas a partir de aforos.	131

Índice de Tablas

4.1. Cronograma de aforos del año 2017	22
4.2. Parámetros hidráulicos campaña 22 de Febrero de 2017.	28
4.3. Parámetros hidráulicos campaña 8 de Marzo de 2017.	31
4.4. Parámetros hidráulicos campaña 9 de Marzo de 2017.	35
4.5. Parámetros hidráulicos campaña 26 de Abril de 2017.	38
4.6. Parámetros hidráulicos campaña 21 de Junio de 2017.	41
4.7. Parámetros hidráulicos campaña 22 de Junio de 2017.	45
4.8. Parámetros hidráulicos campaña 10 de Julio.	49
4.9. Parámetros hidráulicos campaña 12 de Julio- Q. La Hueso.	53
4.10. Parámetros hidráulicos campaña 12 de Julio- Q. Doña María.	57
4.11. Parámetros hidráulicos campaña 13 Julio	60
4.12. Parámetros hidráulicos campaña 26 de julio.	63
4.13. Parámetros hidráulicos campaña 27 de Julio.	66
4.14. Parámetros hidráulicos campaña 2 de Agosto.	69
4.15. Parámetros hidráulicos campaña 13 de septiembre	72
4.16. Parámetros hidráulicos campaña 14 de Septiembre.	75
4.17. Parámetros hidráulicos campaña 27 de Septiembre.	78
5.1. Cronograma de aforos del año 2018	79
5.2. Parámetros hidráulicos campaña 25 de Abril de 2018.	83
5.3. Parámetros hidráulicos campaña 9 de Mayo de 2018.	87
5.4. Parámetros hidráulicos campaña 10 de Mayo de 2018.	91
5.5. Parámetros hidráulicos campaña 13 de Junio de 2018.	95
5.6. Parámetros hidráulicos campaña 18 de Junio de 2018.	97
5.7. Parámetros hidráulicos campaña 19 de Junio de 2018.	97
5.8. Parámetros hidráulicos campaña 20 de Junio de 2018.	97

5.9. Caudales a lo largo del río Aburrá-Medellín de la campaña de modelación días 5 y 6 de julio	101
5.10. Caudales afluentes de la campaña de modelación días 5 y 6 de julio	102
5.11. Caudales a lo largo del río Aburrá-Medellín de la campaña del 10 de Octubre	106
6.1. Estaciones pluviométricas de la red de EPM.	109
6.2. Régimen de Caudales para las estaciones sobre el Río Aburrá-Medellín . . .	116
6.3. Clasificación del régimen de caudal para el año 2017 parte 1	117
6.4. Clasificación del régimen de caudal para el año 2017 parte 2	118
6.5. Estadísticos Boxplot para las quebradas del sur del Valle de Aburrá	119
6.6. Estadísticos Boxplot para las quebradas del norte del Valle de Aburrá	119
6.7. Régimen de Caudales Quebradas del sur del Valle de Aburrá	120
6.8. Régimen de Caudales Quebradas del Norte del Valle de Aburrá	121
6.9. Clasificación de régimen de caudal para el año 2018 sobre el río Aburrá-Medellín.	122
6.10. Clasificación de régimen de caudal sobre el río Aburrá-Medellín.	124
6.11. Clasificación de caudales en quebradas.	125

1 Introducción

El principal objetivo del SIATA es alertar en tiempo real, a la comunidad y a los organismos gestores del riesgo, sobre las condiciones hidrometeorológicas y la posible ocurrencia de emergencias ambientales. Para lograrlo el SIATA cuenta con diferentes grupos de trabajo, entre ellos, el de Hidrología, el cual se encarga de estudiar las cuencas hidrográficas y sus redes de drenaje para la prevención de riesgos y desastres. Este deber se logra por medio de medición en tiempo real del estado de las corrientes y simulación hidráulica e hidrológica, actividades para las cuales es clave la determinación del caudal transportado en las corrientes. La cuantificación del caudal se realiza por medio de aforos. La utilidad de esto es amplia, pues permiten: (i) analizar la distribución espacial y temporal del agua, (ii) generar curvas de calibración de caudales (útiles para respaldar mediciones en tiempo real del nivel de la lámina de agua), y (iii) calibrar y validar modelos hidrológicos e hidráulicos. Adicionalmente, los aforos son necesarios para el estudio y la simulación del transporte de contaminantes y el análisis de la disponibilidad hídrica. Razón por la cual juegan un papel fundamental para la toma de decisiones en pro de la prevención, manejo y mejoramiento del recurso hídrico.

Las actividades entre el Sistema de Alerta Temprana (SIATA) y la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá (Red Río), definidas en el contrato de ciencia y tecnología 511 de 2017 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la Universidad EAFIT, tienen como fin la determinación de caudales líquidos en los puntos de medición de calidad del agua del Proyecto Red Río.

Como parte del contrato, se presenta en este informe el análisis de los resultados de todas las campañas de medición de caudal realizadas por el equipo SIATA. En éste, se incluye los detalles de la metodología usada, las cuencas hidrográficas asociadas, el resumen de campañas de aforo realizadas y el análisis de resultados. La descripción de las estaciones aforadas se encuentra en el Anexo_1 y el resultado detallado de cada aforo se presenta en el Anexo_2.

2 Objetivos del informe

Objetivo general

- Realizar la medición de caudal en las estaciones de calidad del agua del proyecto RedRío, ubicadas sobre el Río Aburrá-Medellín y sus afluentes.

Objetivos específicos

- Presentar la metodología y los procedimientos llevados a cabo en las campañas de medición de caudal.
- Analizar comparativamente los caudales medidos con: (i) las condiciones meteorológicas relacionadas a la fecha del aforo, y (ii) con los respectivos registros históricos en algunas estaciones de medición.

3 Metodología y descripción de las estaciones

3.1. Metodología.

El aforo líquido es un procedimiento técnico que consiste en tomar mediciones sobre cauce que permitan calcular el caudal del mismo. En la presente sección se desarrolla una metodología que comprende el inventario de los equipos y materiales utilizados, las características que debe cumplir la sección de aforo, el tipo de aforo, el método para el cálculo del caudal y la logística o estrategia de trabajo empleada. Esto con el fin de estandarizar el proceso, agilizar los aforos y minimizar la incertidumbre que se puede presentar durante la toma de datos.

3.1.1. Materiales y equipos.

Antes de realizar la campaña se debe verificar que los equipos y materiales estén en buenas condiciones. Los principales elementos que se utilizan para medir velocidad del flujo son los siguientes:

- OTT MF PRO:

El OTT MF pro (figura 3.1), es un medidor de caudal magnético-inductivo, de fácil manejo y mantenimiento reducido, apto para la medición en cauces naturales y descubiertos según las normas internacionales USGS/ISO. Sus mediciones son fiables en aguas de velocidad baja, en condiciones de turbulencia y cauces con mucha vegetación y en corrientes con alta concentración de sedimentos en suspensión. El rango de medición de velocidad es de 0 a 6 m/s, la precisión asociada es del $\pm 2\%$ cuando se encuentra entre 0 y 3 m/s y $\pm 4\%$ cuando se encuentra entre 3 y 5 m/s. En la Figura 3.1 se presenta una imagen del dispositivo.

- Correntómetros:

El OTT C-31 (figura 3.2), es un correntómetro mecánico que por medio de un molinete mide la velocidad del agua, éste es apto para mediciones en cualquier tipo de cauce. El margen de error asociado a los datos que obtiene es de $\pm 2\%$. En la Figura 3.2 se presenta una imagen del dispositivo.

- Sensor de velocidad Stalker ATS II (*Acoustic Doppler Current Profiler*):

El sensor Stalker ATS II 3.3, es un radar de pistola que utiliza el principio del efecto Doppler para medir la velocidad del flujo, envía un pulso de sonido y mide el cambio



Figura 3.1: OTT MF PRO.



Figura 3.2: Correntometro OTT-c31.

en la frecuencia recibida que se produce por el choque con las partículas o sedimentos en el agua. Se usa para corrientes con alta carga en suspensión que permitan tener una medida precisa del movimiento de las partículas, o en corrientes con lámina de agua muy baja que no permiten la medición con correntómetro. La precisión del instrumento es el dígito entero, redondeado al entero más cercano; en décimas de resolución, a la décima más cercana. En la Figura 3.3 se presenta una imagen del dispositivo.

Como elementos secundarios se utilizan:

- Equipo de topografía: mira topográfica, regla topográfica, aerosol, chazos, cuerdas, flexómetros y cintas aislantes o de color.
- Equipo de seguridad e higiene: guantes de látex, alcohol, agua limpia, gel antibacterial, tapabocas, pañuelos, trajes impermeables, botas plásticas, arnés, escalera y taladro inalámbrico.
- Equipo para la toma de datos: computador, cámara fotográfica, GPS y libreta de apuntes.



Figura 3.3: Pistola Stalker ATS II.

3.1.2. Características de la sección de aforo.

La ubicación de la sección de aforo se determina de acuerdo con las características de la corriente y debe cumplir con algunos requisitos listados a continuación:

- Sección estable: la sección escogida debe ubicarse en un tramo recto y ser lo mas homogénea posible para garantizar la distribución adecuada de las velocidades y del caudal.
- Accesibilidad apta para la seguridad del personal de aforo.
- Flujo uniforme y permanente.
- Las direcciones de flujo en las verticales deben ser paralelas y evitar vórtices, flujo reversible y zonas muertas.
- El lecho no debe presentar obstrucciones o una pendiente que perturbe la distribución de la velocidad.
- La sección debe estar ubicada lejos de estaciones de bombeo y vertimientos para evitar inconsistencias en la relación caudal-nivel que se usa para estimar caudales diarios durante el día de campaña.
- La profundidad de la lámina de agua debe ser suficiente para que el equipo de medición logre registrar adecuadamente la medida.

No es una tarea trivial encontrar una sección hidráulicamente apropiada en cauces naturales, esto se debe a que la dinámica fluvial de los ríos los hace un sistema variable en tiempo y espacio. La tarea es aún más compleja en cauces antropizados, no siempre las estaciones aptas para el monitoreo de calidad de agua coinciden con tramos rectos, sin resaltos, o cumplen condiciones mínimas de seguridad para ingresar al cauce. Esta situación es común en corrientes que presentan condiciones muy variables en el lecho, cauces intervenidos mediante obras hidráulicas, o que presentan procesos avanzados de socavación o acumulación de

basuras. Por tanto, la primera tarea en que incurre el equipo de aforo al llegar al cuerpo de agua es determinar si la sección escogida por el equipo RedRío para el monitoreo de calidad es apropiada hidráulicamente. Si no, se debe escoger otra sobre el mismo tramo hidrológico. Para ello es clave escoger una con el régimen hidrológico más parecido a la inicial, es decir, que la cantidad de agua transportada no se altere en medidas relevantes, que no existan descargas de aguas residuales u otros afluentes. Esto debido a que la cantidad de agua del tramo, es en efecto el interés del equipo RedRío.

3.1.3. Tipos de aforos.

Según el tipo de corriente existen diferentes tipos de aforos. En lo que a aforos se refiere, el tipo de corriente depende exclusivamente de la altura de la lámina de agua y de las velocidades superficiales. Para garantizar la seguridad del personal técnico, solo se puede ingresar al cauce cuando las profundidades son menores a 60cm , y las velocidades superficiales del flujo no superan 1m/s . A continuación se describen los tipos de aforo utilizados durante las campañas y sus limitaciones:

Aforo por vadeo.

Este método permite realizar la medición de velocidades y obtener la geometría de la sección. Se emplea para corrientes de profundidad menor a 60 cm , con fondo fijo y resistente. Además el flujo debe presentar velocidades superficiales menores a 1 m/s , que permita el ingreso de los técnicos y de los equipos sin generar riesgos para los mismos. Para este tipo de aforos, es necesario ingresar al cuerpo de agua teniendo un eje de referencia en la abscisa, y una cuerda que marque las verticales sobre las cuales se realizarán las mediciones. En la figura 3.4 se muestra un esquema que presenta la manera en que se realiza este tipo de aforo.

Aforo por suspensión.

Con este método se realiza la medición de velocidades y se obtiene la geometría de la sección, sin ingresar a la corriente. Esto se logra dotando el equipo de un lastre (peso muerto) que permita aforar la sección desde puntos elevados, tales como puentes. Para las mediciones de velocidad, se hace uso del correntometro C31. Este método es utilizado para las secciones sobre el río Aburrá - Medellín debido a la dificultad para acceder a las fuertes corrientes que se presentan. En la figura 3.5 se muestra un esquema de la forma de medición.

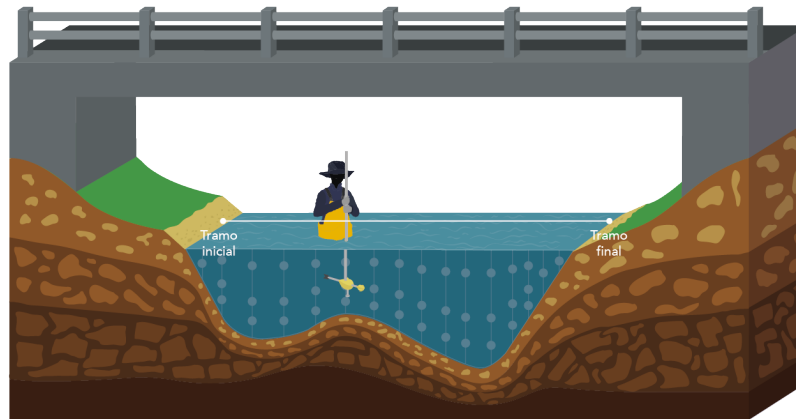


Figura 3.4: Aforo por vadeo en el Río Medellín.

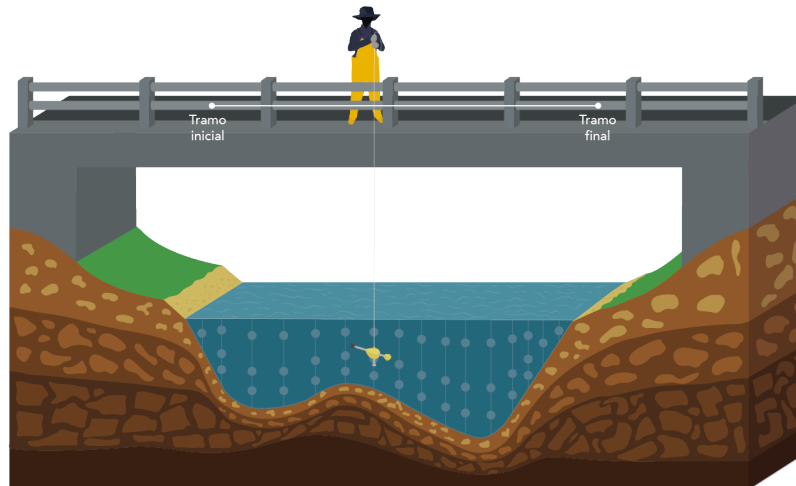


Figura 3.5: Aforo por suspensión.

3.1.4. Método para calcular el caudal.

Para el cálculo del caudal se emplea el método de “área-velocidad”. Se debe determinar un eje de referencia en la orilla del cuerpo de agua. Luego, se divide el cauce en m número de verticales o subsecciones, tal que se garantice que en ninguna transite más del 10% del caudal total. Luego se establece la distribución de las abscisas de tal forma que cubran el canal de una manera uniforme y equidistante, por ejemplo, si la sección tiene un ancho

superficial de 10 metros, se deben poner las cintas con una distancia inferior a un metro. Un mayor número de subsecciones representa menor incertidumbre en el resultado final.

En cada vertical j , donde $(1 \leq j \leq m)$, se mide la distancia al eje inicial u orilla y_i , la velocidad media V_i , la altura de la columna de agua D_i y se registran los datos. La velocidad se mide usando alguno de los equipos ya mencionados y la profundidad con una regla limnimétrica, esto último en caso de no usar el OTT-MFPRO que la mide automáticamente. El caudal se calcula sumando las descargas parciales Q_i sobre las N subsecciones i (Ecuación 3.1).

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N A_i V_i = \sum_{i=1}^N B_i D_i V_i \quad (3.1)$$

Donde A_i es el área y B_i el ancho de la subsección i respectivamente (Le Coz et al., 2012). La discretización de la sección transversal con las verticales, secciones y subsecciones se puede observar en la Figura 3.6.

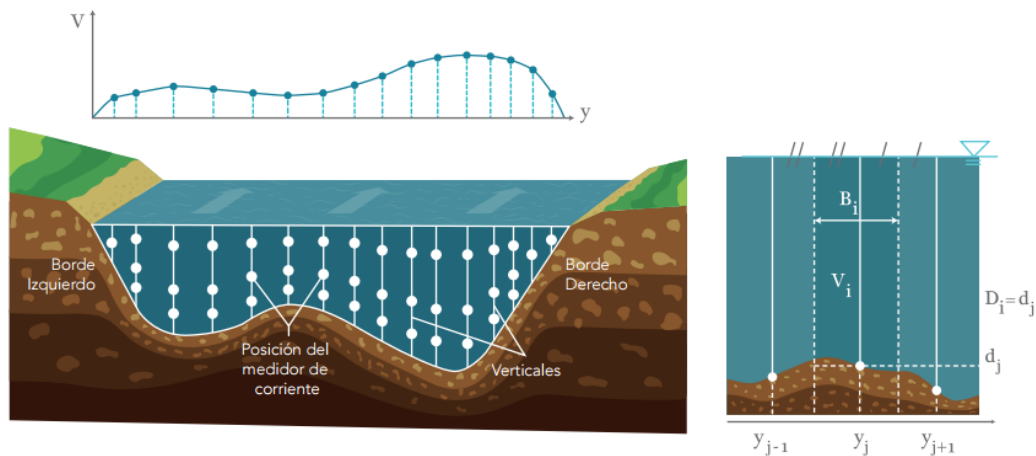


Figura 3.6: Método Velocidad-Área: Discretización de las verticales en la sección transversal y su perfil de velocidad media.

En la figura 3.7 se presenta una foto donde se muestra el procedimiento en campo.

Durante la temporada de lluvias, realizar aforos directamente en el flujo es imposible debido a las grandes velocidades y profundidades que se desarrollan en el cauce, la disponibilidad de sensores de velocidad superficial supone un avance en esta dirección. Cada sensor registra la velocidad de la lámina superficial de agua sobre un punto específico de la sección, sin limitaciones relacionadas con niveles altos en el canal ya que no hay contacto directo, posibilitando la estimación del caudal en un número de casos mayor al obtenido mediante aforos, y permite tener estimaciones durante crecientes.



Figura 3.7: Toma de datos con correntómetro y sensor de velocidad superficial.

El caudal es estimado mediante relaciones entre la V_{sup} (velocidad superficial) y la V_{med} (velocidad media de la sección). La estimación del caudal a partir de V_{sup} se realiza mediante la ecuación 6.2, en donde A corresponde al área de la sección transversal según el nivel de la lamina de agua y F_v es el factor de relación entre V_{med}/V_{sup} .

$$Q = F_v \cdot V_{sup} \cdot A \quad (3.2)$$

El valor de F_v reduce la magnitud de V_{sup} de manera que sea similar a V_{med} , sin embargo, este valor tiende a variar entre secciones. Estas variaciones parecen estar asociadas a características de la geometría hidráulica de cada sección. Según (Costa. et al.), numerosas observaciones y medidas, muestran que en canales naturales, la velocidad del flujo se incrementa en la vertical con el logaritmo de la distancia tomado desde el fondo del canal, la velocidad cambia rápidamente cerca a la capa límite del fondo, y más lentamente hacia el centro del flujo, como resultado del comportamiento logarítmico, la velocidad media de cada vertical se ubica aproximadamente a 60% de la altura de la lámina de agua. Debido al avance en la recolección de velocidades superficiales con sensores que no tienen contacto con el agua, y asumiendo que el perfil de velocidades tiene un comportamiento logarítmico, la velocidad superficial se transforma a la velocidad media del canal mediante un factor que se encuentra entre 0.8 y 0.9.

3.1.5. Estrategia de trabajo.

Para cada día de campaña establecido por el equipo RedRío se establecen dos comisiones, una para la zona sur y otra para la zona norte del Valle de Aburrá. Esto, con el fin de optimizar la elaboración de los aforos. Al llegar a la corriente se escoge la sección a aforar y se define el tipo de aforo a realizar. Si el tipo es por vadeo, se ensambla el correntómetro asegurando que la hélice gire apropiadamente y que esté correctamente lubricada, las personas que vayan a ingresar al cauce deben utilizar traje impermeable, guantes de látex y tapabocas. Si el tipo de aforo es por suspensión, se ensambla el correntómetro acoplándole un lastre para ingresarlo a la corriente, en caso de ser necesario, el personal debe usar arnés. Finalmente se toman las medidas, se toma nota las observaciones pertinentes del aforo y el cauce, y se toma un registro fotográfico que evidencie las características más importantes de la sección de aforo.

3.1.6. Administración y manejo de datos.

Los datos obtenidos de los diferentes dispositivos de medida, se apuntan en una libreta de campo o se digitan directamente en un computador portátil, donde se les realiza un preproceso, garantizando que los medidas sean consistentes con lo que se observa en el cauce. Se recomienda graficar el levantamiento topográfico in-situ con el software diseñado por el SIATA, para observar cómo se va generando la sección y corregir posibles errores. Es muy importante anotar la fecha, hora de inicio y fin del aforo y hacer una descripción detallada del sitio, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, esto en orden de alimentar el procesamiento de datos en la oficina. Una vez terminado el aforo se suben los datos al servidor del SIATA.

3.1.7. Método para calcular los caudales horarios.

Los datos de altura de la lámina de agua que son tomados en la sección transversal cada hora por el equipo RedRío, son procesados para obtener los caudales durante toda la jornada, desde las 6:00 h. hasta las 18:00 h. Para el cálculo se toma la altura de la lámina de agua en la hora del aforo y con el caudal estimado mediante el aforo líquido, se calculan el resto de caudales horarios de manera proporcional. Se asume que la velocidad media es la misma que la del aforo, al igual que los demás parámetros hidráulicos fijos en cada estación. Por esta razón es clave que la sección elegida para aforar mantenga el mismo régimen hidrológico durante todo el día.

4 Resultados de Campaña realizada en 2017

En la presente sección se realiza un análisis general de los aforos realizados por el equipo SIATA a lo largo de la fase VI del Proyecto RedRío. A continuación se presenta el cronograma y el tipo de campaña que se llevo a cabo en cada fecha.

Tabla 4.1: Cronograma de aforos del año 2017

Campaña	Tipo de Campaña	Fecha
Campaña 1	Muestra completa	22-02-17
Campaña 2	Muestreo quebradas	08-03-17
Campaña 3	Muestreo quebradas	09-03-17
Campaña 4	Muestra completa	26-04-17
Campaña 5	Modelación	21-06-17
Campaña 6	Modelación	22-06-17
Campaña 7	Muestra completa	10-07-17
Campaña 8	Modelación	12-07-17
Campaña 9	Modelación	13-07-17
Campaña 10	Muestreo quebradas	26-07-17
Campaña 11	Muestreo quebradas	27-07-17
Campaña 12	Muestra completa	02-08-17
Campaña 13	Muestreo quebradas	13-09-17
Campaña 14	Muestreo quebradas	14-09-17
Campaña 15	Muestra completa	27-09-17

En las figuras 4.1, 5.6 y 5.9 se presentan, respectivamente, las estaciones aforadas sobre el cauce principal del río Aburrá-Medellín (13 estaciones) y sobre algunos tributarios del mismo (24 estaciones). En ellas se especifica nombre, código y caudal promedio aforado en la estación, el promedio se calculó en base a los aforos comprendidos entre el 22 de Febrero y el 29 de Septiembre de 2017.

Los aforos sobre el río se realizaron durante las campañas de 2017-02-22, 2017-03-26, 2017-07-10, 2017-08-02 y 2017-09-27. Los realizados sobre las quebradas tributarias se realizaron durante las campañas de 2017-03-08 y 09, 2017-07-26 y 27 y 2017-09-13 y 14. Finalmente los aforos realizados en campañas de modelación tuvieron lugar en 2017-06-21 (Q. La Madera), 2017-06-22 (Q. La García), 2017-07-12 (Q. La Hueso y La María).

Una modificación importante en las campañas de aforo se dio a partir del 2017-04-26, ya que se cambió la manera de calcular el caudal de la estación San Miguel. Los caudales presentados antes de la fecha fueron obtenidos mediante aforo directo en la sección. Después de la fecha, fueron obtenidos mediante la adición del caudal aforado en el afluente inmediatamente anterior (Q. La Mina) y el caudal de un punto aguas arriba de la confluencia.

El cálculo de los caudales en las estaciones del río se hacen a partir de los aforos realizados directamente sobre la corriente del río, a excepción de las estaciones Niquía, Puente Gabino y descarga PTAR San Fernando. Los caudales de la estación "Descarga PTAR San Fernando", son obtenidos de las mediciones que realiza EPM (Empresas públicas de Medellín). El caudal de la estación Puente Gabino se estima mediante curva de calibración a partir de los registros de profundidad de la lámina de agua, suministrados por una estación de EPM.

El caudal de la estación Niquía se calcula mediante la adición de los caudales de la estación inmediatamente anterior (Puente Machado) y el afluente (Q. La Rodas), esto debido a que no existe ninguna estructura de la cual se pueda realizar un aforo por suspensión y debido a la profundidad de las aguas en el sector es imposible realizar un aforo por vadeo. Se debe aclarar que el caudal presentado en Niquía está siendo subestimado, ya que además de la quebrada La Rodas, existen otros tres afluentes en la ladera oriental: quebrada La Trinidad y dos afluentes sin nombre; en la ladera occidental existen dos grandes afluentes: quebrada La Seca, quebrada Niquía (POMCA, 2007).

A lo largo de este capítulo se presentan los resultados de aforo de cada campaña. En cada resumen de campaña se presentan gráficas con los caudales aforados en cada estación, estos se presentan siguiendo el orden de cota de las estaciones, los caudales de las estaciones Q. La Mina y Q. Rodas se presentan en un eje secundario. Adicionalmente se presenta un breve análisis espacio-temporal de la lluvia del día anterior y el correspondiente al aforo.

Para facilitar la lectura de los resultados, se debe tener en cuenta que el análisis espacial de la lluvia se hace mediante un mapa de lluvia acumulada sobre la cuenca del río Aburrá-Medellín. Éste se construye a partir de la lluvia derivada del radar meteorológico del AMVA; y representa el acumulado de lluvia de radar en cada pixel de la cuenca en un lapso de 36 horas (desde las 6:00 h del día anterior al aforo, hasta las 18:00 h del día del aforo).

Por otro lado, el análisis temporal se realiza basado en el hietograma de la lluvia ocurrida en el período antes mencionado. Éste se construye promediando el campo de lluvia sobre la cuenca, para cada paso del tiempo. Adicionalmente, para cada resumen de campaña se presenta una tabla que resume y analiza los parámetros hidráulicos más importantes medidos por el dispositivo de aforo y que hace parte del ejercicio de medición.

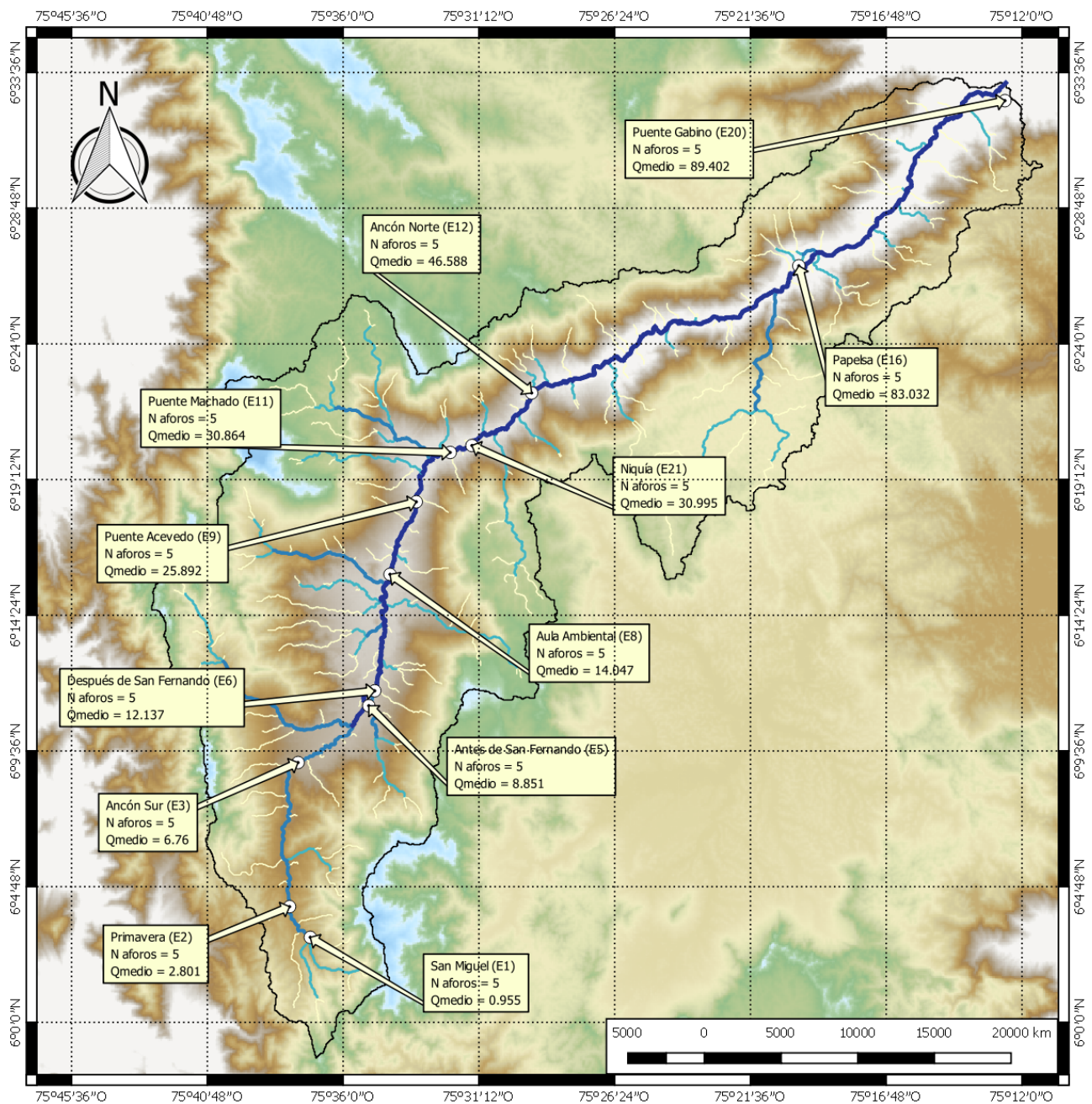


Figura 4.1: Mapa de estaciones de aforo sobre el río Aburrá-Medellín

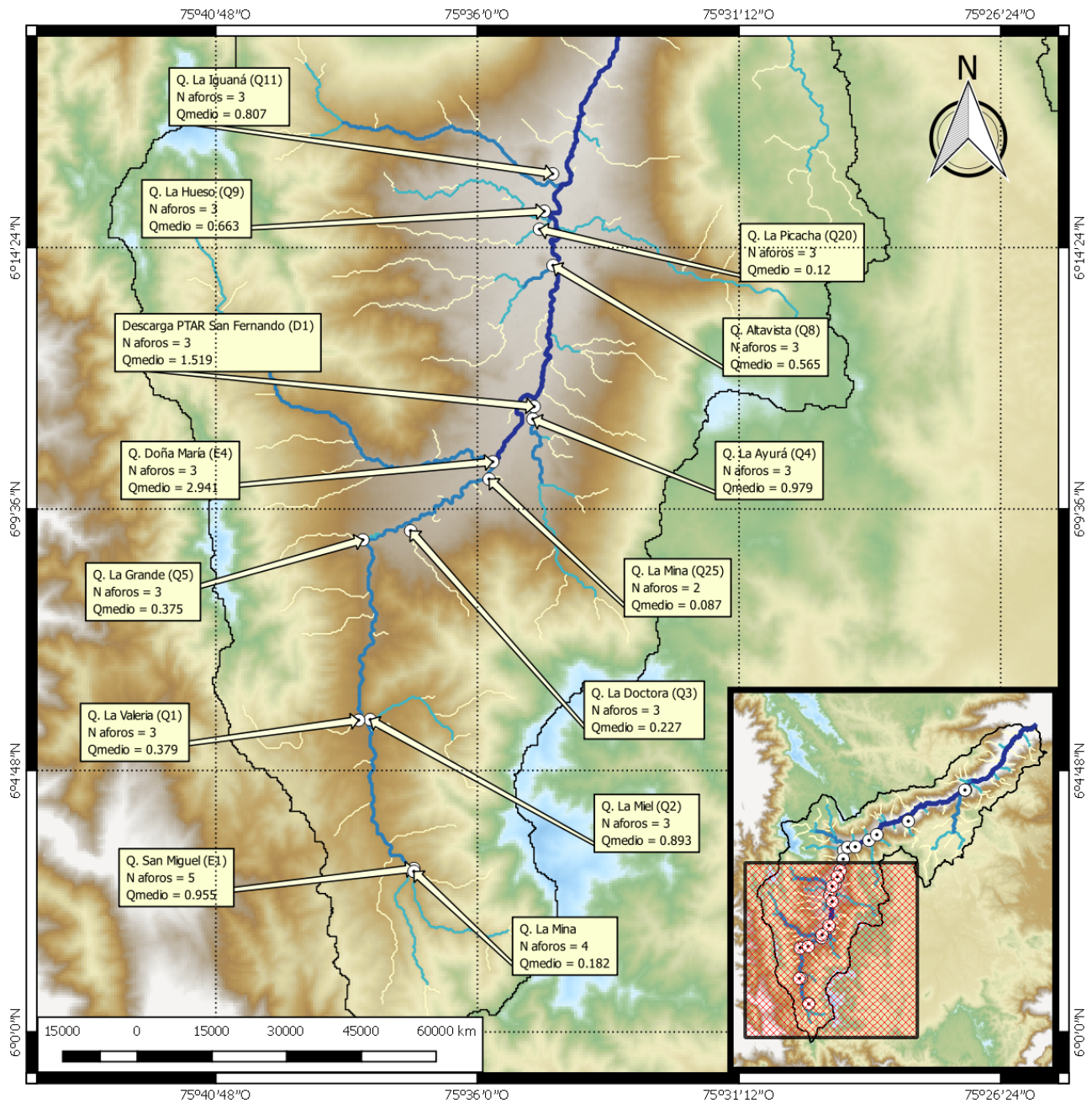


Figura 4.2: Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona sur.

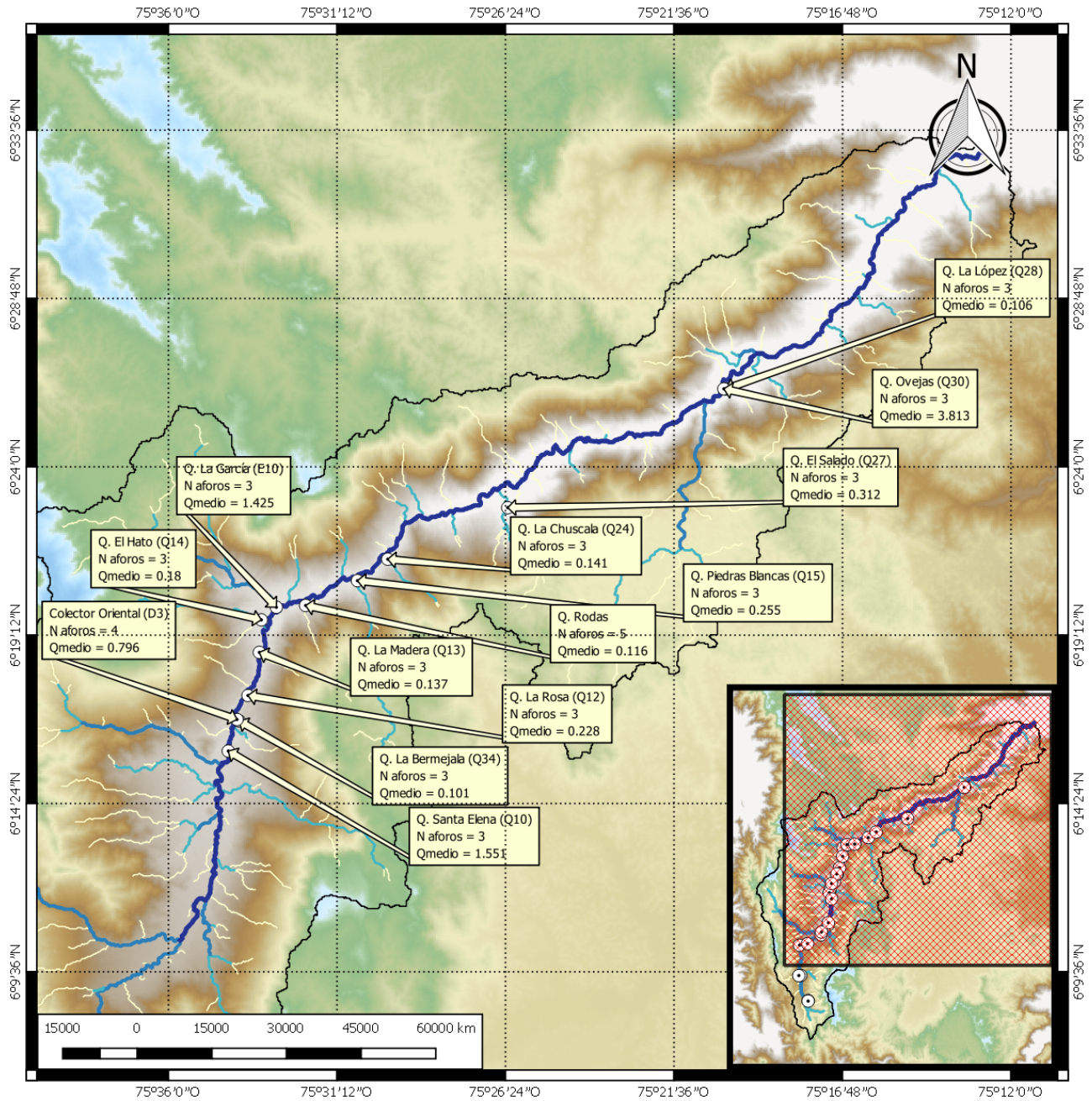


Figura 4.3: Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona norte.

4.1. Campaña 22 de Febrero

4.1.1. Análisis de Lluvia

En el recuadro de la izquierda de la figura 4.4 se muestra la localización de la precipitación acumulada sobre la cuenca, durante un periodo de 36 horas, de 6 am del día anterior, hasta las 6 de la tarde del día del aforo. En el gráfico de la derecha de la misma, se presentan las intensidades de lluvia promedio y la intensidad acumulada para el mismo lapso de tiempo. El evento de precipitación de mayor importancia, ocurrió el 21 de febrero de 2017, a las 4:00 pm, sobre la zona sur-centro del Valle de Aburrá, con acumulados que superaron los 100 *mm*. Además, la mayor intensidad en el periodo de 36 horas fue de 6 *mm/h*, las sub-cuencas que se localizan en la zona sur-occidental del valle de Aburrá fueron las que tuvieron una mayor influencia a las lluvias presentadas.

Durante la campaña de aforo, no se presentaron lluvias de gran intensidad sobre la cuenca, solo se evidenció un evento de menor magnitud después de las 4:00 pm, el cual no tuvo una respuesta significativa sobre el río Aburrá-Medellín, de tal modo que no se vieron afectados los resultados de caudal obtenidos para las estaciones de aforo.

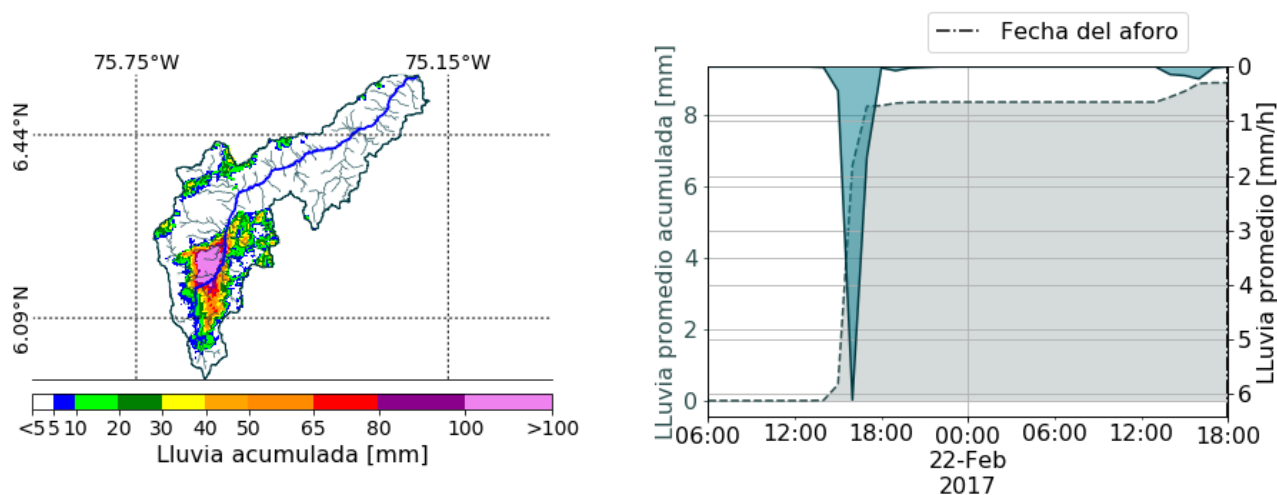


Figura 4.4: Lluvia Campaña 22 de Febrero.

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1048_Informe_Evento_precipitacion_\(2017-02-22\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1048_Informe_Evento_precipitacion_(2017-02-22).pdf)

4.1.2. Análisis de resultados

En la tabla 4.2, se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de la estación de aforo. Los caudales incrementan con el área aferente, sin embargo, las velocidades varían de estación a estación, presentando las mayores velocidades en estaciones como Aula ambiental (E8) y Ancón Norte (E12). Por otro lado, las estaciones con menores velocidades fueron Ancón Sur y Antes de San Fernando. Los demás parámetros aumentan a medida que el canal se va ensanchando y adquiriendo mayor caudal, esto debido, a los aportes recibidos por las quebradas afluentes y a otras descargas.

Tabla 4.2: Parámetros hidráulicos campaña 22 de Febrero de 2017.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
San Miguel (E1)	0.5	0.58	0.86	4.09	0.25	0.21
Primavera (E2)	1.08	0.5	2.18	8.27	0.27	0.26
Ancón Sur (E3)	1.18	0.22	5.4	15.54	0.36	0.35
Antes de San Fernando (E5)	2.13	0.27	7.83	19.22	0.43	0.41
Después de San Fernando (E6)	7.38	0.55	13.34	21.4	0.67	0.62
Aula Ambiental (E8)	8.69	0.73	11.87	41.44	0.29	0.29
Puente Acevedo (E9)	18.14	0.64	28.5	37.92	0.76	0.75
Q. Rodas	0.03	0.09	0.31	2.15	0.16	0.14
Puente Machado (E11)	18.84	0.64	29.49	25.73	1.17	1.15
Niquía (E21)	18.86	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	24.73	0.74	33.22	27.47	1.33	1.21
Papelsa (E16)	24.57	0.68	36.24	31.77	1.15	1.14
Puente Gabino (E20)	45.66	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

En la Figura 4.5, se presenta un diagrama de barras con los caudales obtenidos en cada estación. Como se espera el comportamiento de los caudales incrementa en cada estación del río, a excepción de la estación Papelsa (E16); la cual tuvo un comportamiento atípico ya que hacia las horas de la mañana presentaba niveles muy bajos y solo hasta después del medio día los niveles aumentaron llegando a sus niveles normales.

El gran salto de caudal que se ven en la imagen entre la estación Papelsa y Puente Gabino (E20), se explica debido a que entre estas dos estaciones se encuentra la descarga de Riogrande, que aporta un gran caudal al río Aburrá-Medellín.

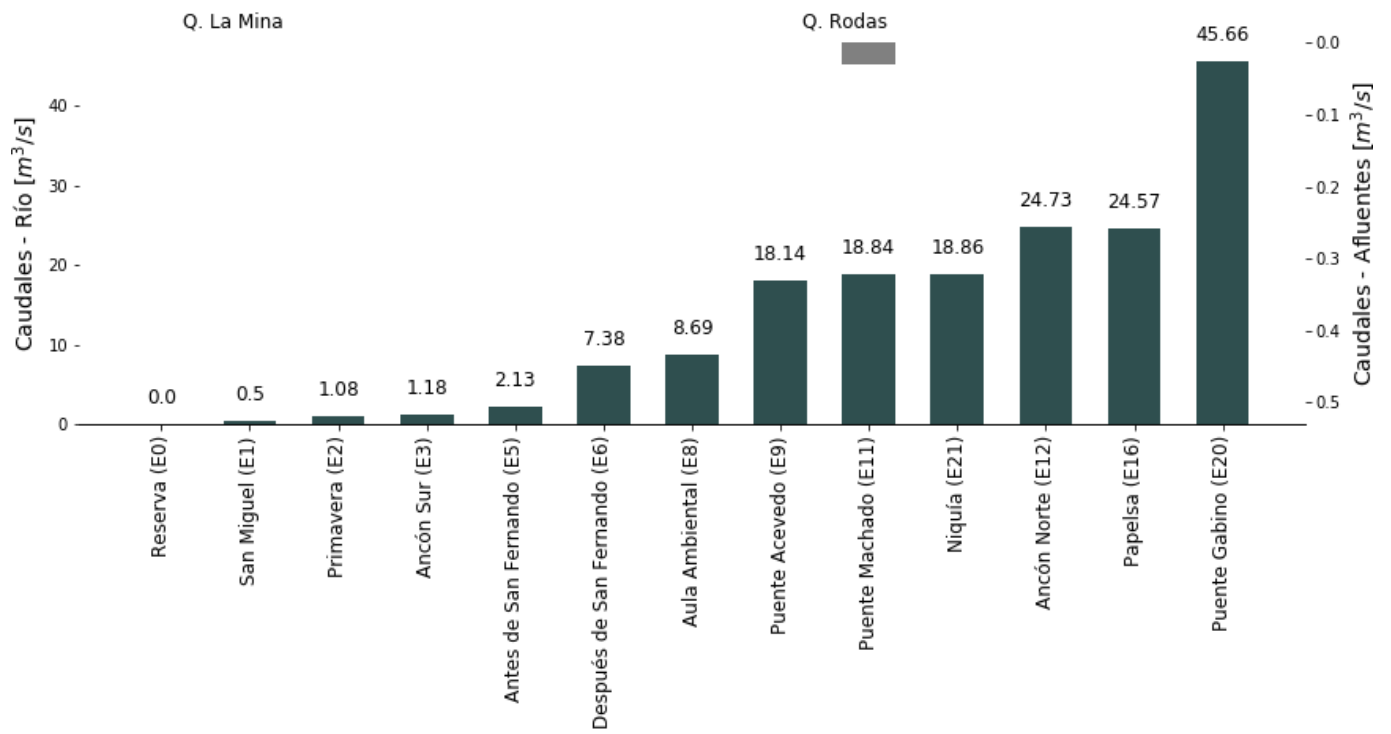


Figura 4.5: Resultados Campaña 22 de Febrero

4.2. Campaña 08 de Marzo

4.2.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.6, se muestra la lluvia que se precipitó sobre la cuenca un día antes de la campaña. En la gráfica de la izquierda, se muestra la localización del evento de lluvia sobre la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, especialmente en la cuenca de Doña María, perteneciente al municipio de Itagiú. La Lluvia registró un promedio máximo de 3.5 mm/h, seguidos por diferentes eventos de precipitación de menor intensidad, localizados sobre la misma ladera del Valle de Aburrá, con un promedio de lluvia acumulada de 35 mm.

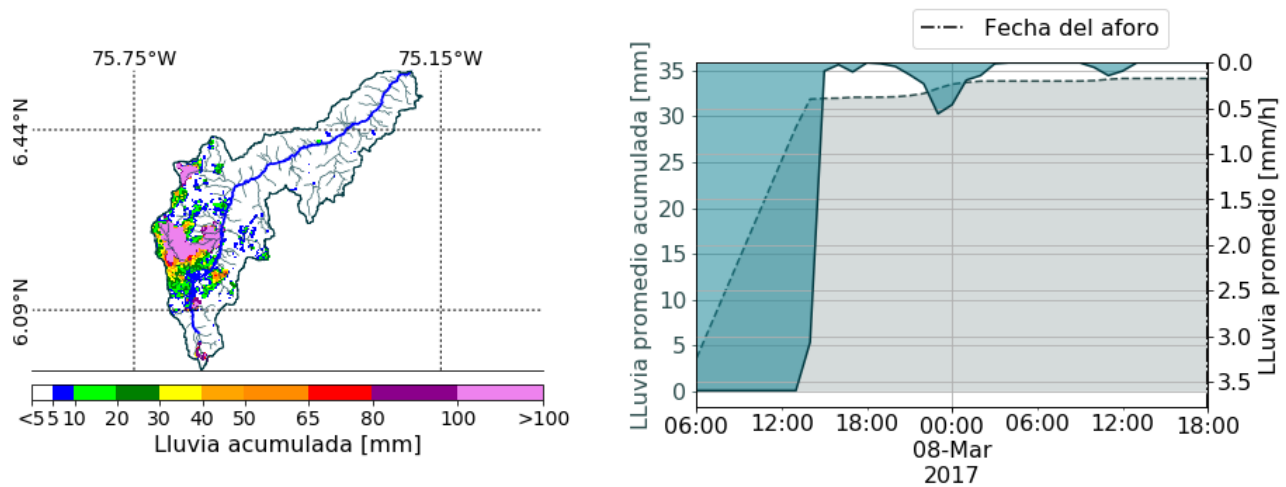


Figura 4.6: Lluvia Campaña 08 de marzo

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, en los que se puede ver detalladamente los eventos que afectaron la cuenca el día anterior, se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1059-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-03-07\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1059-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-03-07).pdf)

4.2.2. Análisis de resultados

En la Figura 4.7 se observan los resultados de caudal de las 12 estaciones aforadas. Los valores de esta campaña fueron muy similares a la mediana histórica de cada estación. Las quebradas La Valeria y la Grande estuvieron ligeramente por debajo de la mediana; las quebradas La Picacha y La Bermejala fueron muy inferiores al dato de la mediana. Las demás estaciones estuvieron ligeramente por encima de la mediana, excepto la quebrada Doña María (E4), cuyo caudal fue muy superior, debido a la lluvia que se presentó el día anterior al día del aforo, y que dejó un acumulado de 33 mm en la cuenca.

En la tabla 4.3 se puede corroborar que los mayores caudales de la campaña se midieron en las quebradas Doña María y La Ayurá. Así mismo, estas quebradas tienden a presentar los mayores valores en los demás parámetros hidráulicos al tener las mayores dimensiones. Sólo el parámetro de la velocidad, cambia para algunas estaciones, en donde a pesar de que se trata de un canal de dimensiones grandes, presenta bajas velocidades, como el caso de la quebrada La Ayurá, o el caso contrario con la quebrada La Hueso, donde alcanza velocidades muy altas en relación con las dimensiones del canal.

Tabla 4.3: Parámetros hidráulicos campaña 8 de Marzo de 2017.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Valeria (Q1)	0.2	0.59	0.33	2.81	0.12	0.12
Q. La Miel (Q2)	0.82	0.91	0.9	5.03	0.18	0.18
Q. La Grande (Q5)	0.35	0.4	0.87	4.06	0.2	0.22
Q. La Doctora (Q3)	0.19	0.26	0.73	4.43	0.18	0.16
Q. La Mina (Q25)	0.09	0.7	0.13	1.81	0.07	0.07
Q. Doña María (E4)	5.19	0.85	6.08	13.52	0.41	0.45
Q. La Ayurá (Q4)	1.47	0.5	2.93	4.65	0.66	0.63
Descarga PTAR San Fernando (D1)	1.41	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. Altavista (Q8)	0.85	0.81	1.04	9.0	0.11	0.12
Q. La Picacha (Q20)	0.09	0.77	0.12	1.3	0.26	0.09
Q. La Hueso (Q9)	1.06	1.45	0.73	2.61	0.28	0.28
Q. La Bermejala (Q34)	0.06	0.21	0.3	3.32	0.09	0.09

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

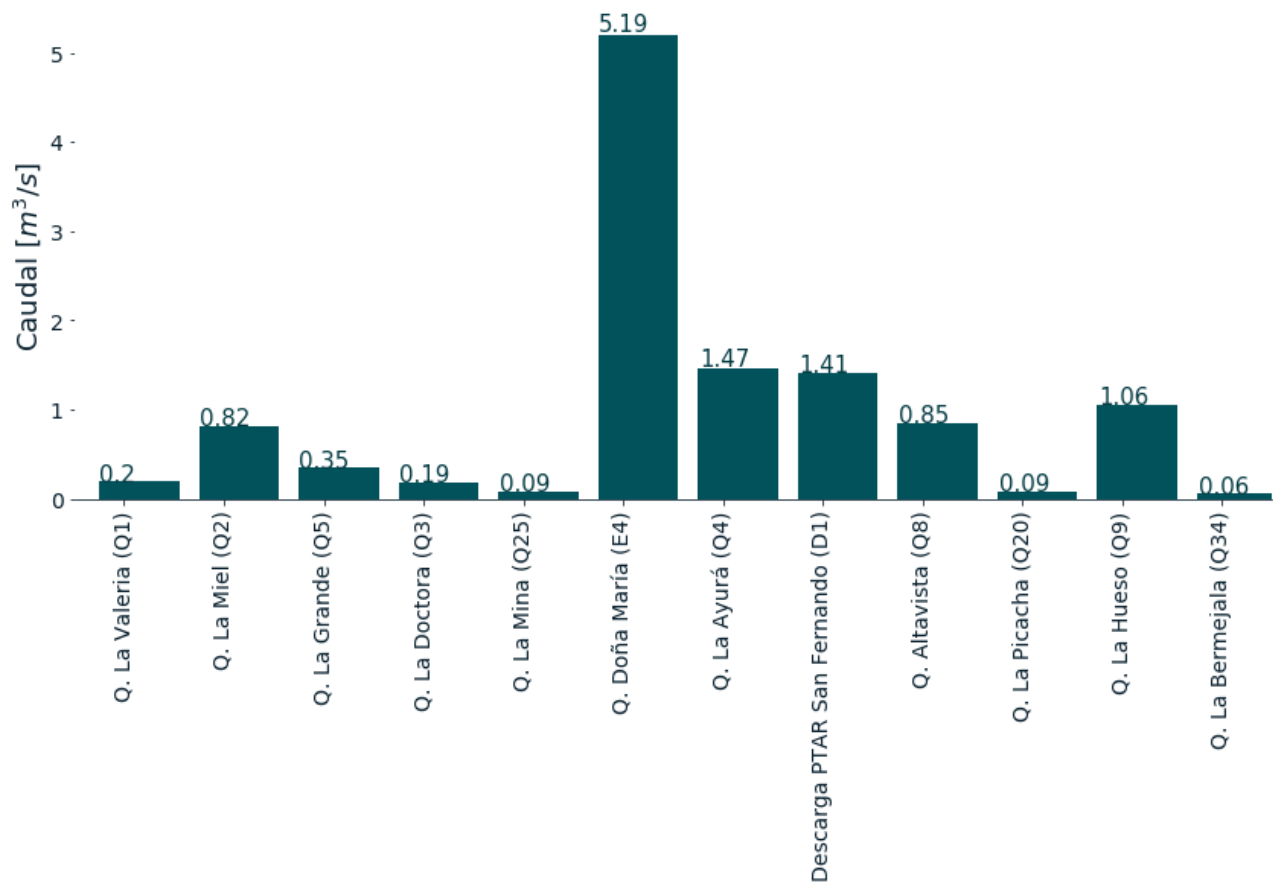


Figura 4.7: Resultados Campaña 8 de Marzo de 2017.

4.3. Campaña 09 de Marzo

4.3.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.8 se muestra la lluvia sobre la cuenca el día de la campaña. En la gráfica de la izquierda se muestra la localización del evento de lluvia sobre la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, afectando la cuenca de la quebrada Doña María, desde las 12:30 pm hasta las 6:00 pm del día del aforo. Se reportaron dos eventos de precipitación, el primero de ellos se presentó el 8 de Marzo a las 12:00 am, con una intensidad promedio en la cuenca de 0.18 mm/h el segundo evento se presentó el día 09 de Marzo a las 3:00 pm, una intensidad promedio en la cuenca de de 2 mm/h y un promedio de la lluvia acumulada en la cuenca, que alcanzó un máximo de 3 mm en 36 horas.

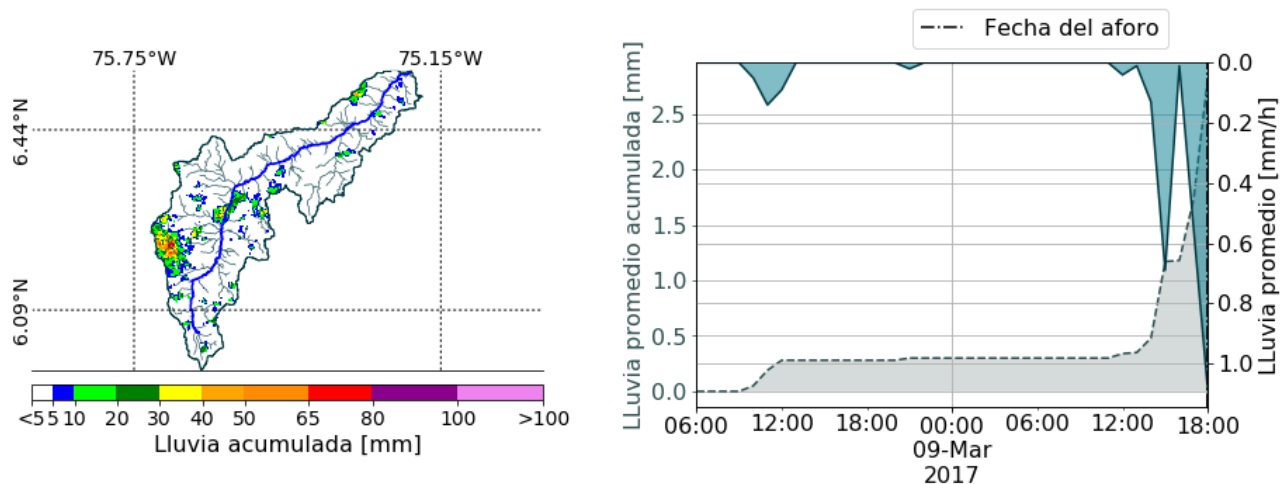


Figura 4.8: Lluvia Campaña 09 de marzo

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1060-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-03-09\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1060-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-03-09).pdf)

4.3.2. Análisis de resultados

Debido a que las quebradas aforadas en esta campaña pertenecen a la zona norte del Valle de Aburrá, no se vieron afectados sus caudales por la lluvia que se presentó durante toda la tarde sobre la cuenca de la quebrada Doña María. La Figura 4.9 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación de la campaña, con el objetivo de visualizar las quebradas que aportan mayores caudales al río Medellín. En esta gráfica se observa que las quebradas que mayor caudal aportan son la quebrada Ovejas (Q30), Santa Elena (Q10), La García (E10), y el colector oriental (Q3). Por otra parte se encuentran las quebradas con los caudales mas bajos de la campaña ($<0.5 \text{ m}^3/\text{s}$), como la quebrada La Rosa (Q12), La Madera (Q13), El Hato(Q14), La Chuscala (Q24) y La López (Q28).

Al comparar los resultados de caudal de cada estación con la mediana histórica, se observa que casi todos los caudales fueron muy similares al valor medio del caudal de la estación, a excepción de las estaciones Q. La Rosa (Q12), Q. La García(E10), Q. La López (Q28), Q. Ovejas(Q30), que presentan valores muy inferiores a la mediana. La explicación de este comportamiento se puede atribuir a las condiciones secas que predominaron en la zona Norte de la cuenca antes del aforo, y a las pocas lluvias que se presentan en el mes de Marzo, según el ciclo interanual de lluvias.

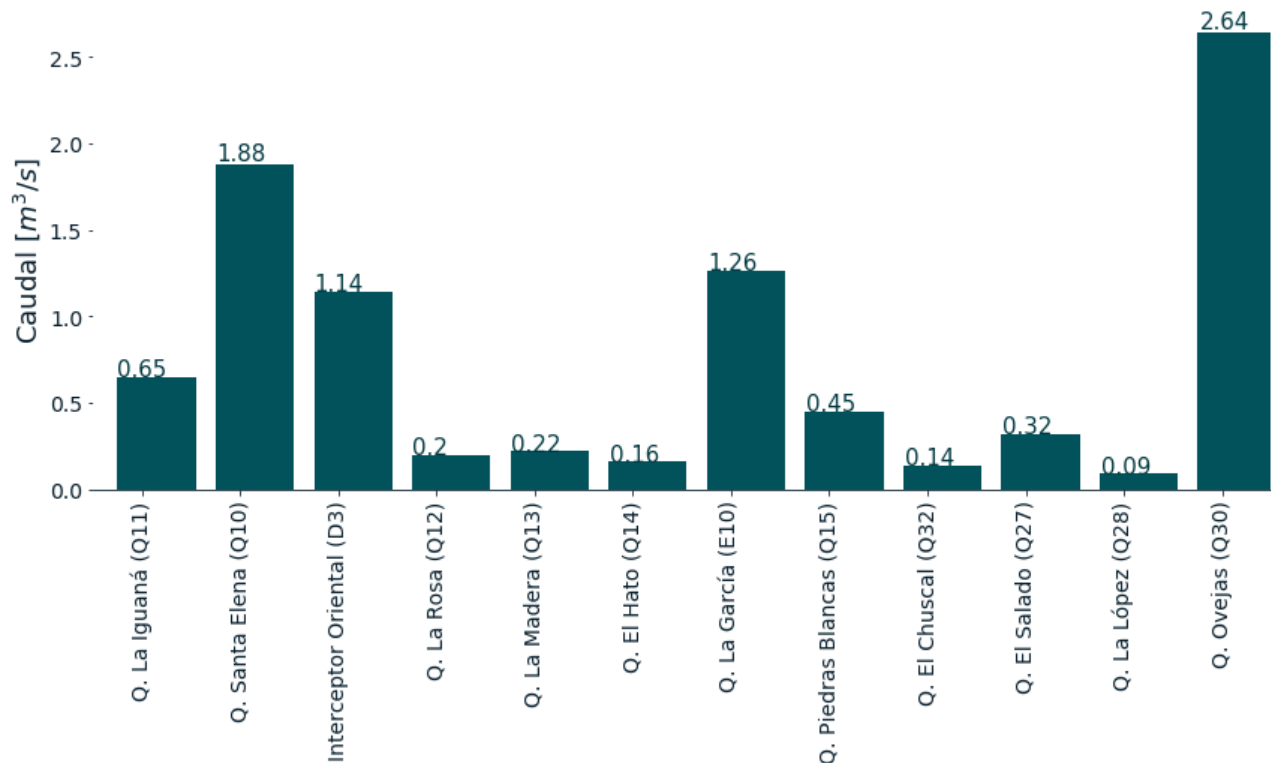


Figura 4.9: Resultados Campaña 09 de marzo.

En la tabla 4.4 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de la estación de aforo. Se puede observar una tendencia al aumento del caudal junto con el área y el perímetro mojado, mientras que la velocidad y la altura media se comportan de manera independiente, de acuerdo de las características del lecho, las bancas y la pendiente media del canal. El radio hidráulico, siendo la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, siendo una medida para calcular la pérdida de flujo en canales no circulares, y que varía según la forma geométrica del canal.

Tabla 4.4: Parámetros hidráulicos campaña 9 de Marzo de 2017.

	Q_t . [m^3/s]	V_m . [m/s]	A_t . [m^2]	P_m . [m]	H_m . [m]	R_h . [m]
Q. La Iguaná (Q11)	0.65	1.12	0.58	7.36	0.08	0.08
Q. Santa Elena (Q10)	1.88	0.79	2.4	10.06	0.24	0.24
Interceptor Oriental (D3) 1	0.77	1.22	0.63	3.35	0.18	0.19
Interceptor Oriental (D3) 2	0.37	0.45	0.83	6.34	0.13	0.13
Interceptor Oriental (D3)	1.14	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. La Rosa (Q12)	0.2	0.74	0.27	2.98	0.09	0.09
Q. La Madera (Q13)	0.22	0.46	0.49	2.95	0.18	0.17
Q. El Hato (Q14)	0.16	0.13	1.17	3.79	0.35	0.31
Q. La García (E10)	1.26	0.43	2.92	8.43	0.36	0.35
Q. Piedras Blancas (Q15)	0.45	0.3	1.51	5.57	0.4	0.27
Q. El Chuscal (Q32)	0.14	0.38	0.37	2.55	0.16	0.14
Q. El Salado (Q27)	0.32	0.29	1.11	5.05	0.23	0.22
Q. La López (Q28)	0.09	0.38	0.23	1.75	0.15	0.13
Q. Ovejas (Q30)	2.64	0.64	4.1	9.3	0.45	0.44

Q_t . = Caudal total, V_m . = Velocidad promedio, A_t . = Área total, P_m . = Perímetro mojado, H_m . = Profundidad media, R_h . = Radio hidráulico.

4.4. Campaña 26 de Abril

4.4.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.10 se muestra la lluvia precipitada sobre la cuenca en una ventana de 36 horas. En la gráfica de la izquierda se muestra la localización de los mayores acumulados del evento de lluvia sobre la ladera sur-occidental del Valle de Aburrá. El evento de lluvia inició en la tarde del día anterior al aforo y se extendió hasta la mañana del aforo. En este periodo se presenta una intensidad moderada-alta sobre la zona sur y centro-occidental del Valle de Aburrá, con intensidad máxima y acumulado promedio en la cuenca de 1.75 mm/h y $5,5 \text{ mm}$ respectivamente (ver recuadro derecho Figura 4.10).

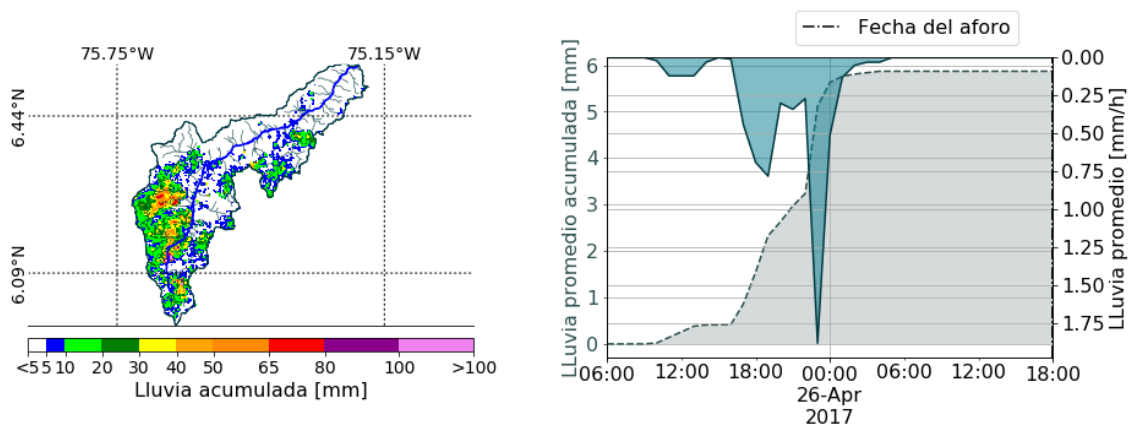


Figura 4.10: Lluvia Campaña 26 de Abril

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

https://www.siata.gov.co:9998/tree/Aforos/redrio_salida/20170927/Q-La_Clara/fotos

4.4.2. Análisis de resultados

La Tabla 4.5 muestra los resultados de caudal y parámetros hidráulicos en cada estación. Los caudales aforados aumentan dirección aguas abajo, esto debido a la acumulación de área aferente de las cuencas. Sin embargo, las velocidades no presentan la misma evolución, por lo que dependen de características hidráulicas del tramo. Las mayores velocidades se presentaron en Papelsa, Ancón norte, Ancón Sur y Antes de San Fernando.

Para la mayoría de las estaciones se presentaron los máximos caudales históricos aforados, esto debido a la condición de lluvia precedente a la fecha del aforo. El régimen de caudales registrado a lo largo del día muestra consistencia con las condiciones climáticas de la temporada de lluvias y al evento de lluvia antes descrito. Las estaciones con altos incrementos son consecuentes con los puntos de descarga importantes a lo largo del eje del río, específicamente sobre los sitios de descarga de la planta San Fernando y Tasajera.

la Figura 4.11 muestra el resumen de caudales, para representar y monitorear el aumento de caudales a través del río Aburrá-Medellín.

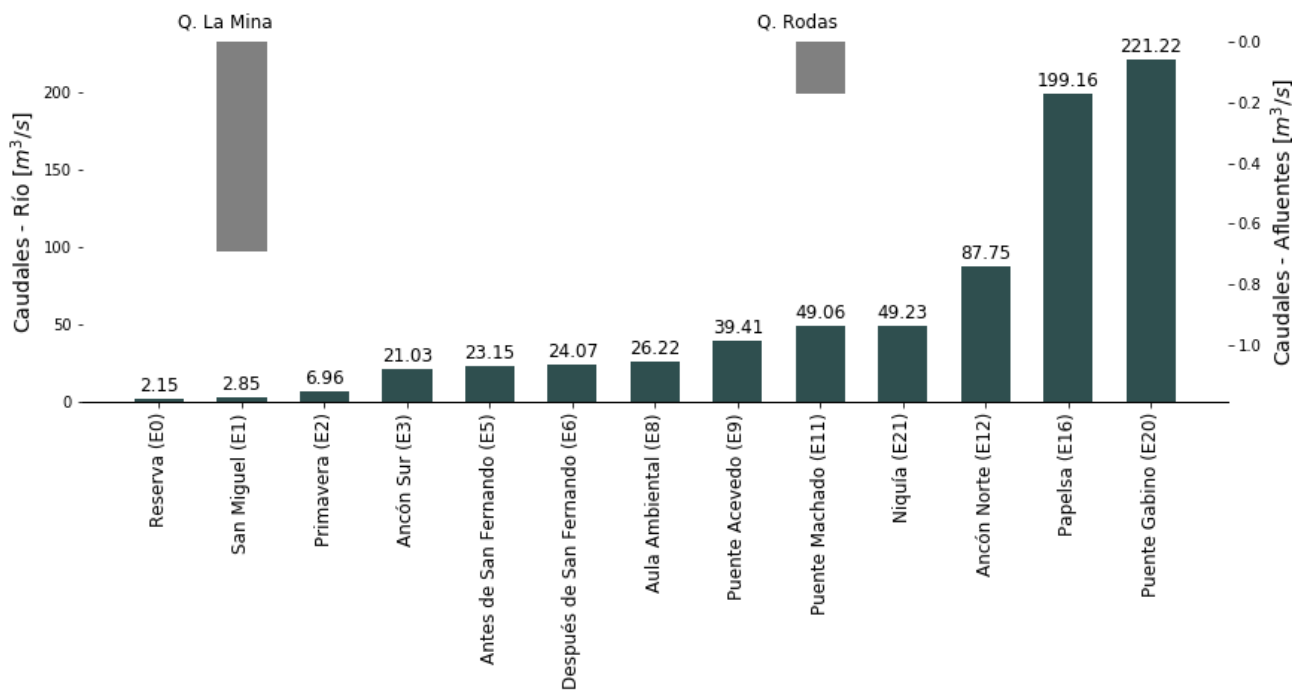


Figura 4.11: Resultados Campaña 26 de Abril

Tabla 4.5: Parámetros hidráulicos campaña 26 de Abril de 2017.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Reserva (E0)	2.15	1.36	1.58	3.99	0.49	0.4
Q. La Mina	0.69	0.55	1.26	3.66	0.26	0.34
San Miguel (E1)	2.85	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Primavera (E2)	6.96	1.44	4.83	8.92	0.6	0.54
Ancón Sur (E3)	21.03	1.68	12.52	16.49	0.84	0.76
Antes de San Fernando (E5)	23.15	1.52	15.23	20.02	0.83	0.76
Después de San Fernando (E6)	24.07	1.21	19.91	21.87	1.0	0.91
Aula Ambiental (E8)	26.22	1.52	17.25	40.74	0.43	0.42
Puente Acevedo (E9)	39.41	1.1	35.84	39.33	0.94	0.91
Q. Rodas	0.17	0.7	0.24	1.34	0.24	0.18
Puente Machado (E11)	49.06	1.16	42.3	27.98	1.57	1.51
Niquía (E21)	49.23	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	87.75	1.58	55.72	29.99	2.12	1.86
Papelsa (E16)	199.16	1.83	109.11	44.51	2.51	2.45
Puente Gabino (E20)	221.22	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.5. Campaña de modelación del 21 de Junio- Q. La Madera

En la figura 4.12 se muestra la cuenca de la quebrada la Madera con los 5 puntos que se aforaron, 4 de ellos ubicados sobre el cauce principal de la quebrada (puntos 1,2,4,5), y uno ubicado sobre la quebrada La Negra (punto 3), uno de sus principales afluentes. En la primera estación de aforo, ubicada en la parte alta de la cuenca, se realizó el cálculo del caudal por medio de aforo volumétrico debido al bajo caudal. En los otros puntos se realizó el aforo por vadeo, con correntómetros OTT MF PRO en condiciones climáticas normales.

La figura 4.14, muestra un resumen de los caudales obtenidos en cada estación. Adicionalmente, en la tabla 4.6 se muestra un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes. Debido a que el cálculo del caudal, en la estación M1, se realizó mediante aforo volumétrico, los parámetros hidráulicos asociados a esta estación no aparecen en la tabla.

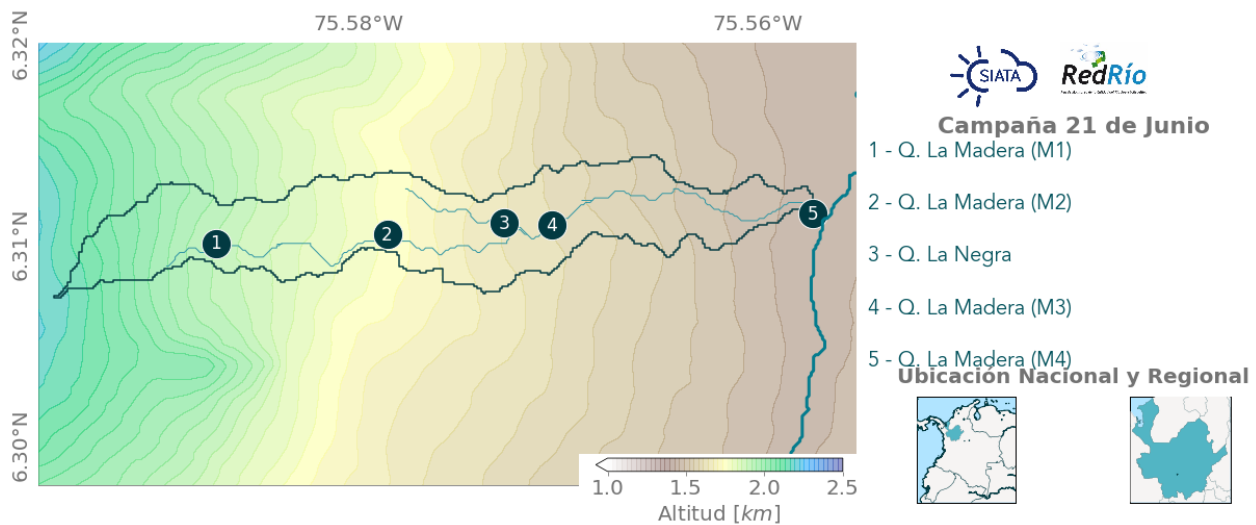


Figura 4.12: Mapa Campaña 21 de Junio.

4.5.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.13, se muestra la lluvia que se precipitó sobre la cuenca en una ventana de 36 horas de monitoreo, desde las 6:00 am del día anterior, hasta las 6:00 pm del día del aforo. En la gráfica de la izquierda, se muestra la localización del evento de lluvia muy cerca a la divisoria de la cuenca. En el recuadro derecho de la misma figura, se observa que se presentó un evento de lluvia a las 12:00 pm del día anterior, cuya intensidad promedio fue de 1.50 mm/h, dejando un acumulado promedio que alcanzó valores entre 2 y 2.5 mm de lluvia.

Debido a que la lluvia se presentó en los extremos de la cuenca, sobre la divisoria, y a que sus intensidades y acumulados fueron bajas, se puede concluir que estos eventos no interfirieron con los caudales medidos en la campaña.

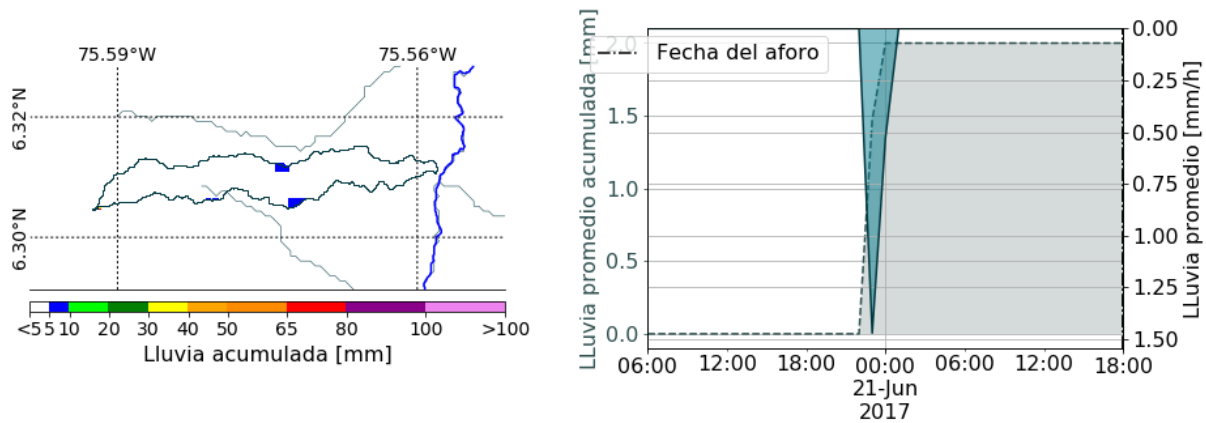


Figura 4.13: Lluvia Campaña 21 de Junio.

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1149-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-06-21\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1149-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-06-21).pdf)

4.5.2. Análisis de resultados

Se observa el aumento del caudal hacia aguas abajo en la cuenca, a medida que las estaciones se acercan al punto de descarga. Las velocidades, por el contrario muestran mayores valores en la parte alta de la cuenca, debido a que el caudal que transporta la quebrada pasa en estas estaciones por secciones de ancho muy reducido. Los demás parámetros hidráulicos, se comportan de acuerdo a la variación en la geometría del canal, la cual cambia constantemente, al comportarse como una corriente natural en la mayoría de los tramos hacia aguas arriba de la zona urbana y como una corriente confinada, en la zona urbana con alta densidad poblacional e industrial.

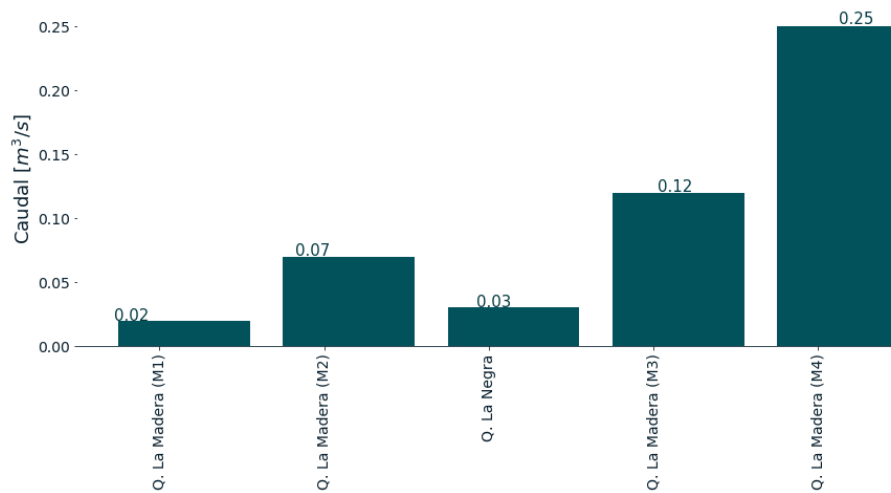


Figura 4.14: Resultados Campaña 21 de Junio.

Tabla 4.6: Parámetros hidráulicos campaña 21 de Junio de 2017.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Madera (M1)	0.02	0.68	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. La Madera (M2)	0.07	0.42	0.18	1.84	0.09	0.1
Q. La Negra	0.03	0.21	0.15	1.28	0.11	0.12
Q. La Madera (M3)	0.12	0.16	0.77	4.54	0.17	0.17
Q. La Madera (M4)	0.25	0.37	0.68	2.87	0.24	0.24

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.6. Campaña de modelación del 22 de Junio - Q. La García

En la Figura 4.15 se muestra parte de la cuenca de la quebrada La García, con las 10 estaciones de la campaña de modelación del día 22 de junio. 6 de estas estaciones (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) se encontraban sobre el cauce principal de la quebrada y 3 afluentes: Q. El Barro, Q. La Chiquita, y Q. Pachelli. De estos afluentes, no fue posible ingresar a la quebrada La Chiquita, porque las condiciones del flujo no eran seguras para el personal. En las estaciones restantes los aforos se realizaron por vadeo, ya que las condiciones de la corriente lo permitían. En la Figura 4.16 se presenta un resumen de los caudales obtenidos durante la campaña. La Tabla 4.6 completa la información de caudales con otros parámetros hidráulicos importantes.

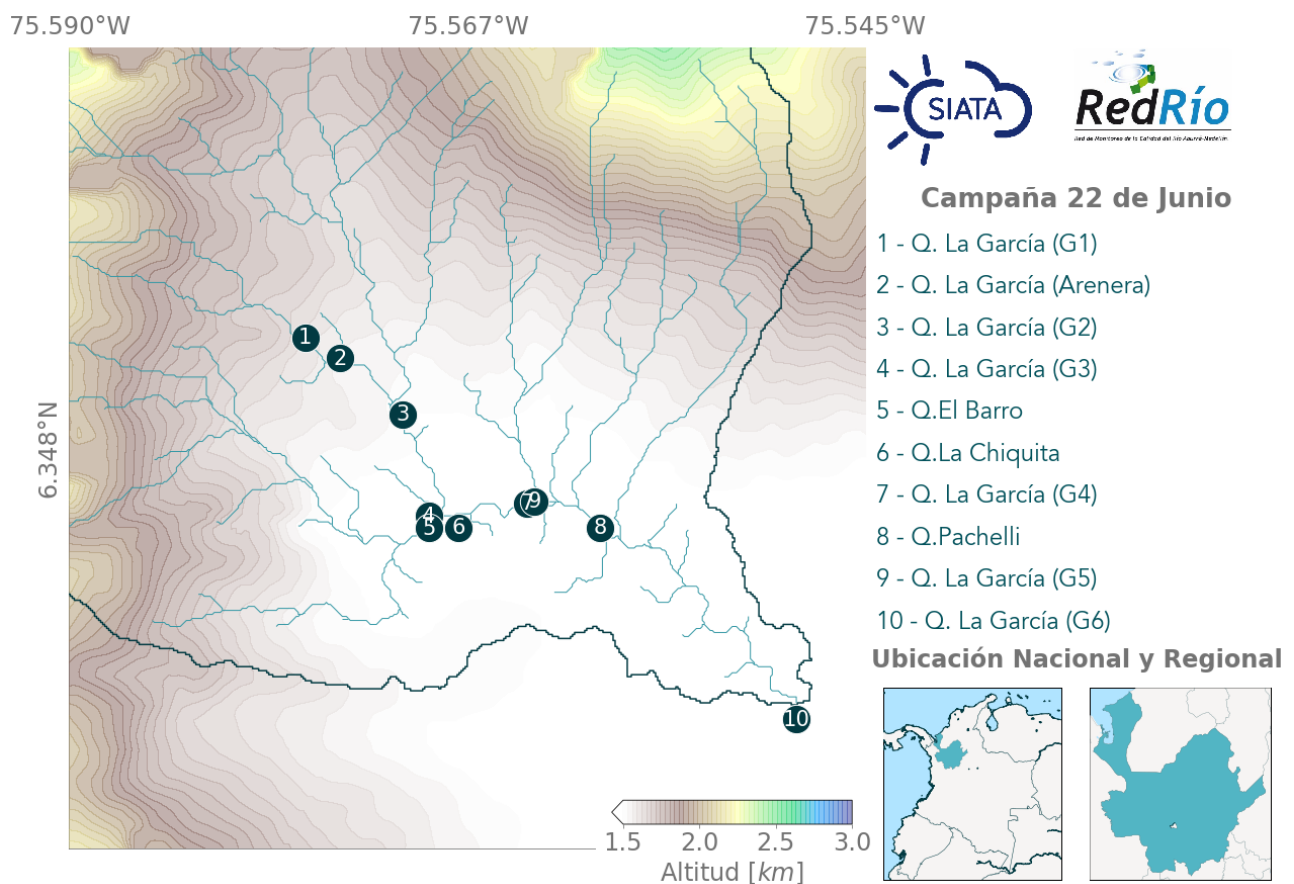


Figura 4.15: Mapa Campaña 22 de Junio.

4.6.1. Análisis de Lluvia

Durante las 36 horas de monitoreo de lluvia, desde las 6:00 am del día 21 de Junio, hasta las 18:00 hrs del día del aforo, no se presentaron eventos de precipitación sobre la cuenca. La información se puede consultar en el reporte de lluvia que genera el SIATA,, que se puede consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1151-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-06-22\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1151-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-06-22).pdf)

4.6.2. Análisis de resultados

La figura 4.16 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación el día del aforo, con el objetivo de visualizar la evolución del caudal en el recorrido de la quebrada. En la figura, se muestra que los caudales aumentan paulatinamente, conforme se alejan de la parte alta de la cuenca. Los afluentes como el Barro y Pachelli, aportan caudales muy bajos en comparación al caudal que aporta la quebrada la Chiquita, cuya descarga es considerable en comparación al caudal que transporta el cauce principal de la quebrada.

La quebrada recibe gran cantidad de descargas de aguas residuales, que además de los aportes de caudal de los afluentes, incrementan el volumen de agua transportada por la corriente de manera significativa hacía las estaciones ubicadas aguas abajo. La diferencia entre los valores máximos de caudal, que se presentan en las estaciones ubicadas en la parte baja de la cuenca, y los valores mínimos de caudal de la parte alta sugieren que la corriente recibe mucho caudal en su recorrido debido en parte a las descargas de aguas residuales domesticas directamente sobre la quebrada, y a vertimientos de aguas industriales, de varias empresas que descargan también directamente en el cauce.

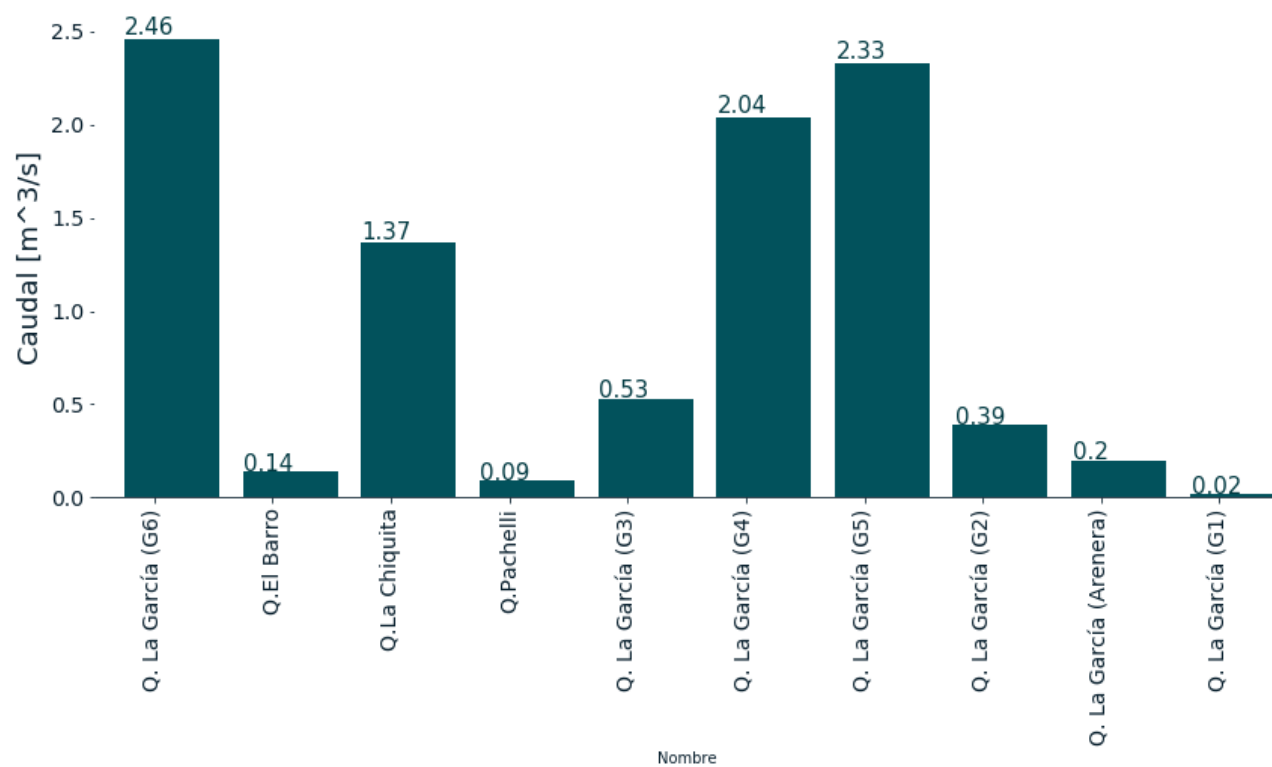


Figura 4.16: Resultados Campaña 22 de Junio.

En la tabla 4.2, se presentan los parámetros hidráulicos de mayor relevancia para cada estación. Los resultados de los aforos muestran el aumento de los caudales y de los parámetros hidráulicos asociados a la geometría del canal conforme se acercan a la descarga de la quebrada en el río Medellín, mientras que las velocidades y las alturas medias varían en cada estación.

Tabla 4.7: Parámetros hidráulicos campaña 22 de Junio de 2017.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La García (G1)	0.02	0.33	0.07	1.4	0.05	0.05
Q. La García (Arenera)	0.2	0.58	0.35	1.77	0.2	0.2
Q. La García (G2)	0.39	0.68	0.58	4.04	0.13	0.14
Q. La García (G3)	0.53	0.46	0.64	3.06	0.21	0.21
Q.El Barro	0.14	0.57	0.25	2.41	0.1	0.1
Q.La Chiquita	1.37	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. La García (G4)	2.04	0.85	2.41	5.67	0.42	0.42
Q.Pachelli	0.09	1.2	0.07	1.32	0.06	0.06
Q. La García (G5)	2.33	0.87	2.69	10.61	0.26	0.25
Q. La García (G6)	2.46	0.46	3.25	22.82	0.13	0.14

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

Los cambios en el alineamiento y la pendiente media del canal, afectan los parámetros hidráulicos de cada estación, sobretodo las velocidades del flujo. Las mayores velocidades se presentan en la descarga de las quebradas Pachelli y la García (G5), pero al llegar a la última estación (G6) la velocidad disminuye notablemente. Este comportamiento se puede explicar con el cambio de pendiente de la quebrada, ya que Pachelli y G5 se compone de un sistema de cascadas, seguidos por contracciones en el canal, que aceleran la velocidad del flujo, en contraste con las bajas pendientes del tramo de descarga de la quebrada, en donde las velocidades disminuyen. En la quebrada La Chiquita, no fue posible el ingreso a la corriente por las altas velocidades y la profundidad de la lámina de agua, por lo que el cálculo del caudal se realizó mediante pistola de velocidad superficial.

4.7. Campaña 10 de Julio

4.7.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.17, se muestra la lluvia que se precipitó sobre la cuenca el día de la campaña. En la gráfica de la izquierda, se muestra la localización del evento de lluvia sobre la zona sur del Valle de Aburrá. El recuadro de la derecha de la figura 4.17, muestra los registros de la intensidad promedio y acumulada de la lluvia, en un lapso de tiempo de 36 horas. En el recuadro se puede ver una lluvia que se precipitó el día del aforo en horas de la tarde, después de las 12:00 am, con un promedio de intensidad de lluvia de 0.050 [mm/h]. La lluvia se intensificó hacia las 5:00 pm alcanzando un valor de 0.2 [mm/h] y un acumulado de 0.67 mm.p

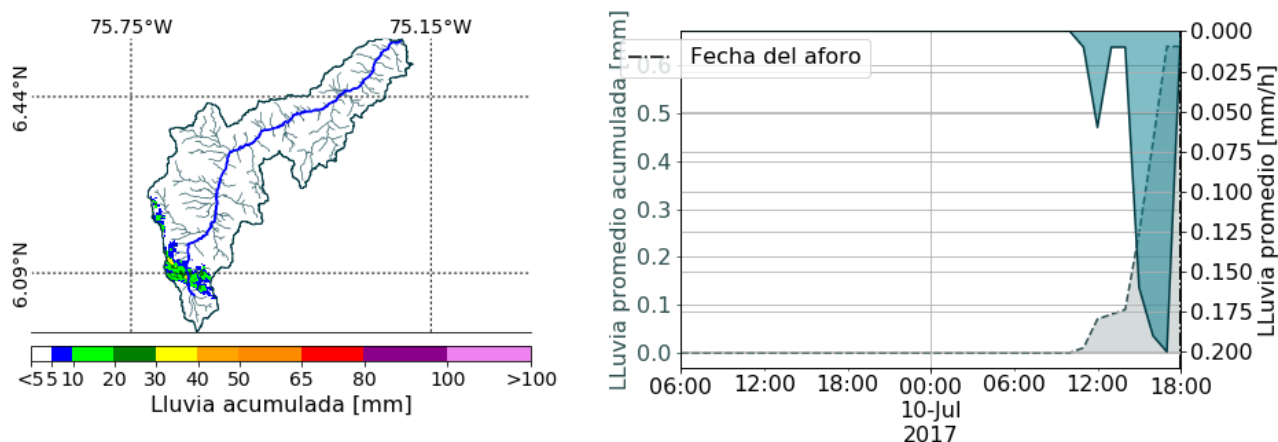


Figura 4.17: Lluvia Campaña 10 de Julio.

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1164-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-07-11\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1164-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-07-11).pdf)

4.7.2. Análisis de resultados

En la figura 4.18 se observa que hay un aumento del caudal por encima de lo normal, en las estaciones Puente Acevedo (E9) y Ancón Norte (E12). Entre la estación Aula Ambiental (E8) y Puente Acevedo (E9), la diferencia de caudal se debe a que aportan caudal, además del interceptor oriental, las quebradas El Molino, La Bermejala, La Rosa y La Herrera, además de 4 corrientes sin nombre en la ladera oriental (POMCA, 2007). En la ladera occidental se encuentran las quebradas Malpaso y Quintana. Entre las estaciones Niquía y Ancón Norte se encuentran las quebradas Piedras Blancas y el Chuscal además de otras corrientes menores, que hacen que el caudal aumente de forma notable.

En la tabla 4.8, se puede observar el aumento de los parámetros hidráulicos relacionados con la geometría del canal a medida que se acercan a la salida de la cuenca, esto ocurre con el área, el perímetro, la altura media, pero no con el radio hidráulico, ni con la velocidad. El radio hidráulico como relación entre el área mojada y el perímetro mojado, sirve como medida de control para las velocidades en cada estación, ya que ante un aumento en el radio hidráulico, las velocidades también tienden a aumentar.

La velocidad depende de muchos factores y varía en cada estación de acuerdo a la profundidad y a los materiales que conforman el lecho y las paredes del canal. En la estación Papelsa y Ancón Norte se presentan las mayores velocidades, seguidas por Puente Acevedo y Antes de San Fernando (E5). En Papelsa y Ancón norte se puede atribuir el aumento de velocidades a la profundidad del canal y al volumen de caudal que transporta el río. Así mismo, en estas estaciones se presentan los mayores radios hidráulicos.

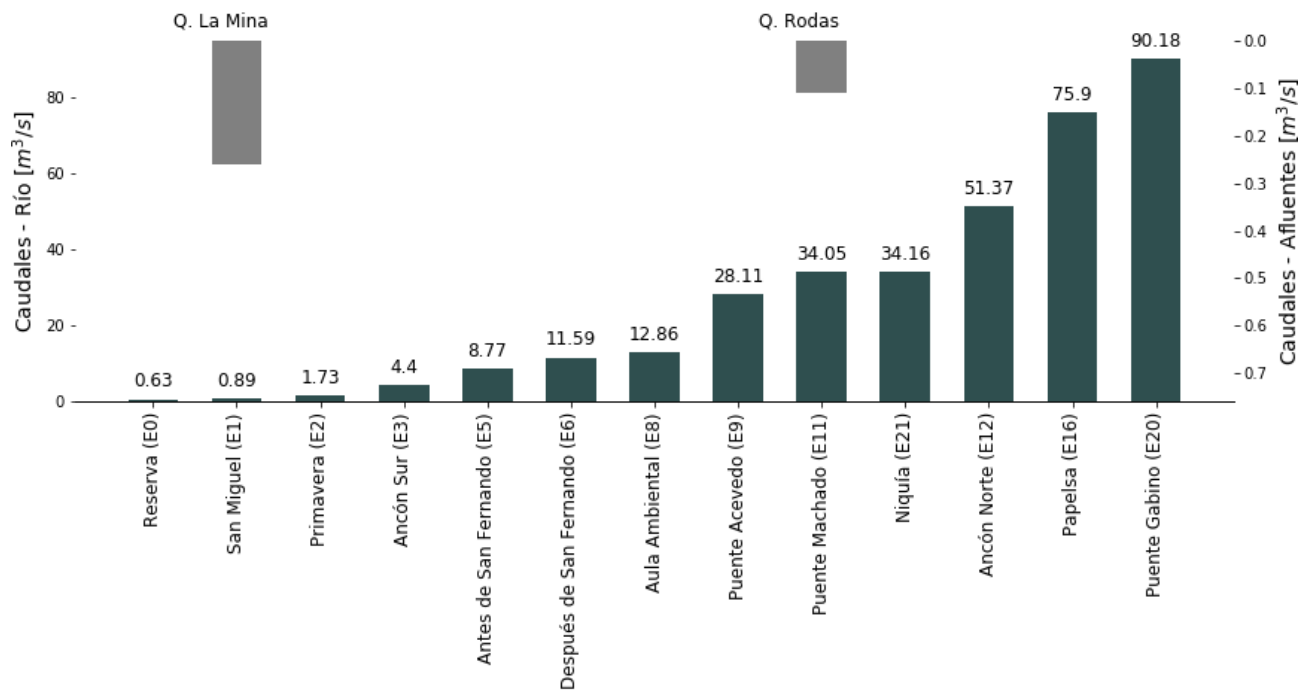


Figura 4.18: Resultados Campaña 10 de Julio.

Tabla 4.8: Parámetros hidráulicos campaña 10 de Julio.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Reserva (E0)	0.63	0.84	0.74	3.36	0.25	0.22
Q. La Mina	0.26	0.38	0.7	3.64	0.2	0.19
San Miguel (E1)	0.89	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Primavera (E2)	1.73	0.71	2.42	7.46	0.35	0.32
Ancón Sur (E3)	4.4	0.69	6.42	15.54	0.44	0.41
Antes de San Fernando (E5)	8.77	0.86	10.24	20.94	0.51	0.49
Después de San Fernando (E6)	11.59	0.76	15.33	21.62	0.77	0.71
Aula Ambiental (E8)	12.86	0.77	16.73	41.7	0.41	0.4
Puente Acevedo (E9)	28.11	0.86	32.62	38.47	0.86	0.85
Q. Rodas	0.11	0.27	0.4	2.16	0.21	0.19
Puente Machado (E11)	34.05	0.94	36.27	26.41	1.41	1.37
Niquía (E21)	34.16	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	51.37	1.41	36.42	28.75	1.4	1.27
Papelsa (E16)	75.9	1.34	56.65	33.93	1.74	1.67
Puente Gabino (E20)	90.18	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.8. Campaña de modelación del 12 de Julio - Q. La Hueso

En la figura 4.19 se muestra la cuenca de la quebrada La Hueso, su red de drenaje y los puntos de aforo sobre el cauce principal y sus afluentes. En total fueron 5 puntos de aforo, 4 puntos sobre el cauce principal (H1,H2,H4,H5) y uno sobre la quebrada Ana Díaz. En todas las estaciones fue posible realizar el aforo por vadeo con el dispositivo OTT MF-PRO. En la figura 4.21 se presenta un resumen de los caudales y en la tabla 4.9 se presentan además del caudal, los parámetros hidráulicos más importantes.

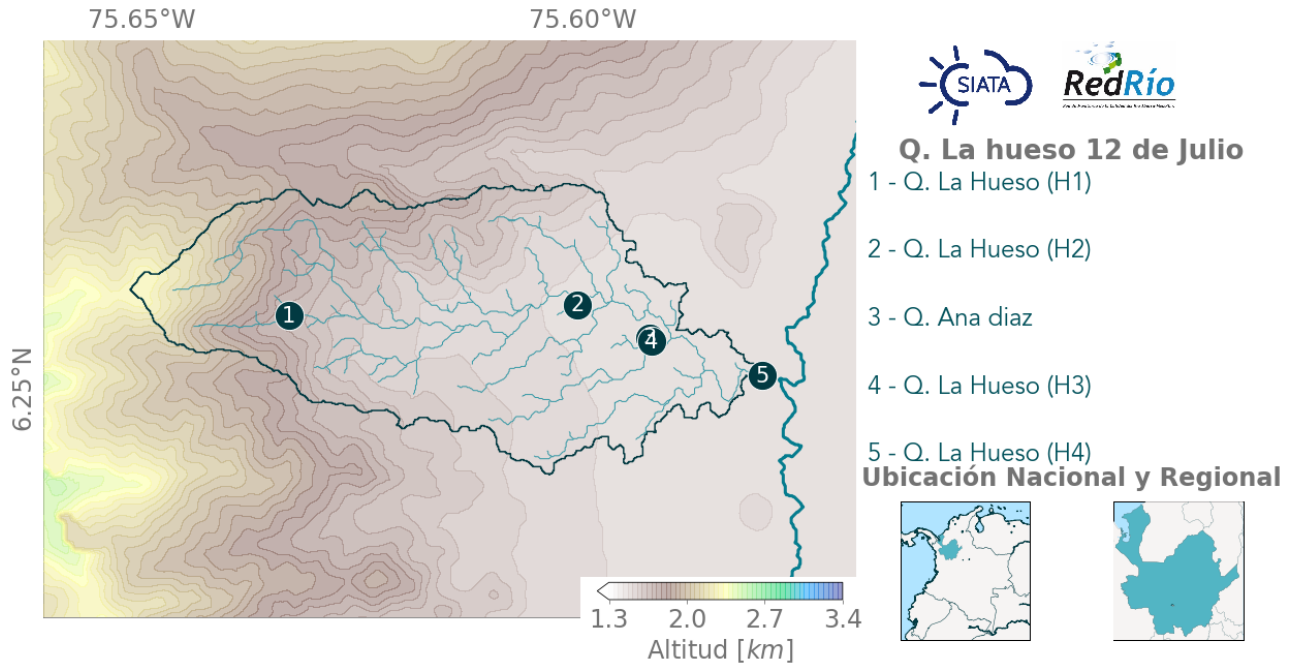


Figura 4.19: Mapa Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso.

4.8.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.20 izquierda, se muestra la lluvia que se precipitó sobre la cuenca, desde el día anterior de la campaña a las 6:00 am , hasta las 6:00 pm del día del aforo. En la gráfica de la izquierda, se muestra que los mayores acumulados se localizaron sobre la parte media y alta de la cuenca, con valores que alcanzan los 10 mm de lluvia acumulada promedio.

Según la figura 4.20 derecha, se reportaron dos eventos de precipitación, el primero de ellos se presentó el 11 de Julio a las 6:25 pm, con una intensidad promedio de 0.2 mm/h ; el segundo evento se reportó el día 12 de Julio, a las 3:00 pm, en el que la lluvia alcanzó una intensidad promedio cercana a los 0.4 mm/h . Ambos eventos generaron un promedio de lluvia acumulada de 0.7 mm en 36 horas. Ninguna de estas lluvias afectó la medición de caudales durante la campaña de aforo, ni influyeron en los valores de caudal obtenidos.

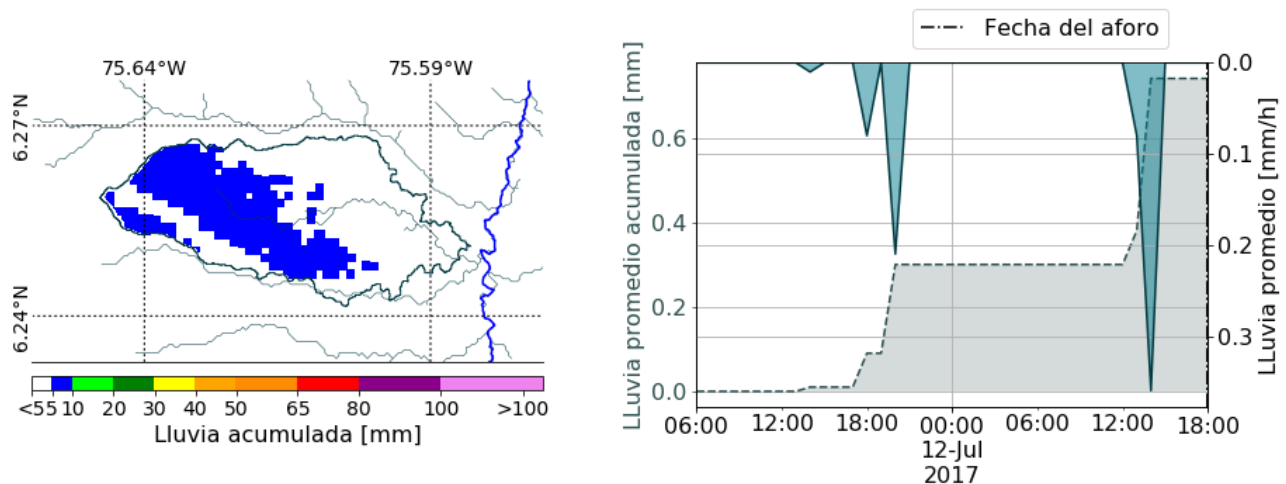


Figura 4.20: Lluvia Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1165-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-07-12\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1165-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-07-12).pdf)

4.8.2. Análisis de resultados

Los resultados muestran que los caudales tienen un aumento coherente de acuerdo a su ubicación hacía aguas abajo. La tabla 4.9, muestra los parámetros hidráulicos en cada estación de aforo. Se puede ver que el área, el perímetro y la altura, tienden a aumentar con el incremento de los caudales, lo cual no ocurre necesariamente con la velocidad, que depende de otros factores, como los materiales del lecho, las paredes del canal y de la pendiente media del lecho. En el caso de la quebrada La Hueso, durante todo su recorrido, presenta altas velocidades por la pendiente del cauce y la baja rugosidad de las paredes y el lecho, que se encuentran canalizados. Los tramos donde se presentan variaciones en la velocidad se debe a las continuas modificaciones en el ancho del canal, que se expande y se contrae en varios tramos generando remansos y resaltos hidráulicos.

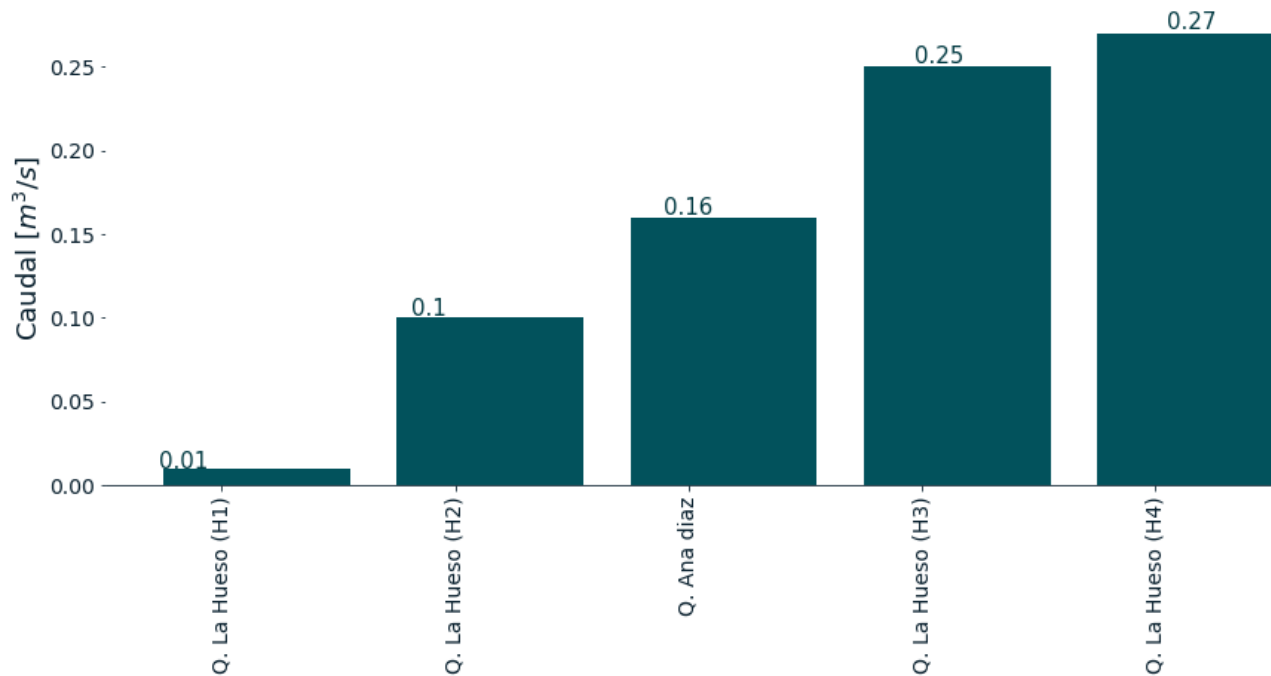


Figura 4.21: Resultados Campaña 12 de Julio - Q. La Hueso.

La figura de resumen de los caudales (Figura 4.21), presenta aumento de caudales a medida que las estaciones se acercan a la salida de la cuenca, o al punto de descarga hacia el río Aburrá-Medellín. Según los caudales obtenidos en cada estación y la visita de campo, se puede atribuir el aumento de caudal, no solo a la descarga de afluentes naturales, como la quebrada Ana Díaz, sino a diversas descargas de aguas residuales domésticas, que se intensifican al entrar en zonas densamente pobladas.

Tabla 4.9: Parámetros hidráulicos campaña 12 de Julio- Q. La Hueso.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Hueso (H1)	0.01	0.04	0.18	1.34	0.14	0.14
Q. La Hueso (H2)	0.1	1.28	0.08	2.5	0.03	0.03
Q. Ana diaz	0.16	1.78	0.09	1.36	0.06	0.07
Q. La Hueso (H3)	0.25	0.96	0.26	2.02	0.12	0.13
Q. La Hueso (H4)	0.27	0.92	0.29	2.7	0.1	0.11

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.9. Campaña de modelación del 12 de Julio - Q. Doña María

En la figura 4.22, se presenta el mapa con la cuenca de la Q. Doña María, en donde se ubican los 5 puntos de aforo sobre el tramo medio y bajo de la cuenca. Cuatro de estos puntos están ubicados sobre el cauce principal de la quebrada (DM1,DM2,DM4 y DM5) y un punto sobre la quebrada La Manguala (punto 3). La figura 4.24, muestra un resumen de los caudales obtenidos durante la campaña, y la tabla 4.10 contiene información hidráulica de cada estación de aforo.

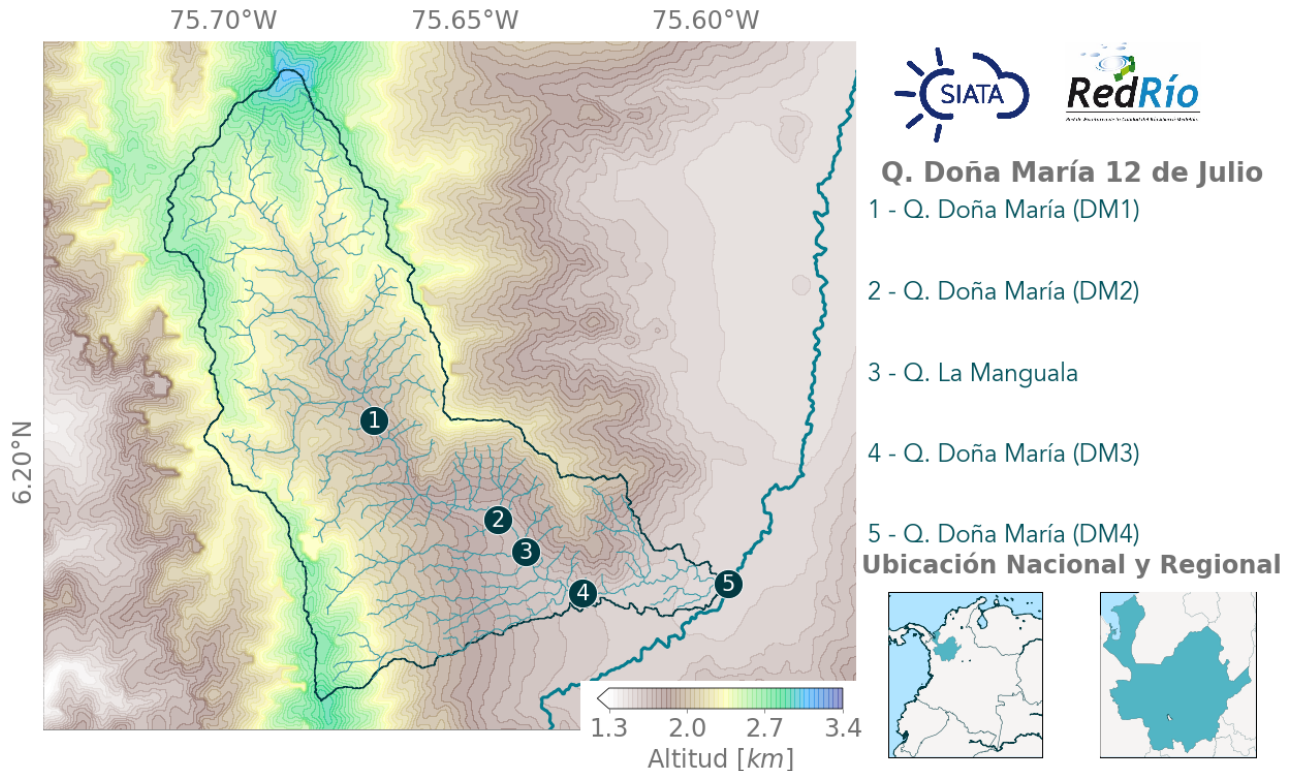


Figura 4.22: Mapa Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.

4.9.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.23, se muestra la lluvia sobre la cuenca en un lapso de 36 horas, desde las 6:00 am del día anterior, hasta las 6:00 pm del día del aforo. En la gráfica de la izquierda se muestra que los mayores acumulados alcanzaron los 50 mm en la parte central de la cuenca. Se puede observar, en el recuadro derecho de la figura, que el día del aforo se presentaron dos eventos de precipitación, el de mayor intensidad un día antes del aforo, entre las 12:00 y las 6:00 pm. Este alcanzó una lluvia promedio de 4 mm/h. El segundo evento se presentó el día del aforo a las 2:00 pm, con una lluvia promedio inferior a 1 mm/h.

Los valores de lluvia acumulada no sobrepasaron los 12 mm en 36 horas, de tal modo que los eventos de precipitación no interfirieron con los resultados, ni con la realización del aforo.

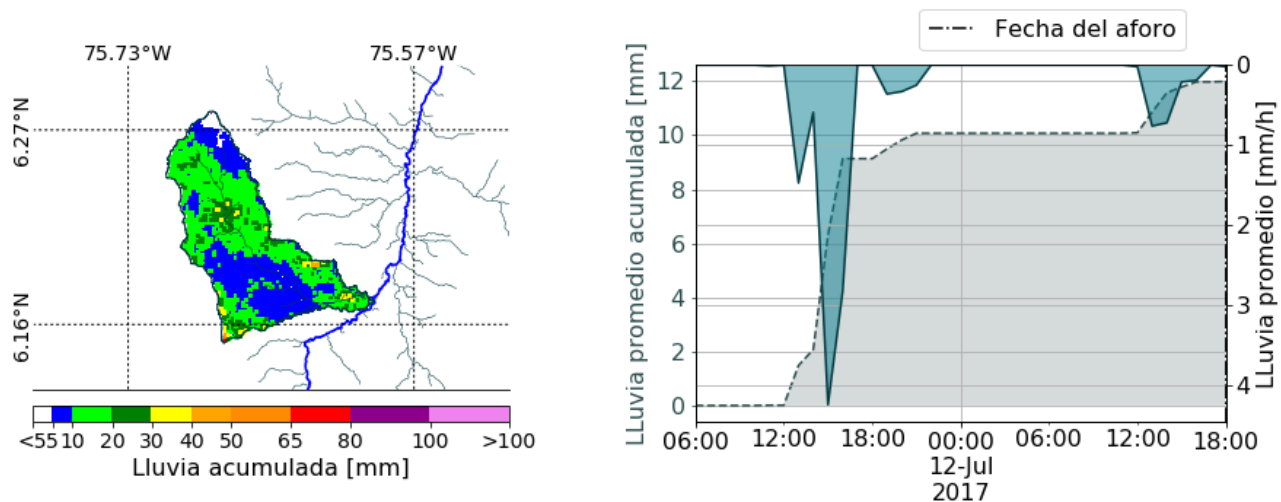


Figura 4.23: Lluvia Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1165-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-07-12\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1165-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-07-12).pdf)

4.9.2. Análisis de resultados

La figura 4.24, muestra el aumento de los caudales en cada estación, a medida que los mismos se acercan al punto de descarga en el río Aburrá-Medellín. El caudal de la quebrada la Manguala, junto con otras descargas de aguas residuales sobre la corriente principal, generan un mayor incremento del caudal, hacia aguas abajo. Además, durante su recorrido se pueden evidenciar continuos impactos como descargas de aguas residuales, y acumulación de basuras en el lecho y márgenes del canal, las cuales generan modificaciones a la dinámica de la corriente.

Aunque el caudal de la quebrada la Manguala no sea significativo en comparación con el caudal que transporta el cauce principal de la Q. Doña María, el impacto que generan todas las descargas juntas si es significativo para las mediciones de caudal aguas abajo, cerca a la descarga.

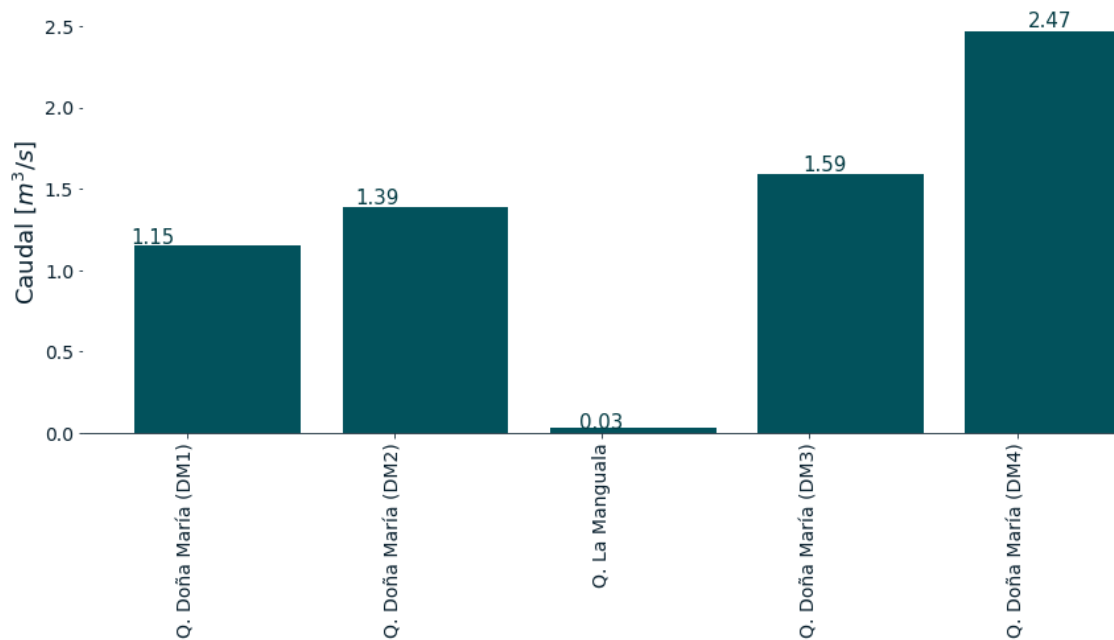


Figura 4.24: Resultados Campaña 12 de Julio - Q. Doña María.

Tabla 4.10: Parámetros hidráulicos campaña 12 de Julio- Q. Doña María.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. Doña María (DM1)	1.15	0.92	1.25	6.06	0.2	0.21
Q. Doña María (DM2)	1.39	0.44	3.13	6.67	0.46	0.47
Q. La Manguala	0.03	0.34	0.08	1.61	0.04	0.05
Q. Doña María (DM3)	1.59	0.68	2.32	7.91	0.29	0.29
Q. Doña María (DM4)	2.47	0.54	4.59	14.13	0.31	0.32

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.10. Campaña de modelación del 13 de Julio- Q. Santa Elena

La figura 4.25 muestra las cuatro estaciones que se aforaron el día 13 de Julio, sobre el cauce principal de la quebrada Santa Elena (SE1, SE2, Se3, SE4), y un punto sobre un afluente ubicado en el tramo medio de la quebrada. En la tabla 4.11, se muestran los resultados con los caudales obtenidos en cada estación y adicionalmente la ampliación de la información hidráulica del canal en cada punto. En la figura 4.26 se representan los resultados de caudal obtenidos en cada estación, con el objetivo de facilitar la visualización y análisis de los resultados.

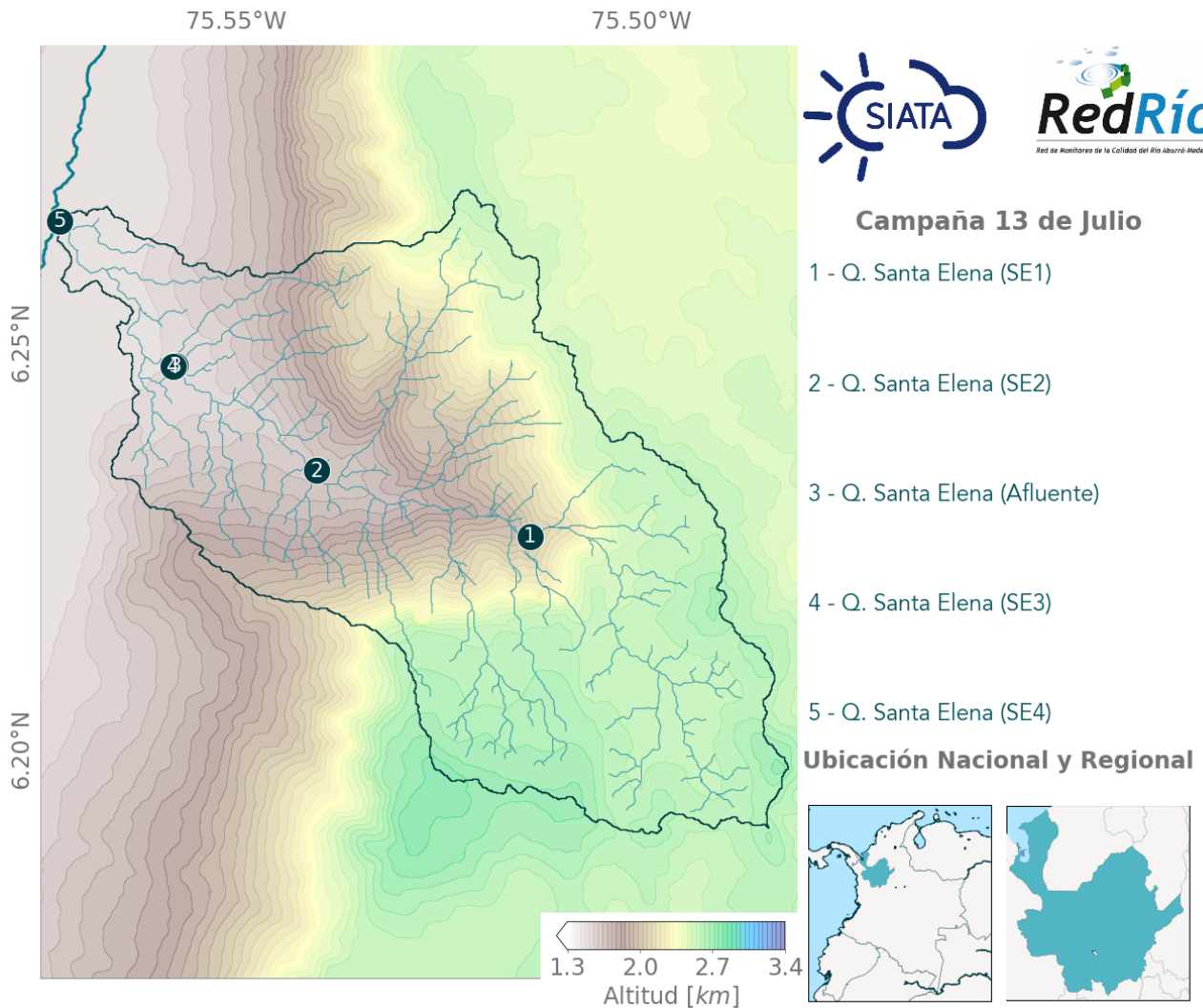


Figura 4.25: Mapa Campaña 13 de Julio.

4.10.1. Análisis de Lluvia

En el siguiente enlace [http://siata.gov.co/reporte_eventos/1166-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-07-13\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1166-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-07-13).pdf), se muestra el reporte de precipitaciones sobre la cuenca del valle de Aburrá, donde se evidencia que a pesar de las lluvias registradas ese día, los eventos estuvieron localizados en la parte sur de la cuenca, por lo cual las mediciones efectuadas en la quebrada Santa Elena no se vieron afectadas.

4.10.2. Análisis de resultados

En la Figura 4.26, se muestra el resumen de los caudales obtenidos durante la campaña de aforo. Se observa que el caudal de la estación SE3 es mayor al caudal en la estación SE4. Esto se puede deberse a que el aforo en la estación SE4 fue realizado después de que pasara el pico de las descargas de aguas residuales, por lo tanto los caudales se notaron notablemente disminuidos respecto a la estación SE3.

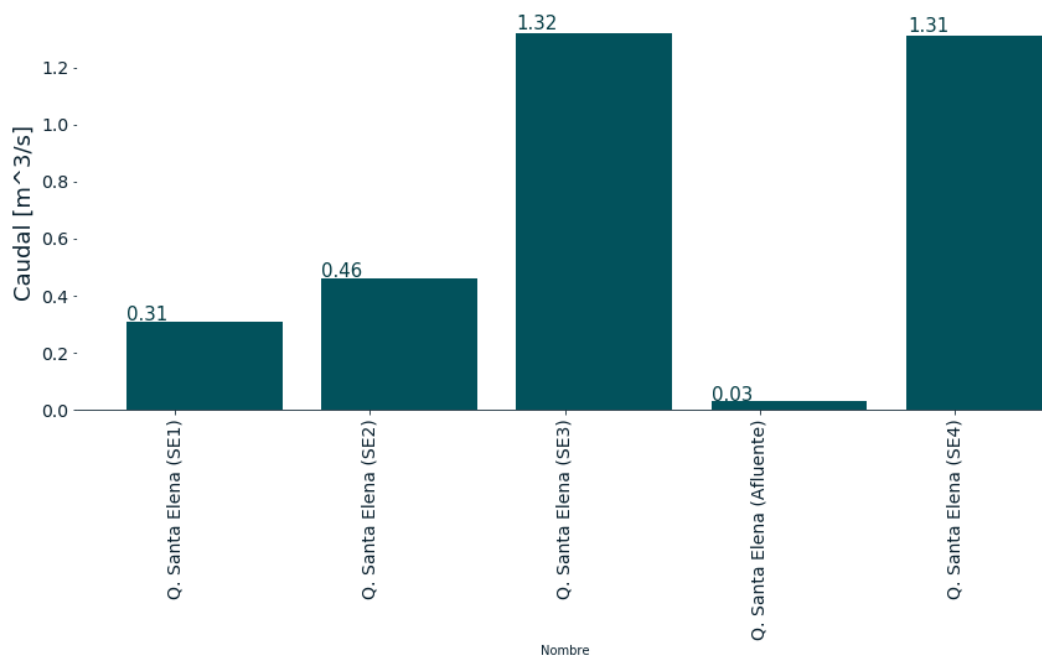


Figura 4.26: Resultados Campaña 13 de Julio.

Tabla 4.11: Parámetros hidráulicos campaña 13 Julio

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. Santa Elena (SE1)	0.31	0.51	0.62	2.3	0.33	0.27
Q. Santa Elena (SE2)	0.46	0.46	1.0	6.04	0.16	0.16
Q. Santa Elena (Afluente)	0.03	0.64	0.04	1.66	0.02	0.02
Q. Santa Elena (SE3)	1.32	0.53	2.5	4.95	0.58	0.51
Q. Santa Elena (SE4)	1.31	0.7	1.86	10.02	0.18	0.19

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.11. Campaña 26 de Julio

4.11.1. Análisis de Lluvia

El día de la campaña de aforo no se presentaron eventos de precipitación en la cuenca, ni durante las 36 horas que rodean el aforo; por consiguiente, no se generó el correspondiente reporte de lluvia para la campaña, además debido a que no se presentaron lluvias entre el 20 y el 30 de Julio, no se cuenta con un reporte de precipitación emitido por el SIATA para estas fechas.

4.11.2. Análisis de resultados

En general los caudales aforados durante esta campaña fueron inferiores o muy similares a la mediana histórica, esto se debe principalmente a las condiciones secas que predominaron el 25 y el 26 de Julio, además de los otros días de este mes donde también predominaron las condiciones secas.

En la figura 4.27 se muestra un resumen de los caudales obtenidos en cada estación, con el objetivo de identificar cuales de estas corrientes son las que aportan mayor caudal al río Aburrá-Medellín. Se observa que los mayores caudales de la campaña se midieron en la quebrada Doña María (E4), la descarga de la planta de tratamiento San Fernando (D1) , seguidas por las quebradas La Ayurá (Q4), La altavista (Q8) y La Miel (Q2) en ese orden. Los afluentes que presentan los menores valores de caudales son la quebrada La Mina, La Picacha (Q20) y la quebrada la Bermejala.

Los demás parámetros hidráulicos se muestran en la tabla 4.12, en donde tanto el área, como el perímetro aumentan junto con el caudal, esto ocurre en las quebradas de mayores dimensiones como la quebrada Doña María (E4), La Miel (Q2) y la Altavista(Q8). Este mismo comportamiento no se puede asumir con la velocidad del canal, con la profundidad o con el radio hidráulico que presenta mayores velocidades para las estaciones La Ayurá (Q4), La Hueso (Q9) y la Altavista (Q8).

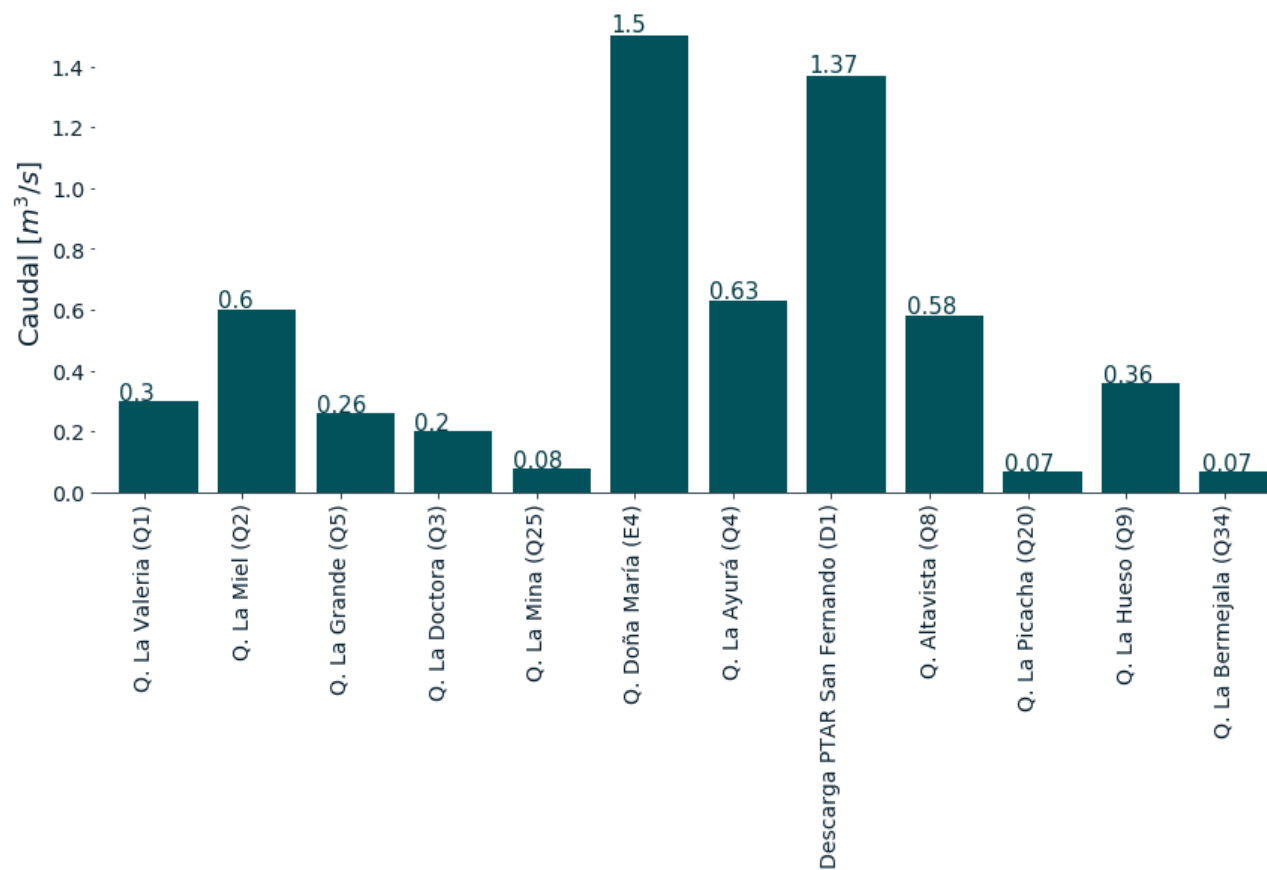


Figura 4.27: Resultados Campaña 26 de Julio.

Tabla 4.12: Parámetros hidráulicos campaña 26 de julio.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Valeria (Q1)	0.3	0.65	0.46	2.51	0.18	0.18
Q. La Miel (Q2)	0.6	0.57	1.04	5.23	0.2	0.2
Q. La Grande (Q5)	0.26	0.4	0.65	3.06	0.2	0.21
Q. La Doctora (Q3)	0.2	0.28	0.71	3.12	0.23	0.23
Q. La Mina (Q25)	0.08	0.65	0.12	1.81	0.06	0.07
Q. Doña María (E4)	1.5	0.46	3.25	11.53	0.27	0.28
Q. La Ayurá (Q4)	0.63	1.02	0.62	4.1	0.15	0.15
Descarga PTAR San Fernando (D1)	1.37	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. Altavista (Q8)	0.58	0.68	0.86	9.81	0.08	0.09
Q. La Picacha (Q20)	0.07	0.4	0.17	1.27	0.13	0.13
Q. La Hueso (Q9)	0.36	0.72	0.5	2.79	0.17	0.18
Q. La Bermejala (Q34)	0.07	0.29	0.24	1.93	0.12	0.13

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.12. Campaña 27 de julio

4.12.1. Análisis de Lluvia

El día de la campaña de aforo no se presentaron eventos de precipitación en la cuenca, ni durante las 36 horas que rodean el aforo; por consiguiente, no se generó el correspondiente reporte de lluvia para la campaña, además debido a que no se presentaron lluvias entre el 20 y el 30 de Julio, no se cuenta con un reporte de precipitación emitido por el SIATA para estas fechas.

4.12.2. Análisis de resultados

La figura 4.28 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación. Se pueden identificar que las estaciones con mayor caudal son Q. Santa Elena (Q10), el Interceptor Oriental (Q3), Q. La García (E10) y Q. Ovejas (Q30). El aporte de caudal de las demás corrientes se mantiene por debajo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales de la campaña estuvieron por debajo de la mediana histórica, a excepción de la estación Q.Ovejas (Q30). El comportamiento se debe a las condiciones secas que se presentaron antes del aforo y durante el mes de Julio (periodo seco).

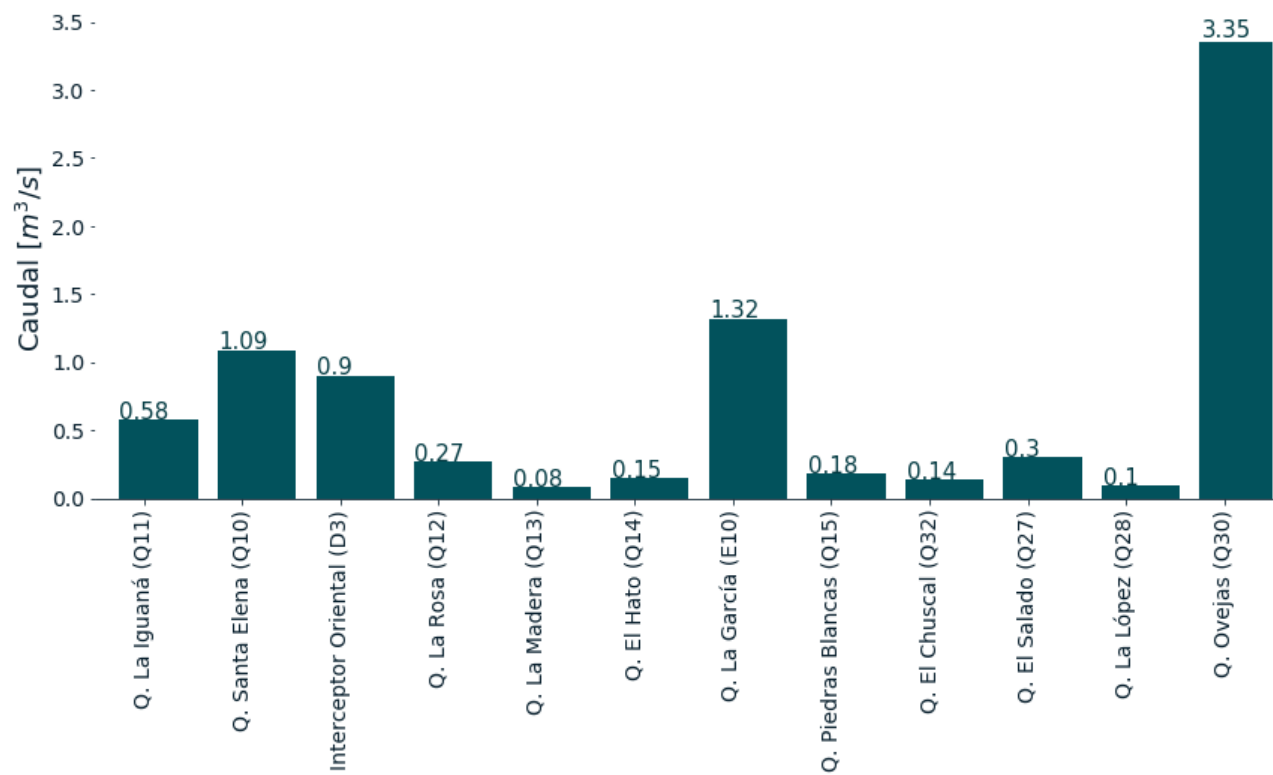


Figura 4.28: Resultados Campaña 27 de julio.

En la tabla 4.13 se muestran los parámetros hidráulicos de cada estación. El comportamiento de los caudales se relaciona con el el área y el perímetro mojado, la velocidad se comporta según la rugosidad del canal y la pendiente del cauce. La quebrada La Rosa presenta altas velocidades debido a que es canalizada y se ubica sobre la ladera oriental del Valle de Aburrá, la cual presenta altas pendientes. El Interceptor Oriental presenta velocidades altas debido a las bajas rugosidades de la tubería que transporta el flujo. Por último, en la Q. Ovejas la alta velocidad se explica por la magnitud del área de drenaje de la cuenca.

Tabla 4.13: Parámetros hidráulicos campaña 27 de Julio.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Iguaná (Q11)	0.58	0.88	0.65	7.01	0.09	0.09
Q. Santa Elena (Q10)	1.09	0.63	1.74	10.03	0.17	0.17
Interceptor Oriental (D3)	0.9	0.73	1.22	6.45	0.18	0.19
Q. La Rosa (Q12)	0.27	0.85	0.31	3.12	0.09	0.1
Q. La Madera (Q13)	0.08	0.17	0.44	1.74	0.26	0.26
Q. El Hato (Q14)	0.15	0.1	1.57	4.17	0.37	0.38
Q. La García (E10)	1.32	0.65	2.03	10.45	0.18	0.19
Q. Piedras Blancas (Q15)	0.18	0.39	0.45	3.36	0.13	0.13
Q. El Chuscal (Q32)	0.14	0.35	0.39	2.63	0.14	0.15
Q. El Salado (Q27)	0.3	0.55	0.55	3.53	0.14	0.15
Q. La López (Q28)	0.1	0.57	0.18	2.12	0.07	0.09
Q. Ovejas (Q30)	3.35	0.72	4.63	7.65	0.58	0.61

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.13. Campaña 02 de Agosto

4.13.1. Análisis de Lluvia

La figura 4.29 muestra la lluvia sobre la cuenca en un lapso de 36 horas, desde las 6:00 am del día 01 de Agosto, hasta las 06:00 pm del día del aforo. De acuerdo a la gráfica de la izquierda, el evento de lluvia se localizó sobre la ladera sur-occidental del Valle de Aburrá, de forma específica en la cuenca de Doña María, perteneciente al municipio de Itagüí, con valores de acumulados máximos muy cercanos a los 80 mm. Los eventos se presentaron el 1 de Agosto a las 17:25 y el segundo el 2 de Agosto a las 15:00, con intensidades medias de 0.2 y 0.4 mm/h respectivamente. Al finalizar la campaña la acumulación de lluvia alcanzó 1 mm, por lo que no se afectó la medición de los caudales.

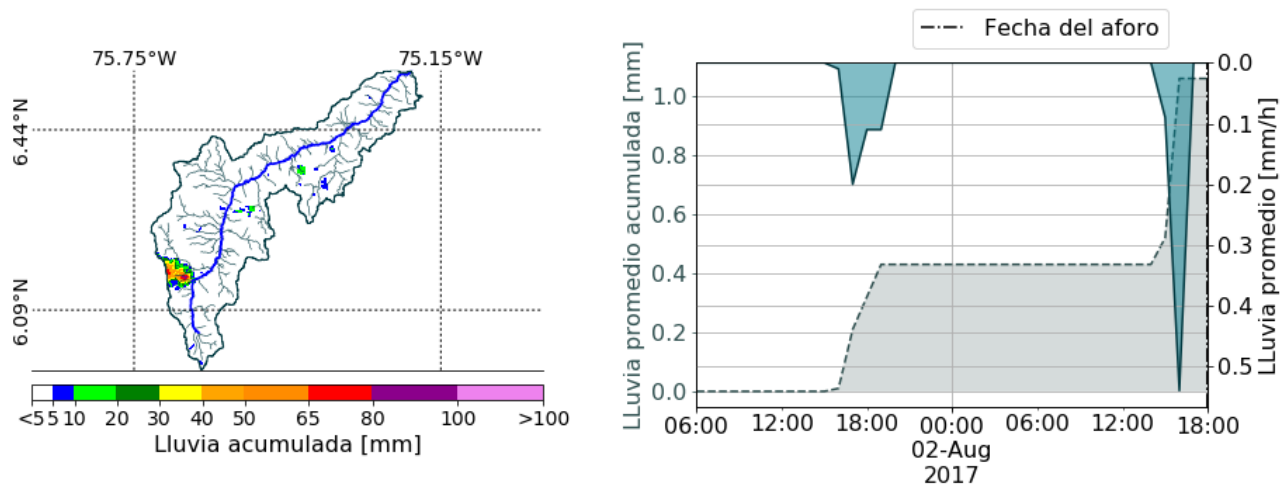


Figura 4.29: Lluvia Campaña 02 de Agosto

4.13.2. Análisis de resultados

La figura 4.30 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación el día del aforo a lo largo del río. En la campaña se observa un aumento del caudal hacia aguas abajo, correspondiente con el aumento del área de drenaje de la cuenca en esta dirección. Durante el aforo no se presentaron inconvenientes. Los caudales de la campaña presentan un comportamiento similar al de la media histórica. Esta semejanza se debe a condiciones climáticas relativamente estables antes del aforo, y a las condiciones climáticas del mes de Agosto, las cuales corresponden a un mes de transición (período seco a húmedo).

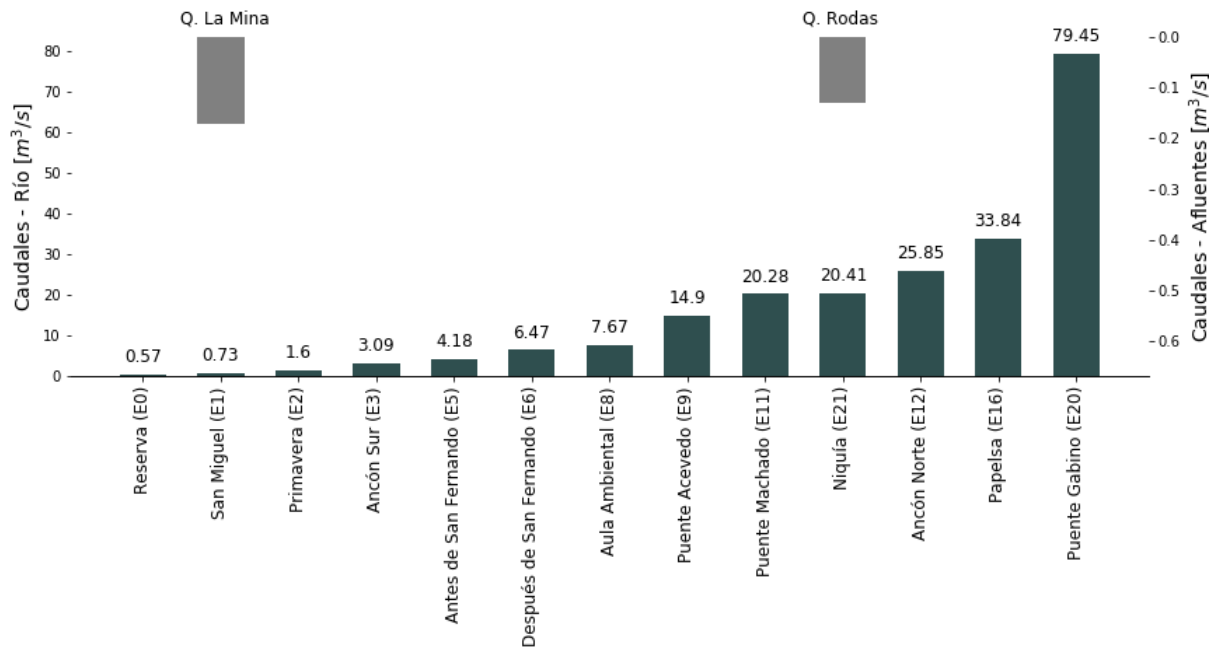


Figura 4.30: Resultados Campaña 02 de Agosto

La tabla 4.14 presenta los resultados de caudal y parámetros hidráulicos relevantes.

Tabla 4.14: Parámetros hidráulicos campaña 2 de Agosto.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Reserva (E0)	0.57	0.68	0.83	3.33	0.3	0.25
Q. La Mina	0.17	0.31	0.53	3.38	0.18	0.16
San Miguel (E1)	0.73	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Primavera (E2)	1.6	0.64	2.49	6.69	0.42	0.37
Ancón Sur (E3)	3.09	0.51	6.12	15.79	0.41	0.39
Antes de San Fernando (E5)	4.18	0.5	8.32	21.78	0.4	0.38
Después de San Fernando (E6)	6.47	0.55	11.76	21.24	0.59	0.55
Aula Ambiental (E8)	7.67	0.94	8.19	41.17	0.2	0.2
Puente Acevedo (E9)	14.9	0.5	30.07	38.29	0.79	0.79
Q. Rodas	0.13	0.31	0.43	2.22	0.22	0.19
Puente Machado (E11)	20.28	0.63	32.13	25.61	1.3	1.25
Niquía (E21)	20.41	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	25.85	0.7	36.72	27.48	1.41	1.34
Papelsa (E16)	33.84	0.53	64.12	35.5	1.89	1.81
Puente Gabino (E20)	79.45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

4.14. Campaña 13 de Septiembre

4.14.1. Análisis de Lluvia

En la figura 4.31 se muestra la lluvia que se precipitó sobre la cuenca el día de la campaña. En la gráfica de la izquierda se muestra la localización de los eventos de lluvia sobre la cuenca, captados por el radar meteorológico, en este caso los mayores acumulados se presentaron en la zona sur-occidental con valores entre 30 y 50 mm. En el recuadro de la derecha de la figura 4.31 se observa que las mayores intensidades de la lluvia se presentaron el día antes del aforo entre las 18:00 del 12 de septiembre y las 4:00 del 13 de septiembre con intensidades máximas de 5 mm/hr, adicional a esto ocurrió un evento aislado de menor magnitud hacia las 14:00 con una intensidad menor a 1 mm/hr, en general los eventos de precipitación aumentaron los caudales pero debido a que las lluvias cesaron durante la mañana se pudo llevar a cabo la campaña de medición con normalidad.

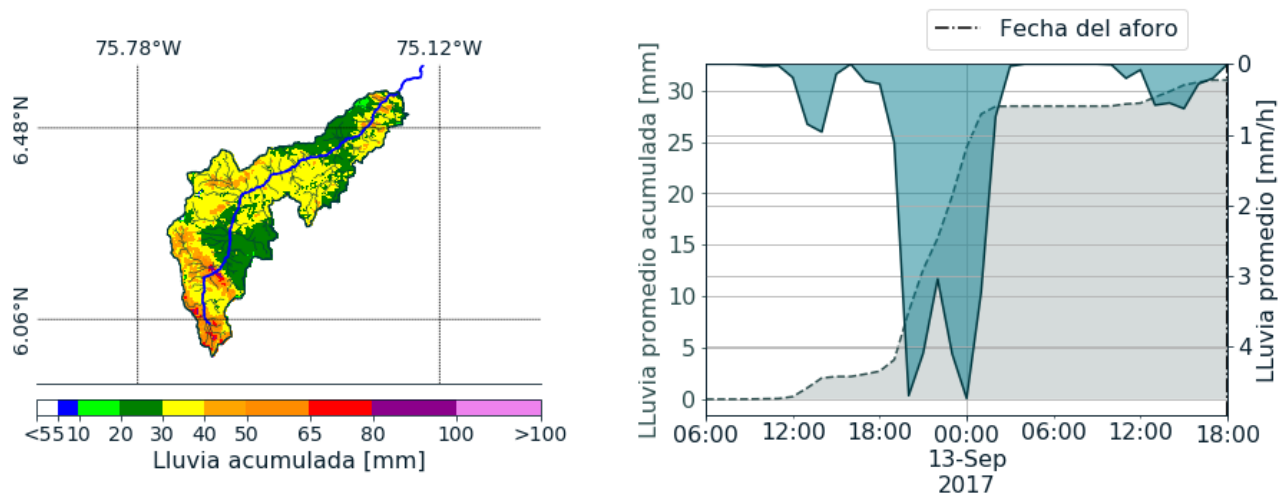


Figura 4.31: Lluvia Campaña 13 de Septiembre

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en los siguientes enlaces:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1209_Informe_Evento_precipitacion_\(2017-09-13\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1209_Informe_Evento_precipitacion_(2017-09-13).pdf)

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1210_Informe_Evento_precipitacion_\(2017-09-13\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1210_Informe_Evento_precipitacion_(2017-09-13).pdf)

4.14.2. Análisis de resultados

Se puede observar tanto en el resumen de caudales (ver figura 4.32), como en la tabla de parámetros hidráulicos (Ver figura 4.32), que el mayor caudal obtenido se obtuvo en la estación Doña María (E4), seguido por el caudal de la descarga de la planta de tratamiento San Fernando (D1) y la quebrada La Miel (Q2). Los valores de caudal de las demás quebradas son relativamente bajos, inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Al comparar los valores de caudal medidos en la campaña, con la mediana histórica de cada estación, se puede concluir que los caudales tuvieron en general un comportamiento superior a la mediana; debido principalmente a la escorrentía directa a causa de los eventos de precipitación antes y durante la realización del aforo.

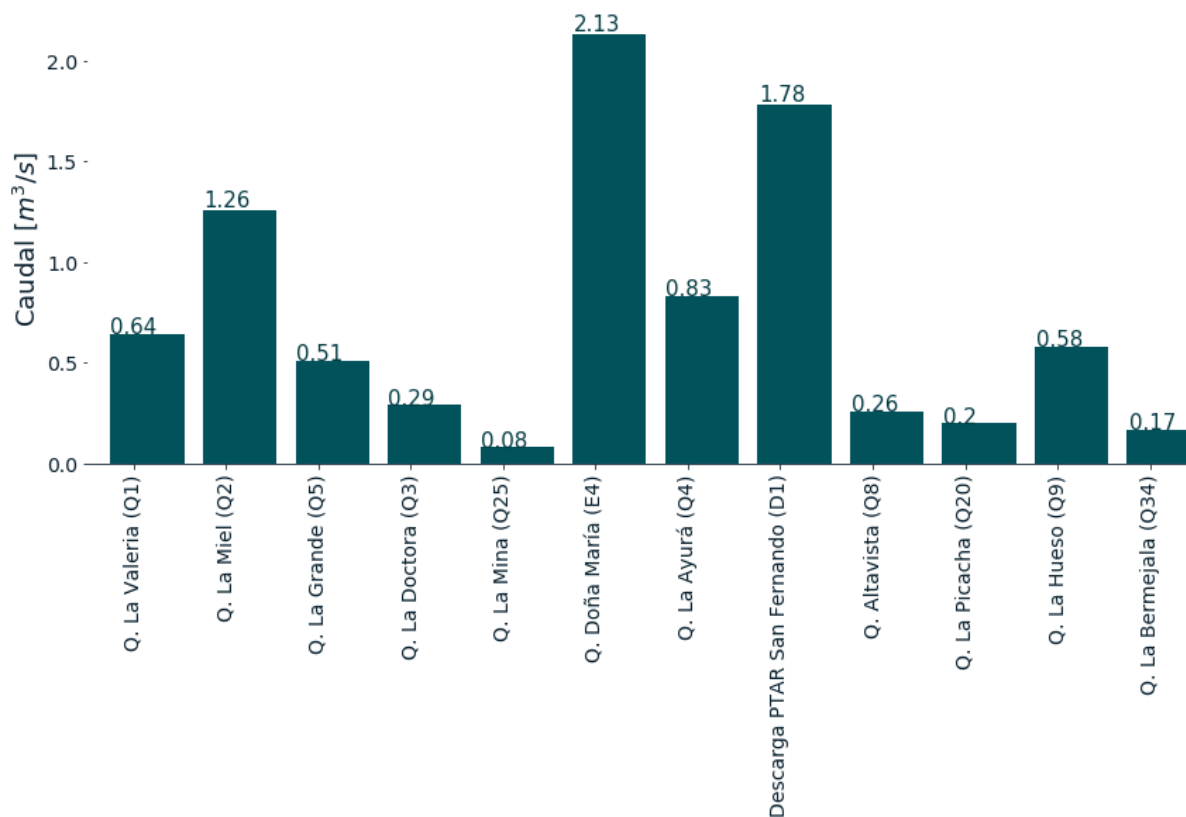


Figura 4.32: Resultados Campaña 13 de Septiembre

Tabla 4.15: Parámetros hidráulicos campaña 13 de septiembre

	Q_t . [m^3/s]	V_m . [m/s]	A_t . [m^2]	P_m . [m]	H_m . [m]	R_h . [m]
Q. La Valeria (Q1)	0.64	1.01	0.63	2.54	0.24	0.25
Q. La Miel (Q2)	1.26	0.84	1.51	5.53	0.27	0.27
Q. La Grande (Q5)	0.51	0.66	0.77	4.23	0.19	0.18
Q. La Doctora (Q3)	0.29	0.47	0.63	3.61	0.17	0.17
Q. La Mina (Q25)	0.08	0.65	0.12	1.6	0.08	0.08
Q. Doña María (E4)	2.13	0.58	3.66	12.01	0.3	0.3
Q. La Ayurá (Q4)	0.83	0.3	2.81	4.28	0.66	0.66
Descarga PTAR San Fernando (D1)	1.78	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Q. Altavista (Q8)	0.26	0.61	0.43	10.41	0.04	0.04
Q. La Picacha (Q20)	0.2	0.94	0.21	1.34	0.17	0.16
Q. La Hueso (Q9)	0.58	1.32	0.44	2.46	0.16	0.18
Q. La Bermejala (Q34)	0.17	0.58	0.29	1.63	0.18	0.18

Q_t . = Caudal total, V_m . = Velocidad promedio, A_t . = Área total, P_m . = Perímetro mojado, H_m . = Profundidad media, R_h . = Radio hidráulico.

4.15. Campaña 14 de Septiembre

4.15.1. Análisis de Lluvia

En la siguiente figura (figura 4.33) se puede observar que los mayores acumulados se presentaron en la zona sur de la cuenca, donde se alcanzó un máximo acumulado de 80 *mm*. En la zona Norte del Valle de Aburrá se localizó otro núcleo de lluvias, con acumulados que alcanzaron los 10 *mm* de lluvia.

En la gráfica de la parte derecha de la figura, se pueden observar la ocurrencia de al menos 3 eventos de precipitación sobre la cuenca en las 36 horas que rodearon el aforo. Dos eventos de lluvia se presentaron un día antes del aforo. El primero alcanzó una intensidad máxima de 0.6 *mm/h* a las 4:00 pm del día anterior, el segundo, alcanzó la mayor intensidad promedio a las 24:00 horas, con un valor de 0.4 *mm/h*. El día del aforo, se presentó un evento de lluvia de larga duración con un pico máximo de intensidad promedio de 0.8 *mm/h*. Derivado de los eventos de lluvia de ambos días, el acumulado de lluvia llegó a 6 *mm* al finalizar la campaña.

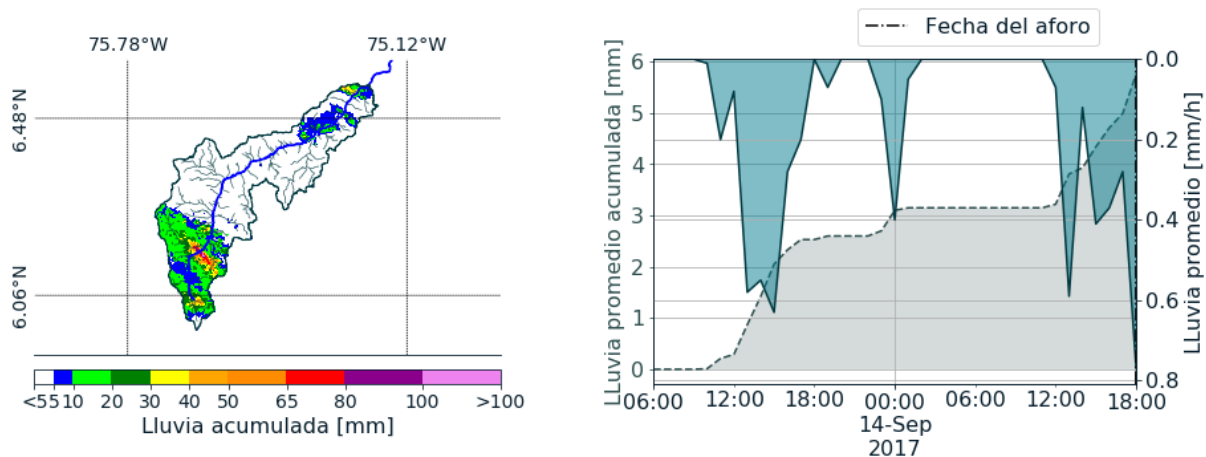


Figura 4.33: Lluvia Campaña 14 de Septiembre

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en los siguientes enlaces:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1211-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-09-14\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1211-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-09-14).pdf)

4.15.2. Análisis de resultados

La figura 4.34 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación de la campaña, con el objetivo de visualizar las quebradas que aportan mayores caudales al río Aburrá-Medellín. En esta gráfica se observa que las quebradas que mayor caudal aportan son las quebradas Ovejas (Q30), La García (E10), Santa Elena (Q10), La Iguana (Q11) y el Interceptor Oriental (D3). El resto de quebradas como la quebrada La Rosa (Q12), La Madera (Q13), El Hato(Q14), La Chuscala (Q24) y La López (Q28), que presentaron los caudales mas bajos de la campaña, con valores inferiores a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

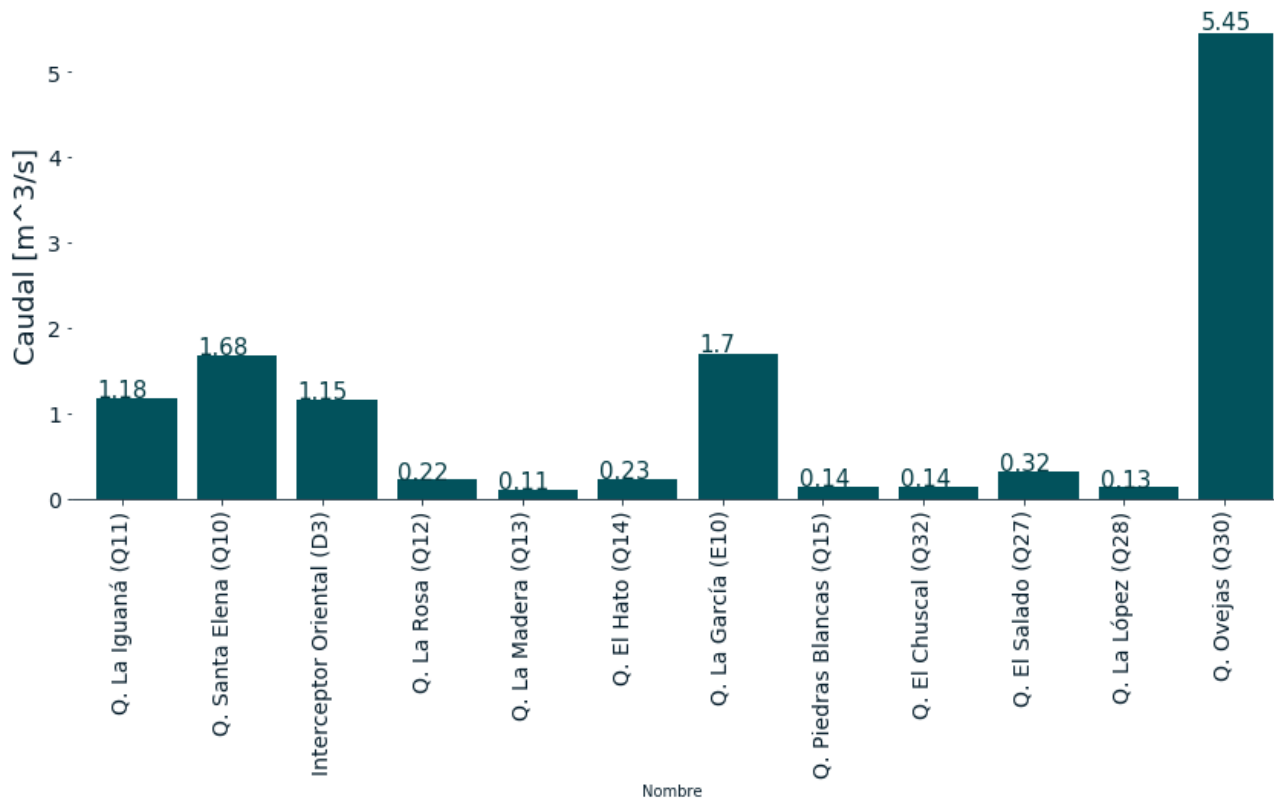


Figura 4.34: Resultados Campaña 14 de Septiembre

En la tabla 4.16 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de la estación de aforo. Se puede observar una tendencia al aumento del caudal junto con el área y el perímetro mojado, mientras que la velocidad y la altura media se comportan de manera independiente, de acuerdo de las características del lecho, las bancas y la pendiente media del canal. El radio hidráulico es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, y tiende a aumentar con el aumento de la velocidad.

Las quebradas con mayores velocidades fueron las quebradas Santa Elena (Q10), Q. La García (E10) y Q. Ovejas (Q30). En la quebrada Santa Elena, las altas velocidades se debe a que se encuentra canalizada en gran parte de su recorrido por la zona urbana. En las quebradas La García y Ovejas, se debe al área de drenaje de la cuenca.

Tabla 4.16: Parámetros hidráulicos campaña 14 de Septiembre.

	Q_t . [m^3/s]	V_m . [m/s]	A_t . [m^2]	P_m . [m]	H_m . [m]	R_h . [m]
Q. La Iguaná (Q11)	1.18	1.44	0.82	8.0	0.1	0.1
Q. Santa Elena (Q10)	1.68	0.72	2.34	10.05	0.22	0.23
Interceptor Oriental (D3)	1.15	0.47	2.42	13.24	0.18	0.18
Q. La Rosa (Q12)	0.22	0.7	0.32	3.22	0.09	0.1
Q. La Madera (Q13)	0.11	0.22	0.51	1.77	0.28	0.29
Q. El Hato (Q14)	0.23	0.17	1.39	4.33	0.31	0.32
Q. La García (E10)	1.7	0.54	3.17	10.12	0.3	0.31
Q. Piedras Blancas (Q15)	0.14	0.16	0.91	6.62	0.13	0.14
Q. El Chuscal (Q32)	0.14	0.36	0.4	2.84	0.14	0.14
Q. El Salado (Q27)	0.32	0.36	0.89	6.32	0.13	0.14
Q. La López (Q28)	0.13	0.46	0.28	2.49	0.11	0.11
Q. Ovejas (Q30)	5.45	1.27	4.3	7.36	0.59	0.58

Q_t . = Caudal total, V_m . = Velocidad promedio, A_t . = Área total, P_m . = Perímetro mojado, H_m . = Profundidad media, R_h . = Radio hidráulico.

4.16. Campaña 27 de Septiembre

4.16.1. Análisis de Lluvia

La figura 4.35 muestra la lluvia que se presentó en la cuenca el día del aforo. La imagen de la izquierda muestra la ubicación de dos eventos aislados de lluvia, uno en la zona norte y otro en la zona sur del Valle de Aburrá, cuyos acumulados que alcanzaron los 40 mm . La imagen de la derecha de la figura 4.35 muestra dos eventos aislados que se presentaron en la cuenca durante las 36 horas de análisis, el primero de ellos se presentó un día antes del aforo, a las 12:00 con intensidades que alcanzaron los 0.25 mm/h , el segundo evento se presentó el día del aforo a las 16:00, con una intensidad de 0.30 mm/h . Derivado de estos dos eventos se acumuló 1 mm de lluvia en la cuenca.

Además del reporte de lluvia que se generó para la cuenca durante las 36 horas que rodearon el aforo. El SIATA genera informes de eventos de precipitación, que se pueden consultar en línea en el siguiente enlace:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1226-Informe_Evento_Precipitacion_\(2017-09-27\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1226-Informe_Evento_Precipitacion_(2017-09-27).pdf)

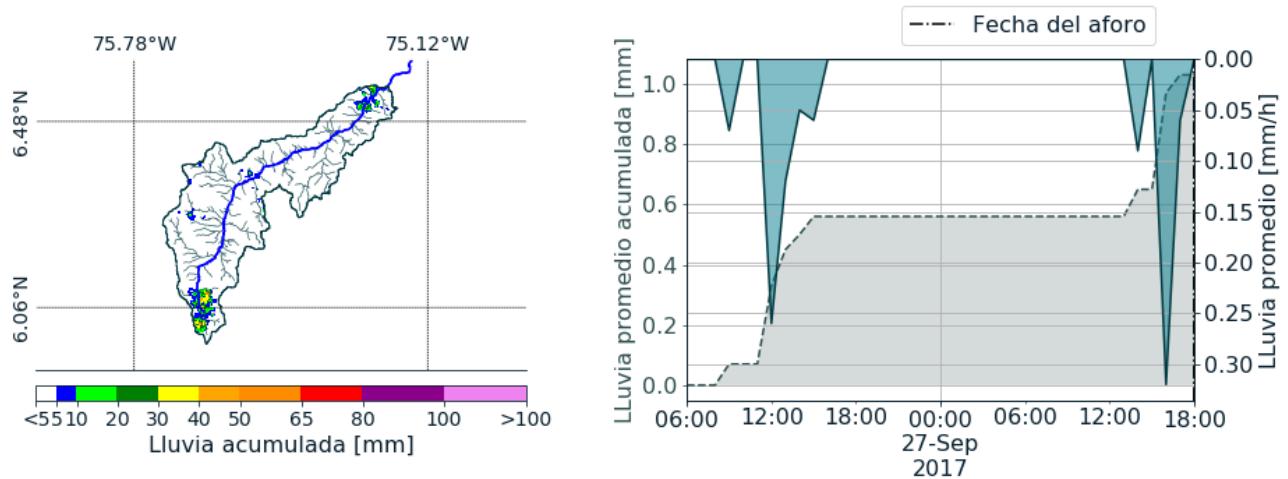


Figura 4.35: Lluvia Campaña 27 de Septiembre

4.16.2. Análisis de resultados

La mayoría de los caudales de este día estuvieron por encima de la mediana, debido en parte al evento de lluvia que se presentó el día anterior al día del aforo, que dejó un acumulado de lluvia promedio en la cuenca de 0.6 mm; con el segundo evento de precipitación que se presentó el día del aforo, se alcanzó un acumulado de 1 mm en la cuenca. No obstante, este acumulado de lluvia no explica el aumento de caudales después de la estación aula ambiental, que en comparación con la mediana, son bastante altos.

La diferencia entre estos caudales se puede presentar por varias razones, en primer lugar a la cantidad y al volumen de las descargas no controladas que existen en este tramo, como la descarga de Tasajera entre la estación Ancón Norte y Papelsa. Por otra parte, según el ciclo interanual Septiembre es uno de los meses más lluviosos del año. Dada la temporada de lluvia los caudales bases son mas alto, por lo que el subsuelo de la cuenca se encuentra saturado y los aportes de lluvia llegan mas rápidamente a los cuerpos de agua por escorrentía, aumentando los caudales que se presentaron durante este mes.

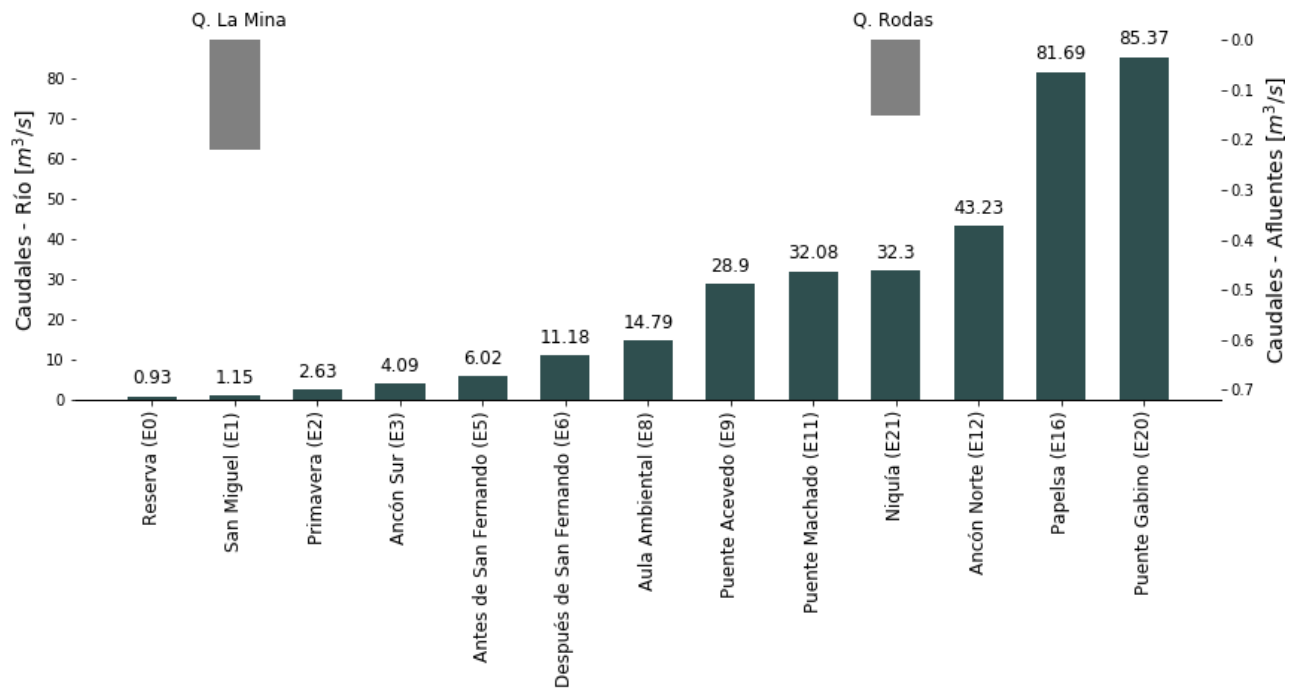


Figura 4.36: Resultados Campaña 27 de Septiembre.

En la tabla 4.17 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de la estación de aforo. Se puede observar una tendencia al aumento del caudal junto con el área y el perímetro mojado, mientras que la velocidad y la altura media se comportan de manera independiente, de acuerdo de las características del lecho, las bancas y la pendiente media del canal. Las mayores velocidades se presentan en las estaciones Papelsa (E16), Ancón Norte (E12), y Aula Ambiental (E8).

El radio hidráulico es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, siendo una medida para calcular la pérdida de flujo en canales no circulares, y que varía según la forma geométrica del canal, de forma que se comporta de acuerdo a la variación entre el perímetro y el área mojada.

Tabla 4.17: Parámetros hidráulicos campaña 27 de Septiembre.

	$Q_t.$ [m^3/s]	$V_m.$ [m/s]	$A_t.$ [m^2]	$P_m.$ [m]	$H_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Reserva (E0)	0.93	0.98	0.95	3.36	0.32	0.28
Q. La Mina	0.22	0.3	0.72	3.87	0.21	0.19
San Miguel (E1)	1.15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Primavera (E2)	2.63	0.94	2.81	7.82	0.39	0.36
Ancón Sur (E3)	4.09	0.54	7.62	15.78	0.52	0.48
Antes de San Fernando (E5)	6.02	0.63	9.53	21.94	0.45	0.43
Después de San Fernando (E6)	11.18	0.85	13.21	19.45	0.73	0.68
Aula Ambiental (E8)	14.79	1.05	14.02	41.43	0.34	0.34
Puente Acevedo (E9)	28.9	0.91	31.86	39.0	0.84	0.82
Q. Rodas	0.15	0.32	0.47	3.35	0.13	0.14
Puente Machado (E11)	32.08	0.92	35.01	26.85	1.37	1.3
Niquía (E21)	32.3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	43.23	1.2	36.15	26.51	1.51	1.36
Papelsa (E16)	81.69	1.27	64.43	37.78	1.77	1.71
Puente Gabino (E20)	85.37	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

5 Resultados de Campaña realizada en 2018

En la presente sección se muestra un análisis general de los aforos realizados por el equipo SIATA a lo largo del año 2018 para el proyecto RedRío. A continuación se presenta el cronograma y el tipo de campaña que se llevó a cabo en cada fecha.

Tabla 5.1: Cronograma de aforos del año 2018

Campaña	Tipo de Campaña	Fecha
Campaña 1	Muestra completa	25-04-18
Campaña 2	Muestreo quebradas	09-05-18
Campaña 3	Muestreo quebradas	10-05-18
Campaña 4	Muestra completa	13-06-18
Campaña 5	Campaña tiempos de viaje	18-06-18
Campaña 6	Campaña tiempos de viaje	19-06-18
Campaña 7	Campaña tiempos de viaje	20-06-18
Campaña 8	Campaña de modelación	05-07-18
Campaña 9	Campaña de modelación	06-07-18
Campaña 10	Campaña de muestreo	10-10-18

A lo largo de este capítulo se presentan los resultados de aforo de cada campaña. En cada resumen de campaña se presentan gráficas con los caudales aforados en cada estación, estos se presentan siguiendo el orden de cota de las estaciones. Adicionalmente se presenta un breve análisis espacio-temporal de la lluvia del día anterior y el correspondiente al aforo.

Para facilitar la lectura de los resultados, se debe tener en cuenta que el análisis espacial de la lluvia se hace mediante un mapa de lluvia acumulada sobre la cuenca del río Aburrá-Medellín. Éste se construye a partir de la lluvia derivada del radar meteorológico del AMVA; y representa el acumulado de lluvia de radar en cada celda de la cuenca en un lapso de 36 horas (desde las 6:00 h del día anterior al aforo, hasta las 18:00 h del día del aforo).

Por otro lado, el análisis temporal se realiza basado en el hietograma de la lluvia evaluada en el período antes mencionado. Éste se construye promediando el campo de lluvia sobre la cuenca, para cada paso del tiempo.

Adicionalmente, para cada resumen de campaña se presenta una tabla y el análisis de los parámetros hidráulicos mas importantes medidos por el dispositivo de aforo y que hace parte del ejercicio de medición.

Información general de estaciones

Durante esta etapa de RedRío se adicionaron dos estaciones nuevas a las campañas de monitoreo de muestra completa, que corresponden al río Aburrá-Medellín: la estación Reserva(E0) y Parque de las aguas(E14). La estación Reserva es la primera estación de aforo sobre el río Aburrá-Medellín, esta estación se encuentra ubicada en la zona sur del Valle de Aburrá, en la reserva del alto de San Miguel. Por su parte la estación parque de las aguas, se encuentra ubicada en la zona norte del Valle de Aburrá, antes de la descarga de Tasajera.

El cálculo de los caudales en las estaciones del río Aburrá-Medellín se hace a partir de los aforos realizados directamente sobre la corriente, a excepción de las estaciones Niquía (E21), Puente Gabino(E20), descarga PTAR San Fernando(D1) y Parque de las aguas(E14). Los caudales de la estación “Descarga PTAR San Fernando”, son obtenidos de las mediciones que realiza EPM (Empresas públicas de Medellín). El caudal de la estación Puente Gabino se estima mediante curva de calibración a partir de los registros de profundidad de la lámina de agua, suministrados por una estación de EPM.

El caudal de la estación Niquía se calcula mediante la adición de los caudales de la estación inmediatamente anterior, Puente Machado (E11) y el afluente Q. La Rodas (Q18). En esta estación de medición, no es posible instalar un sensor de nivel, porque no hay ninguna estructura adecuada para instalarlo, tampoco hay una estructura desde la cual se pueda realizar un aforo por suspensión y debido a la profundidad de las aguas en el sector es imposible realizar un aforo por vadeo. Se debe aclarar que el caudal presentado en Niquía esta siendo subestimado, ya que además de la quebrada La Rodas, existen otros tres afluentes en la ladera oriental: quebrada La Trinidad y dos afluentes sin nombre; en la ladera occidental existen dos grandes afluentes: quebrada La Seca, quebrada Niquía.

El caudal de Parque de las Aguas(E14), se obtiene de manera similar a la estación anterior, debido que no existe una estructura que permita realizar el aforo por suspensión y la profundidad de las aguas hacen imposible un aforo por vadeo. El caudal se calcula mediante la resta de 5 corrientes al caudal aforado en Hatillo (E15), que es la próxima estación ubicada aguas abajo que permite hacer un aforo por suspensión. estas corrientes son: Q. Laquicianega, Q. La Trocha, Q.Los Totumos, Q.Platanillo, Q. sin nombre. Estas quebradas se aforaron antes de la campaña. La magnitud del caudal de todos estos afluentes (0.27 m³/s) se considera poco influyente en términos de cantidad de agua, comparada al caudal que transporta el río Aburrá-Medellín en este tramo (33.07 m³/s). La única excepción es la descarga de la “central La Tasajera”, la cual aporta un caudal de 12.5 m³/s por cada turbina, lo cual puede alcanzar hasta un caudal máximo de 37.5 m³/s cuando están operando a su capacidad total, aun así estas operaciones no tienen un horario establecido por lo cual no tiene una periodicidad y solo se puede conocer el caudal a través de aforos líquidos o pidiendo los valores de caudal a EPM.

5.1. Campaña 25 de Abril

5.1.1. Análisis de Lluvia

El evento de precipitación de mayor importancia, ocurrió entre las 00:00 y las 06:00 del 25 de abril, alcanzó una intensidad promedio en la cuenca de 4 mm/h (Figura 5.1). El recuadro de la derecha presenta la localización espacial de los máximos acumulados de precipitación en la misma ventana de tiempo, los cuales se ubicaron en la zona norte del Valle de Aburrá, con valores mayores a 92.1 mm en las partes altas de las microcuencas de la ladera nor-occidental y en el tramo donde confluyen las quebradas las Lajas y Piedra Gorda con el río Aburrá-Medellín.

Los mayores caudales se presentaron en la zona norte, en respuesta a las lluvias que se presentaron en la madrugada del día del aforo, no solo por la saturación de la cuenca, también debido al trasvase realizado desde el embalse Riogrande II a la descarga de la central “Tasajera”, ubicada entre Parque de las aguas y Hatillo; y del caudal de Río Grande aguas arriba de Puente Gabino, hacen que los caudales en estas dos estaciones superen los caudales medidos regularmente en esta época del año.

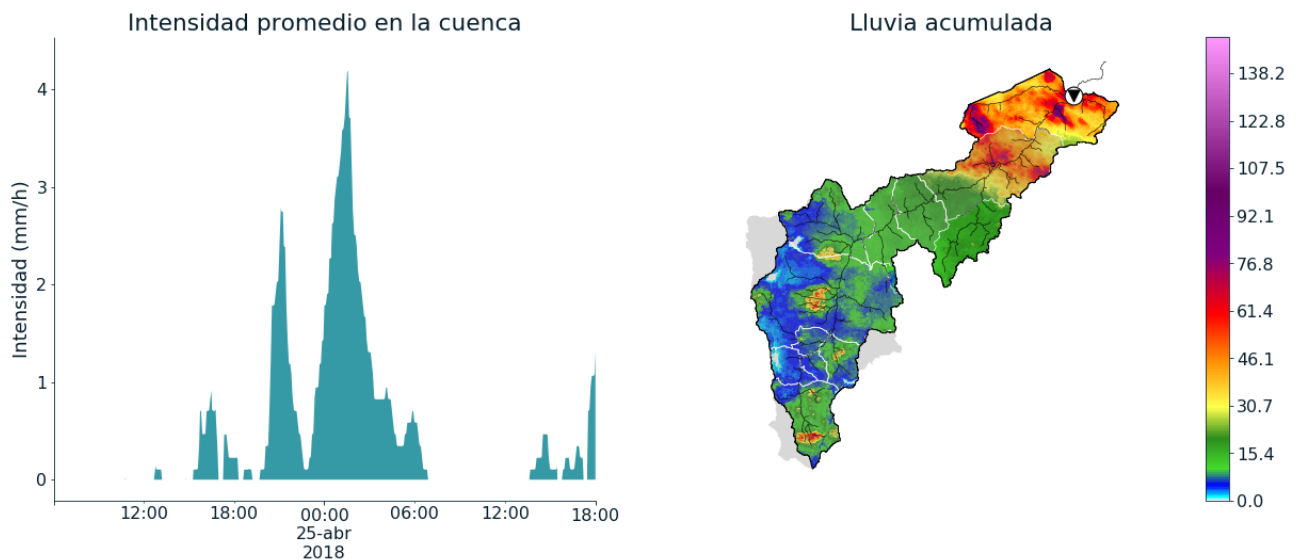


Figura 5.1: Lluvia Campaña 25 de Abril.

En el siguiente enlace se pueden consultar los reportes de lluvia generados por el SIATA para la fecha en la cual se realizó el aforo. Estos reportes se muestran como información adicional al análisis de lluvia que se realiza en cada campaña:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1377-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-04-25\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1377-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-04-25).pdf)

5.1.2. Análisis de resultados

En la Figura 5.2, se presenta un diagrama de barras con los caudales obtenidos en cada estación. Como es de esperarse, el comportamiento de los caudales incrementa en cada estación del río, conforme aumenta el tamaño el área de drenaje de la cuenca. La influencia de la lluvia en la zona norte del Valle de Aburrá presentada en la figura 5.1, incrementó en mayor proporción los caudales aguas abajo del municipio de Barbosa. Las estaciones Parque de las aguas(E14), Papelsa(E16) y Puente Gabino(E20) se ven altamente influenciados por la descarga de la “Central La Tasajera”, que tiene una influencia en los caudales aforados después de las 10:00 h, donde se evidenció un aumento de las descargas producidas por la central hidro-eléctrica. Adicionalmente se observa que el caudal en Puente Gabino es muy alto comparado con la tasa de aumento de los caudales de las estaciones aguas arriba, debido a la confluencia con Río Grande antes de llegar a esta estación.

En la tabla 5.2, se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de cada estación de aforo. Debido a las altas velocidades y profundidades del flujo, durante la campaña no fue posible aforar por medio de vadeo o suspensión las estaciones marcadas con (*) en la tabla, por lo que el caudal se estimó a partir de las mediciones de velocidad superficial. Los aforos especiales de esta campaña son Niquía (E21), Parque de las aguas (E14) y Puente Gabino (E20), al principio de la sección 5, se puede consultar la metodología usada para la estimación de estos caudales.

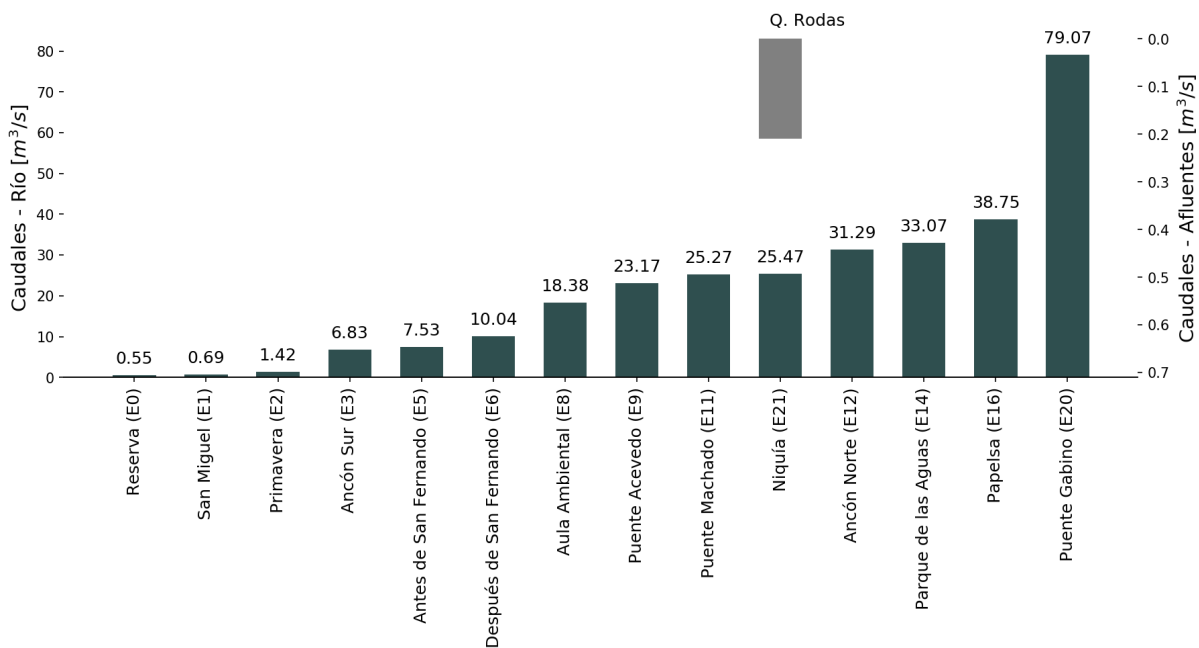


Figura 5.2: Resultados Campaña 25 de Abril

Tabla 5.2: Parámetros hidráulicos campaña 25 de Abril de 2018.

	$B.$ [m]	$H_m.$ [m]	$A_t.$ [m ²]	$V_m.$ [m/s]	$Q_t.$ [m ³ /s]	$P_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Reserva (E0)	5.60	0.14	0.76	0.72	0.55	5.72	0.13
San Miguel (E1)	3.70	0.36	1.33	0.52	0.69	4.28	0.31
Primavera (E2)	6.30	0.30	1.91	0.74	1.42	6.92	0.28
Ancón Sur (E3)*	14.90	0.71	10.52	0.65	6.83	16.49	0.64
Antes de San Fernando (E5)	21.00	0.42	8.84	0.85	7.53	21.90	0.40
Después de San Fernando (E6)*	19.10	0.62	11.82	0.85	10.04	19.80	0.60
Aula Ambiental (E8)*	34.00	0.55	18.57	0.99	18.38	34.99	0.53
Puente Acevedo (E9)	44.00	0.58	25.54	0.91	23.17	38.78	0.66
Puente Machado (E11)	21.00	1.26	26.54	0.95	25.27	21.41	1.24
Q. Rodas (Q18)	2.70	0.17	0.45	0.46	0.21	2.80	0.16
Niquía (E21)	N/A	N/A	N/A	N/A	25.47	N/A	N/A
Ancón Norte (E12)	25.70	1.23	31.54	0.99	31.29	21.58	1.46
Hatillo (E15)*	18.50	3.56	65.83	0.91	59.97	26.23	2.51
Tasajera (D4)*	16.61	0.95	15.85	1.68	26.63	17.13	0.93
Afluentes Hatillo - Parque de las Aguas	N/A	N/A	N/A	N/A	0.27	N/A	N/A
Parque de las Aguas (E14)	N/A	N/A	N/A	N/A	33.07	N/A	N/A
Papelsa (E16)*	42.00	1.00	41.90	0.93	38.75	31.79	1.32
Puente Gabino (E20)	N/A	N/A	N/A	N/A	79.07	N/A	N/A

$B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico. La velocidad media de las estaciones marcadas con (*) fue estimada a partir de la medición de la velocidad superficial.

En la figura 5.3, se presenta un mapa con los resultados obtenidos en cada estación, además de su ubicación espacial respecto a la cuenca del río Aburrá-Medellín.

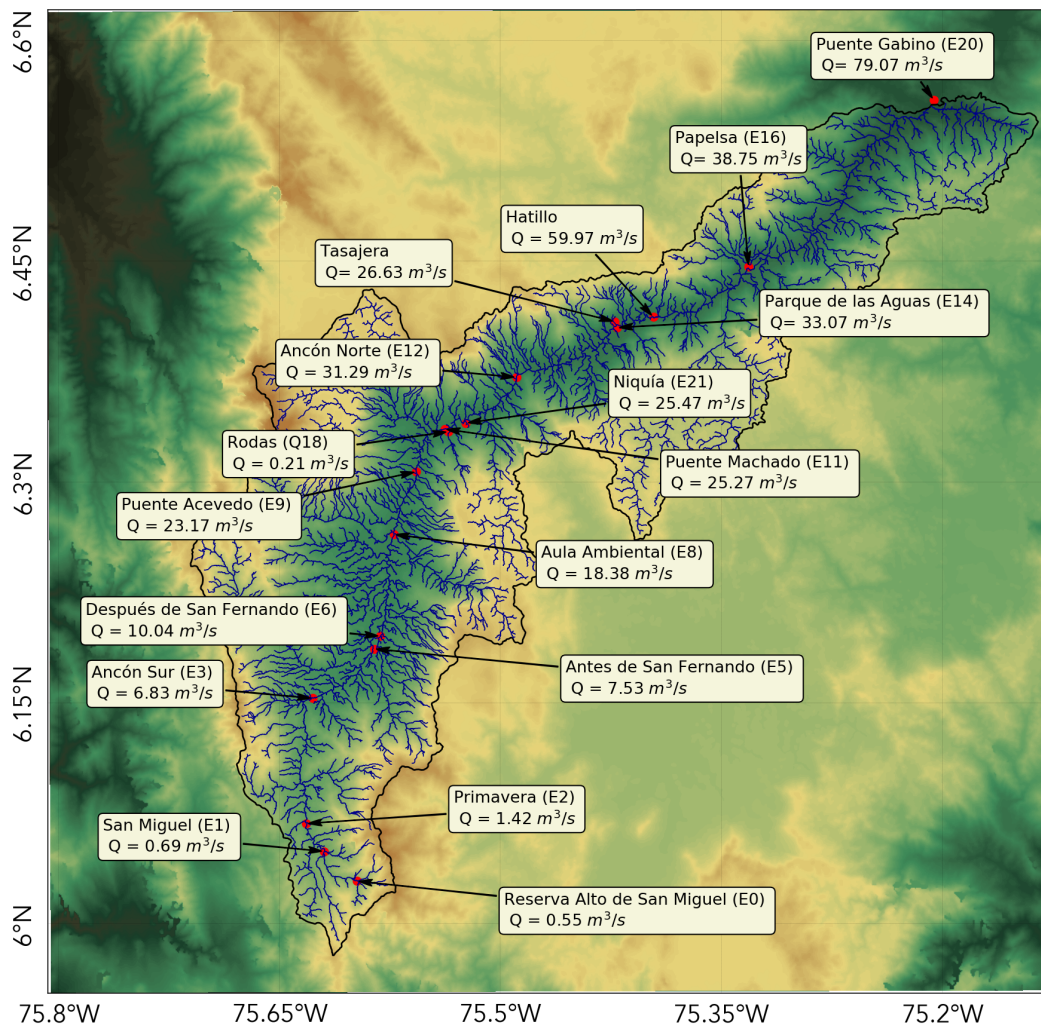


Figura 5.3: Estaciones de aforo sobre el río Aburrá-Medellín, campaña del 25 de Abril de 2018.

5.2. Campaña 09 de Mayo

5.2.1. Análisis de Lluvia

El evento de precipitación de mayor importancia, ocurrió el 08 de Mayo de 2018, entre las 18:00h y las 03:00h, cuya máxima intensidad fue de 4.8 mm/h (ver Figura 5.4), la duración de este evento se prolongó hasta pasadas las 6:00h con menores intensidades. El recuadro de la derecha presenta la localización espacial de los máximos acumulados de precipitación, en la misma ventana de tiempo. Estos núcleos de precipitación se localizaron en la zona norte y en la ladera sur-occidental del Valle de Aburrá, en donde la lluvia acumulada estuvo entre 61.4 mm y 92.1 mm.

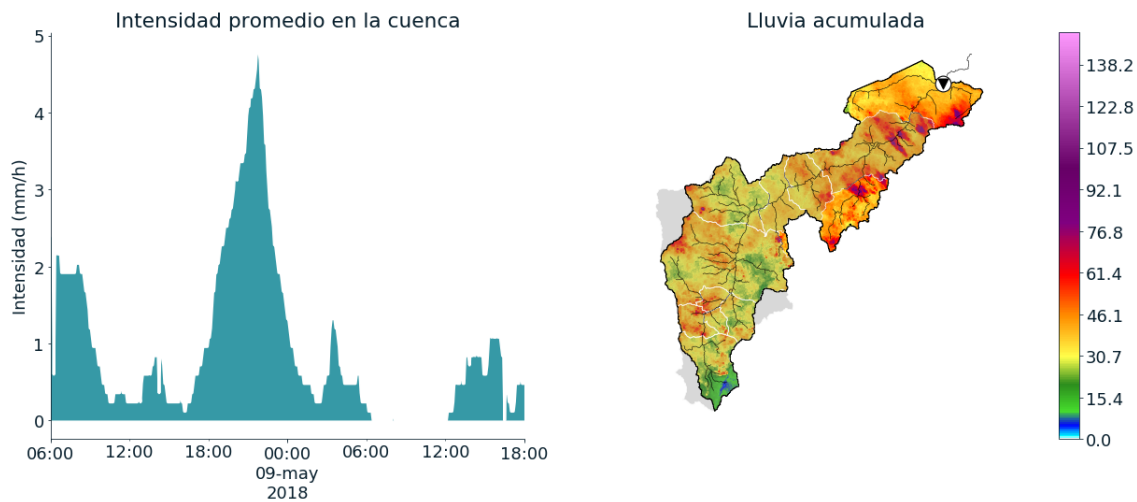


Figura 5.4: Lluvia Campaña 09 de Mayo

En el siguiente enlace se pueden consultar los reportes de lluvia generados por el SIATA para la fecha en la cual se realizó el aforo. Estos reportes se muestran como información adicional al análisis de lluvia que se realiza en cada campaña:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1392-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-05-09\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1392-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-05-09).pdf)

5.2.2. Análisis de resultados

En la Figura 5.5 se observan los resultados de caudal de las 12 estaciones aforadas el día 9 de mayo. De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 5.3, los valores de caudal aforados de todas las estaciones, presentan un régimen de caudal alto respecto a las medidas históricas. Específicamente las estaciones ubicadas en la zona sur-occidental como Doña María (E4), La Picacha(Q20), La Ayurá (Q4) y La Grande (Q5), las cuales se vieron afectadas por las lluvias que se presentaron antes y durante la campaña de medición.

En la figura 5.5 también se observa que el caudal de la PTAR (D1), presenta un valor de caudal elevado, lo cual se debe a que en el momento de la medición presentaba un flujo con velocidades superficiales medias de 3.5 m/s, imposibilitando la medición directamente sobre el cauce. Esta estación no cuenta con curva de calibración, aun así se cuenta con una sección transversal y medidas de la lamina de agua, por este motivo su caudal se calculo respecto a la medición de velocidad superficial. Las velocidades superficiales son mayores que la velocidad media del flujo y en canales a flujo libre la velocidad tiene un comportamiento logarítmico la cual es creciente a medida que se aleja del fondo, por esta razón las velocidades superficiales se pueden transformar a velocidades medias, multiplicándolas por un factor de 0.8, aun así este factor se debe calibrar ya que varia respecto a las margenes del canal, por tanto se puede llegar a sobrestimar el valor del caudal al considerar un factor homogéneo para toda la sección. Al igual que la estación (D1), El caudal de las estaciones marcadas con (*) en la tabla 5.3 se estimaron a partir de las velocidades superficiales del flujo.

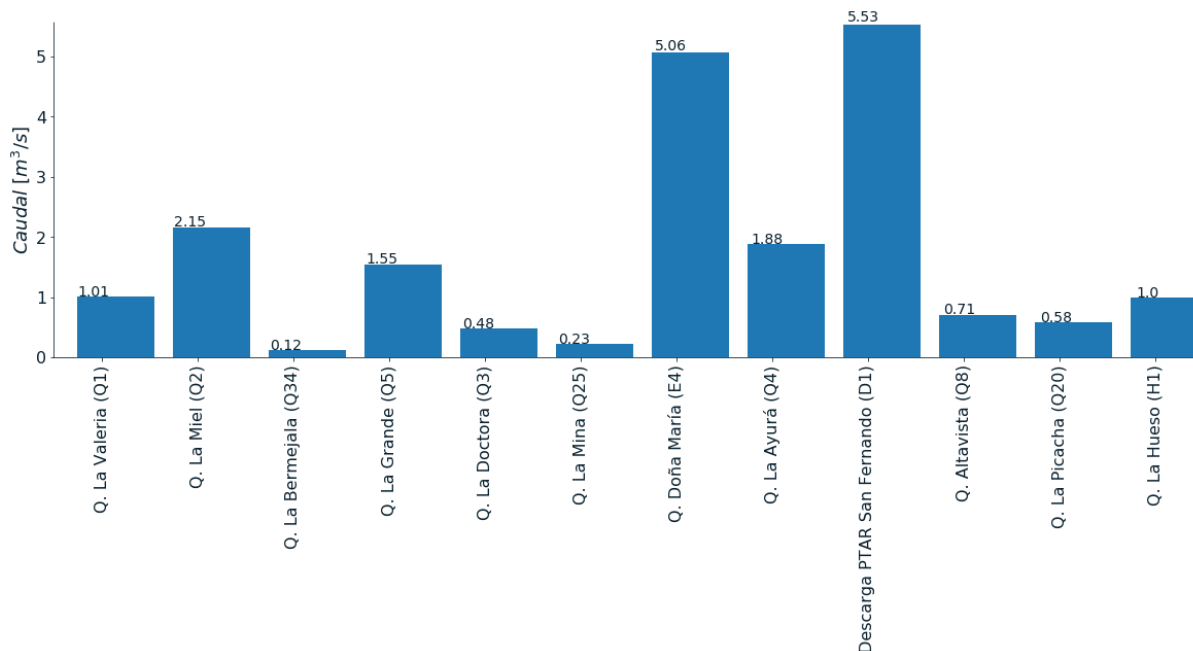


Figura 5.5: Resultados Campaña 09 de Mayo de 2018.

El cambio en los parámetros hidráulicos muestra que las velocidades más altas del flujo se presentan en las quebradas canalizadas, como lo son la quebrada la Picacha (Q20), La Hueso (Q9) y la descarga de la PTAR (D1).

Tabla 5.3: Parámetros hidráulicos campaña 9 de Mayo de 2018.

	$B.$ [m]	$H_m.$ [m]	$A_t.$ [m ²]	$V_m.$ [m/s]	$Q_t.$ [m ³ /s]	$P_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Hueso (Q9)*	3.60	0.36	1.15	0.87	1.00	3.99	0.29
Q. La Valeria (Q1)	2.78	0.38	1.08	0.94	1.01	3.50	0.31
Q. La Miel (Q2)	5.80	0.29	1.69	1.27	2.15	6.35	0.27
Q. La Bermejala (Q34)	3.30	0.27	0.85	0.14	0.12	4.03	0.21
Q. La Grande (Q5)*	4.00	0.49	1.82	0.85	1.55	4.47	0.41
Q. La Doctora (Q3)	3.70	0.39	1.48	0.32	0.48	4.29	0.34
Q. La Mina (Q25)	1.60	0.11	0.18	1.27	0.23	1.75	0.10
Q. Doña María (E4)	13.17	0.53	6.81	0.74	5.06	13.63	0.50
Q. La Ayurá (Q4)	3.80	0.67	2.15	0.88	1.88	5.38	0.40
Descarga PTAR San Fernando (D1)*	4.23	0.43	1.82	3.04	5.53	5.09	0.36
Q. Altavista (Q8)	11.40	0.12	1.26	0.57	0.71	11.42	0.11
Q. La Picacha (Q20)*	0.99	0.29	0.21	2.73	0.58	1.31	0.16

$B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico. La velocidad media de las estaciones marcadas con (*) fueron estimados a partir de la medición de la velocidad superficial.

A continuación en la figura 5.6 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en cada estación y su ubicación respecto a la cuenca del río Aburrá-Medellín:

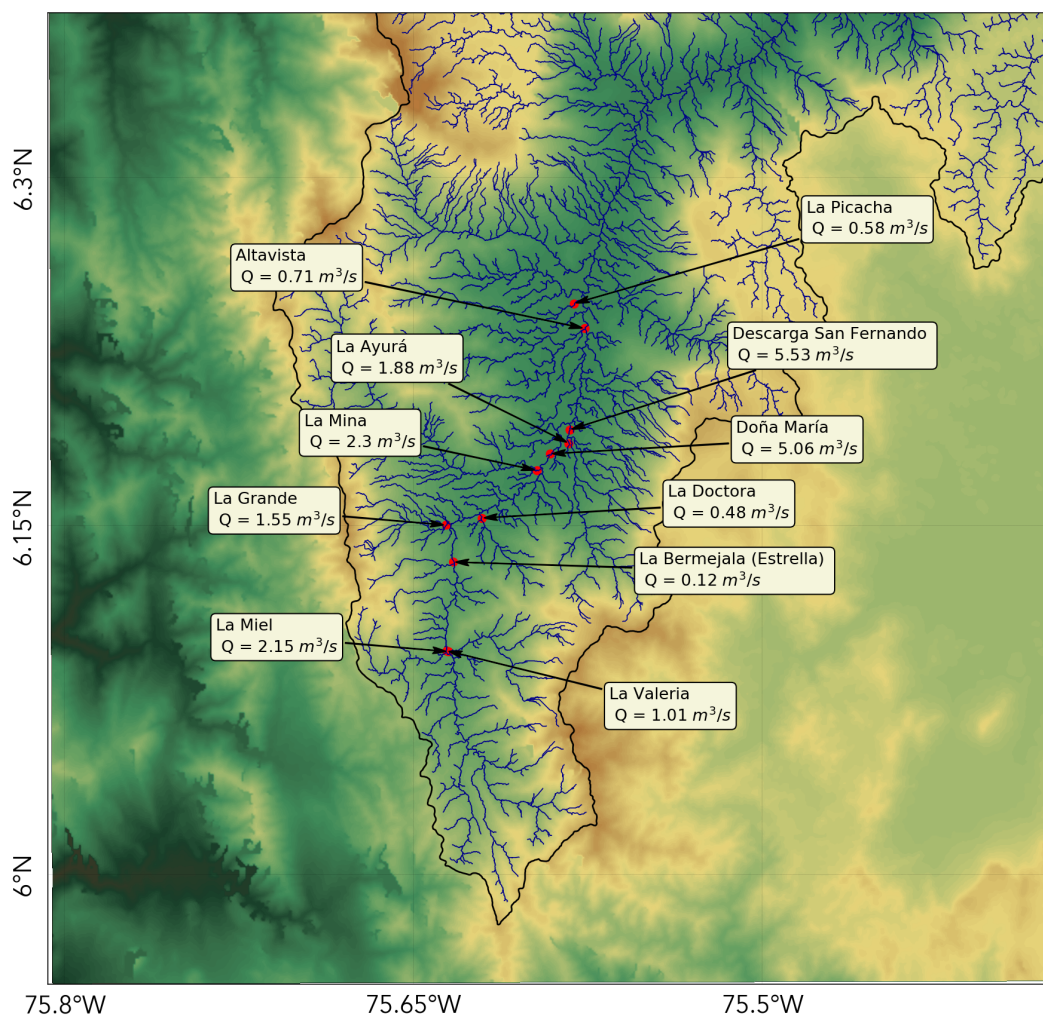


Figura 5.6: Estaciones de aforo sobre los afluentes del río Aburrá-Medellín, campaña del 9 de mayo de 2018.

5.3. Campaña 10 de Mayo

5.3.1. Análisis de Lluvia

En el recuadro de la izquierda de la figura 5.7 se presenta la intensidad de lluvia promedio durante un periodo de 36 horas, desde las 6:00 del día anterior, hasta las 18:00 (en la tarde) del día del aforo. El evento de precipitación de mayor importancia, ocurrió el 9 de Mayo de 2018, entre las 18:00 y las 00:00, cuya intensidad máxima fue de 3.96 mm/h, la duración de este evento se prolongó hasta pasadas las 06:00h con precipitaciones de menor magnitud en las horas de la tarde del día 10 de mayo, El recuadro de la derecha presenta la localización espacial de los acumulados de precipitación en la misma ventana de tiempo, en la cual se observan núcleos de precipitación muy cercanos al cauce principal, distribuidos a lo largo del Río Aburrá-Medellín con mayor presencia hacia el centro-norte del Valle de Aburrá, cuyos valores superaron 61.4 mm de lluvia acumulada.



Figura 5.7: Lluvia Campaña 10 de Mayo

En el siguiente enlace se pueden consultar los reportes de lluvia generados por el SIATA para la fecha en la cual se realizó el aforo. Estos reportes se muestran como información adicional al análisis de lluvia que se realiza en cada campaña:

[http://siata.gov.co/reporte_eventos/1393-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-05-10\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1393-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-05-10).pdf)

5.3.2. Análisis de resultados

La Figura 5.8 muestra el resumen de los caudales obtenidos en cada estación durante la campaña de aforo realizada el 10 de Mayo de 2018. Debido a las precipitaciones que se presentaron antes y durante la campaña de medición, los caudales aforados estuvieron por encima de los registros históricos y del comportamiento habitual de las corrientes, de las cuales sobresalen la quebrada Ovejas (Q30), Santa Elena (Q10), La Iguaná (Q11) y La García (E10), las cuales tuvieron mayores valores de caudal, alcanzando incluso los valores máximos de los registros históricos.

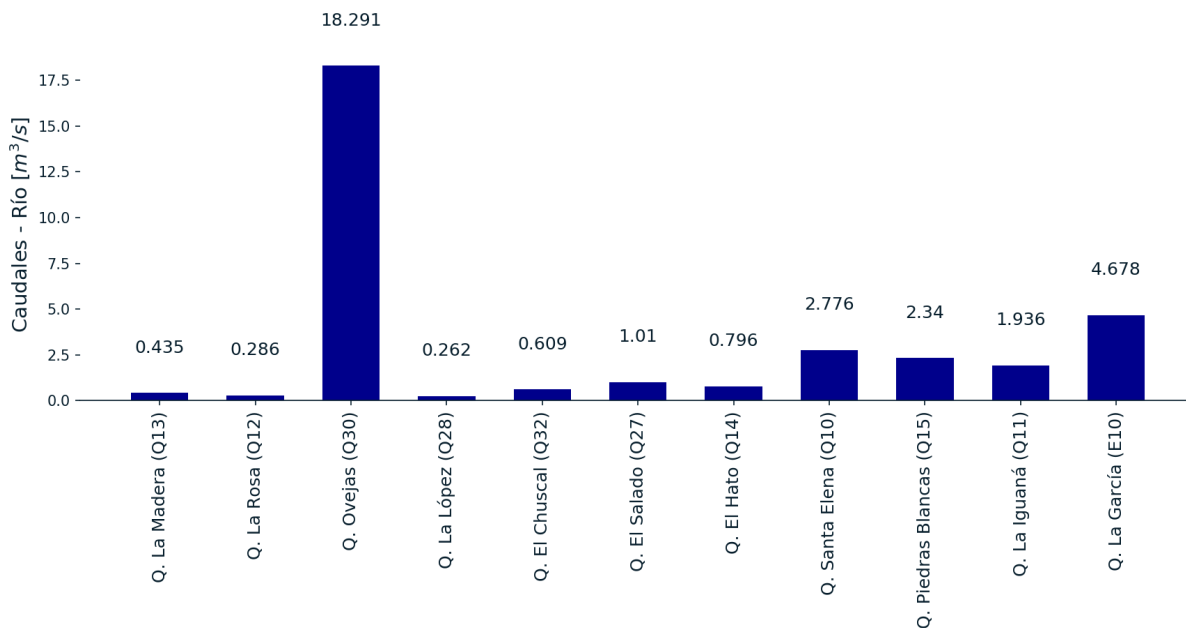


Figura 5.8: Resultados Campaña 10 de Mayo.

Debido a las altas velocidades y profundidades del flujo que se presentaron en la Q.Ovejas(Q30), se hizo imposible la medición directa del caudal, por tal motivo el caudal se estimó de acuerdo a las mediciones de velocidad superficial, las cuales fueron transformadas a velocidades medias, la quebrada Ovejas es una de las más caudalosas del Valle de Aburrá, cuyo caudal medio histórico ($3.033 \text{ m}^3/\text{s}$) supera el de la quebrada La García ($2.416 \text{ m}^3/\text{s}$).

En la descarga del interceptor oriental(D3), no se pudo realizar el aforo porque el nivel del río cubría la descarga del interceptor. En las demás estaciones el aforo se llevó a cabo bajo condiciones normales del flujo.

En la tabla 5.4 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos más relevantes de la estación de aforo. Se puede observar una tendencia al aumento del caudal junto con el área y el perímetro mojado, mientras que la velocidad y la altura media se comportan de manera independiente, de acuerdo de las características del lecho, las bancas y la pendiente media del canal. El radio hidráulico, siendo la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, siendo una medida para calcular la pérdida de flujo en canales no circulares, y que varía según la forma geométrica del canal.

Tabla 5.4: Parámetros hidráulicos campaña 10 de Mayo de 2018.

	$B.$ [m]	$H_m.$ [m]	$A_t.$ [m ²]	$V_m.$ [m/s]	$Q_t.$ [m ³ /s]	$P_m.$ [m]	$R_h.$ [m]
Q. La Iguaná (Q11)	7.00	0.26	1.58	1.22	1.94	7.58	0.21
Q. Santa Elena (Q10)	9.77	0.30	2.84	0.98	2.78	10.03	0.28
Q. La Rosa (Q12)	3.0	0.16	0.5	0.86	0.43	3.3	0.15
Q. La Madera (Q13)	5.60	0.20	1.14	0.38	0.43	5.97	0.19
Q. El Hato (Q14)	6.70	0.25	1.68	0.47	0.80	7.09	0.24
Q. La García (E10)	10.80	0.43	4.60	1.02	4.68	10.96	0.42
Q. Piedras Blancas (Q15)	6.86	0.43	2.68	0.87	2.34	7.10	0.38
Q. El Chuscal (Q32)*	3.15	0.36	0.92	0.66	0.61	3.43	0.27
Q. El Salado (Q27)	5.44	0.34	1.71	0.59	1.01	5.62	0.30
Q. Ovejas (Q30)*	9.30	1.12	10.39	1.76	18.29	11.63	0.89
Q. La López (Q28)	3.05	0.14	0.37	0.70	0.26	3.11	0.12

$B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico. El caudal de las estaciones marcadas con (*) fue estimado a partir de la medición de la velocidad superficial.

A continuación en la figura 5.9, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en cada estación perteneciente a la campaña de este día.

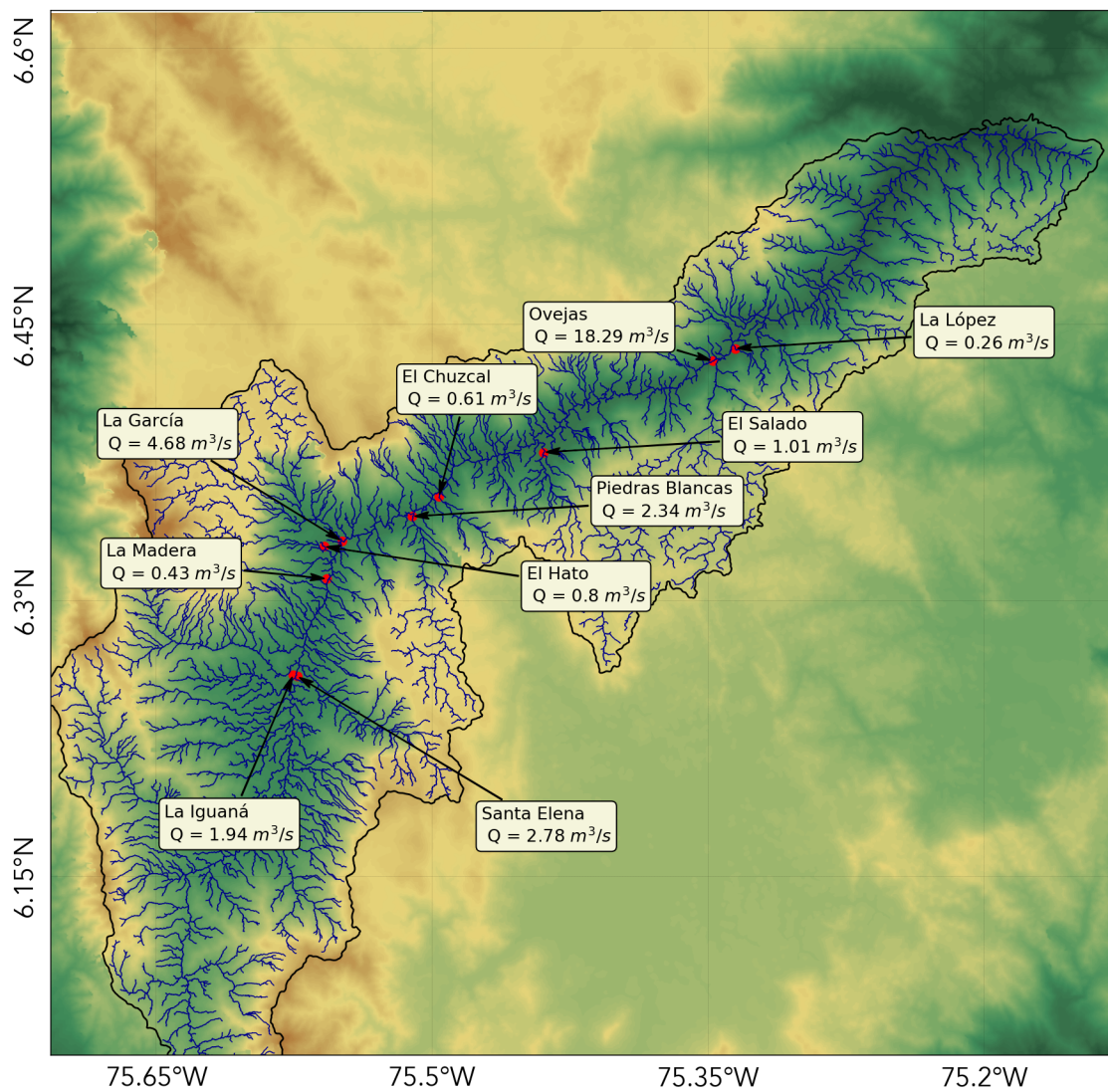


Figura 5.9: Mapa de estaciones de aforo sobre los tributarios del río Aburrá-Medellín, zona norte.

5.4. Campaña 13 de Junio

5.4.1. Análisis de Lluvia

El día de la campaña sólo se presentó un evento de precipitación a las 14:25 hrs, cuya intensidad máxima fue de 0.12 mm/h. El evento tuvo una duración de 20 minutos; se presentó desde las 14:10 hrs hasta las 14:30 hrs. Debido a la baja intensidad y duración del evento, no se vieron afectados los resultados de la campaña.

Durante la noche, después del aforo se presentó el evento de máxima intensidad a las 23:30 hrs con un valor de 33.53 mm. A partir de este evento se reportaron los máximos acumulados en la zona norte del Valle de Aburrá, en las subcuencas de las quebradas los Chorros y el Reventon (ver figura 5.10).

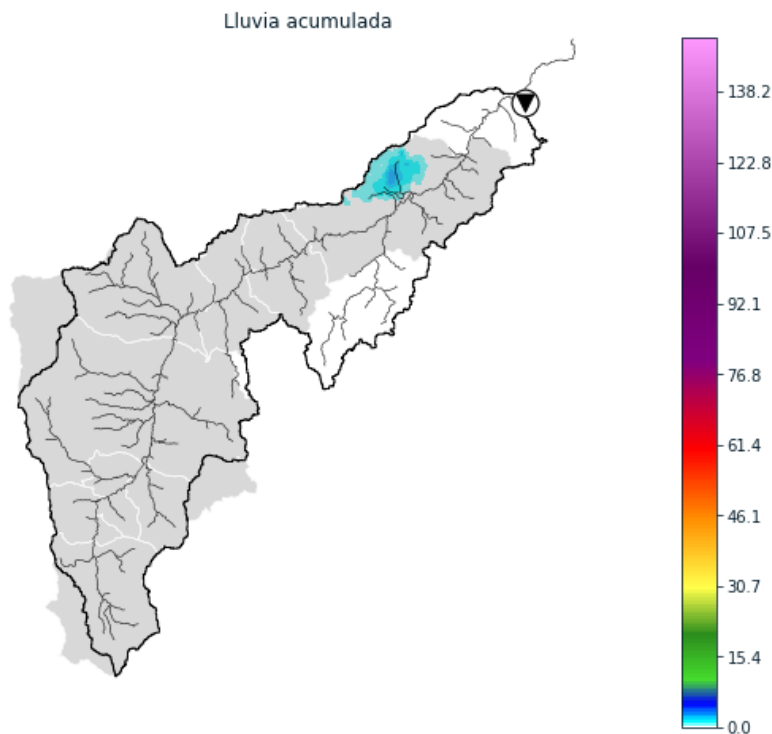


Figura 5.10: Lluvia Campaña 13 de Junio

Según los reportes de lluvia emitidos por el SIATA, en los días que antecedieron la campaña de aforo, la máxima intensidad de lluvia (79.25 mm), se presentó el día 11 de Junio a las 16:48 hrs, en la zona sur del Valle de Aburra, en un evento que duró 11 horas 47 minutos.

se puede concluir que el evento que se presentó el día del aforo, no fue significativo ni tuvo influencia en el resultado de los aforos. Por el contrario el evento que se presentó el 11 de Junio por su alta intensidad y duración, si tuvo una influencia en la humedad del suelo

de la cuenca, sobretodo en la zona sur de Valle de Aburrá. En consecuencia algunos de los caudales de este día se comportaron por encima de la mediana, sobretodo en las estaciones ubicadas en el sur del Valle de Aburrá. Los reportes se pueden consultar en el siguiente enlace:

Reporte del 11 de Junio: [http://siata.gov.co/reporte_eventos/1425-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-06-11\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1425-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-06-11).pdf)

Reporte del 13 de Junio: [http://siata.gov.co/reporte_eventos/1426-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-06-13\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1426-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-06-13).pdf)

5.4.2. Análisis de resultados

A continuación, en la figura 5.11 se muestra un diagrama con los resultados obtenidos. Como se mencionó en el apartado anterior los resultados de los caudales de este día se encuentran clasificados dentro de los rangos de caudales altos para todas las estaciones, debido a las lluvias antecedentes en la cuenca.

En la figura 5.11, se observa que todos los caudales aumentan de manera uniforme de acuerdo al área aferente de la cuenca en cada punto. Por otra parte, se visualiza un aumento significativo de los caudales después de la estación Parque de las aguas (E14); esto debido a la descarga de la “central La Tasajera”.

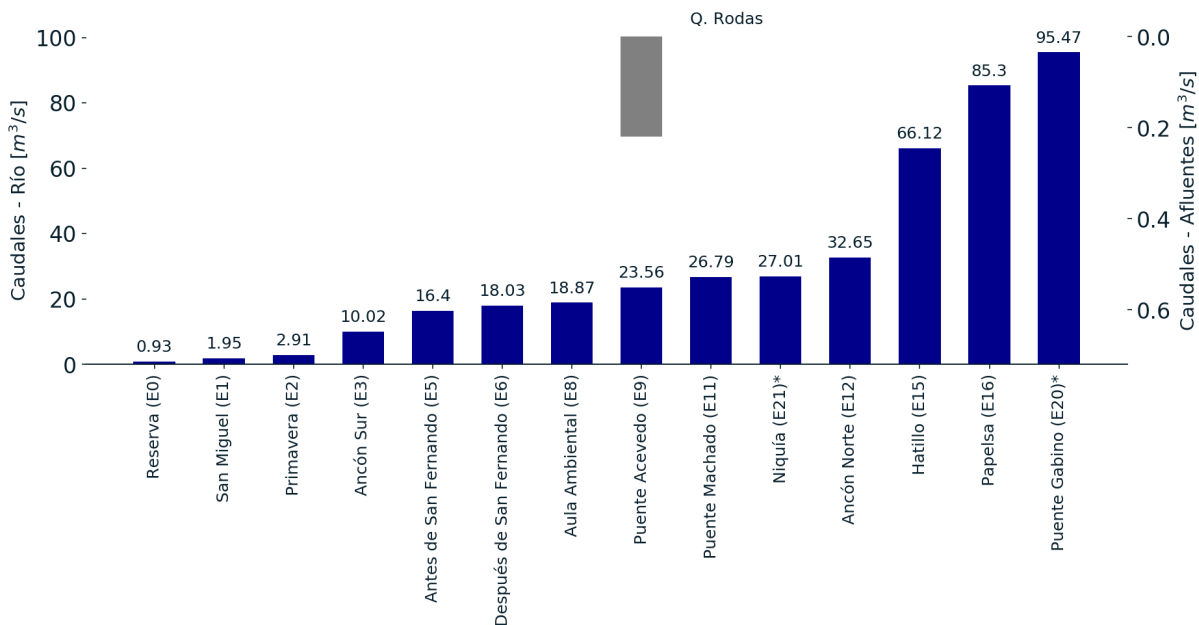


Figura 5.11: resultados Campaña 13 de Junio

La tabla 5.5 muestra algunos de los parámetros hidráulicos de mayor relevancia en cada estación. Las estaciones que aparecen sombreadas son estaciones temporales que no forman parte de las estaciones principales de la campaña, pero que son necesarias para estimar el caudal de la siguiente estación principal aguas abajo. En la tabla se observa que todos los parámetros de geometría hidráulica aumentan a medida que la estación se ubica más aguas abajo, a excepción del parámetro de radio hidráulico (R_h) y de la velocidad media (V_m), que aunque tienen una tendencia a aumentar hacia aguas abajo, no siempre cumplen esta condición.

Tabla 5.5: Parámetros hidráulicos campaña 13 de Junio de 2018.

Estación	Hora	A_c [km^2]	Q [m^3/s]	H_m [m]	B [m]	A_t [m^2]	P [m]	R_h [m]	V_m [m/s]
Reserva (E0)	07:33	25.26	0.93	0.14	9.7	1.25	9.86	0.13	0.74
San Miguel (E1)	08:39	31.89	1.95	0.39	4.8	1.78	5.26	0.34	1.1
Primavera (E2)	10:27	51.62	2.91	0.46	7	3.06	7.23	0.42	0.95
Ancón Sur (E3)	12:00	138.22	10.02	0.83	14	11.67	15.98	0.73	0.86
Antes de San Fernando (E5)	13:18	232.55	16.40	0.68	20	13.94	21.52	0.65	1.18
Después de San Fernando (E6)	12:56	296.80	18.03	0.85	21.13	18.21	22.47	0.81	0.99
Aula ambiental (E8)	13:00	470.8	18.87	-	-	-	-	-	-
Puente Acevedo (E9)	15:45	504.12	23.56	0.78	37.5	32.01	38.28	0.84	0.74
Puente Machado (E11)	14:25	633.05	26.79	1.23	20.5	22.55	21.15	1.07	1.19
Q. Rodas	15:10	6.06	0.22	0.25	2.2	0.42	2.38	0.18	0.53
Niquía (E21)*	14:25	645.63	27.01	-	-	-	-	-	-
Ancón Norte (E12)	13:05	723.12	32.65	1.41	25.01	31.35	27.51	1.14	1.04
Parque de las Aguas (E14)*	10:10	824.12	34.50	-	-	-	-	-	-
Descarga Tasajera	11:24	823.92	31.62	0.88	15	16.19	16.23	1	1.95
Hatillo (E15)	10:10	846.39	66.12	2.77	18.4	62.41	24.86	2.51	1.06
Papelsa (E16)	08:45	1003.62	85.30	2.31	36.6	76.67	37.56	2.04	1.11
Puente Gabino (E20)*	15:30	1184.16	95.468	-	-	-	-	-	-

A_c . = Área de la cuenca, B . = Ancho superficial, Q_t . = Caudal total, V_m . = Velocidad promedio, A_t . = Área total, P_m . = Perímetro mojado, H_m . = Profundidad media, R_h . = Radio hidráulico. El caudal de las estaciones marcadas con (*) fue estimado a partir de la medición de la velocidad superficial.

5.5. Campaña de tiempos de viaje 18, 19 y 20 de Junio.

5.5.1. Análisis de Lluvia

La campaña de tiempos de viaje se realizó los días 18, 19 y 20 de Junio. Durante estos tres días la máxima intensidad de lluvia (2.16 mm/h) se presentó el último día de la campaña a las 13:25:00 (izquierda de la figura 5.12). Sin embargo, durante la noche del 19 de Junio y la madrugada del 20 de Junio se presentó un evento en la zona sur del Valle de Aburrá que alteró los caudales medidos desde Papelsa hacia aguas abajo. Las condiciones hidrometeorológicas del resto de la campaña fueron estables, por lo que los caudales medidos corresponden al comportamiento regular de la corriente durante la época seca.

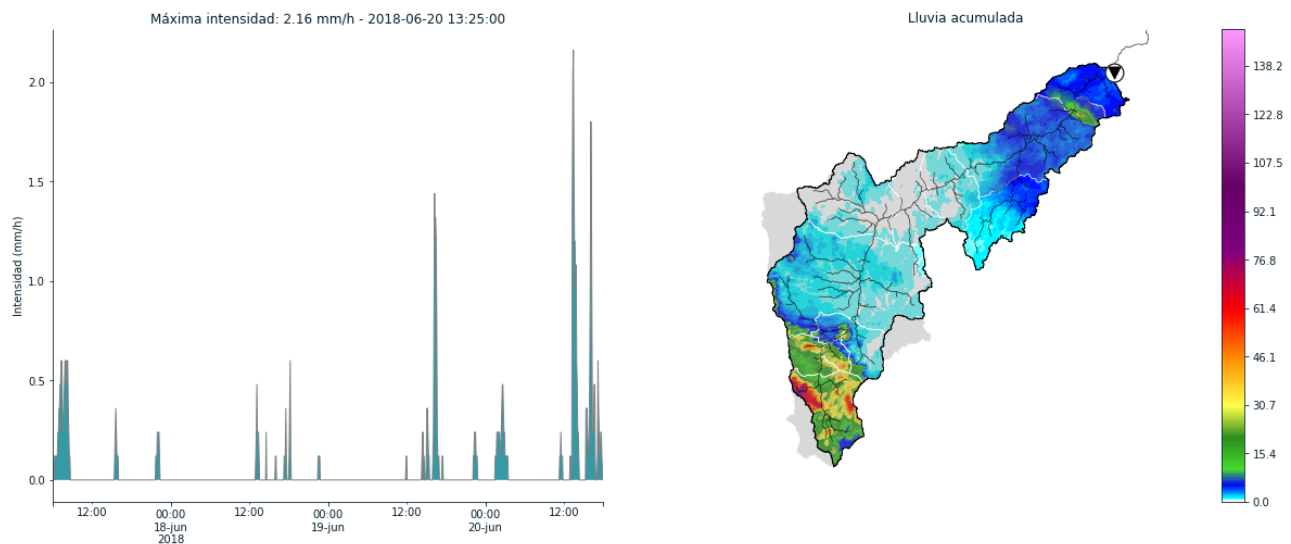


Figura 5.12: Lluvia Campaña de tiempos de viaje

5.5.2. Análisis de resultados

En las tablas 5.6, 5.7 y 5.8 se muestran los resultados de los parámetros hidráulicos obtenidos durante los tres días de la campaña de tiempos de viaje. El primer día de la campaña (tabla 5.6) todas las estaciones se aforaron con medición directa en la corriente excepto las estaciones San Miguel (E1) y Aula ambiental (E8), las cuales cuentan con sensor de velocidad superficial y sensor de nivel, por lo que fue posible suministrar un dato de caudal en tiempo real.

En la campaña de tiempos de viaje, además del dato de caudal es relevante analizar el dato de velocidad media (V_m) y el dato de velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x}$). La estación de

mayor velocidad máxima fue Ancón Sur (E3), debido principalmente al cambio de en la cobertura y los materiales del canal que aceleran el flujo después de pasar de una sección natural a una sección canalizada aguas abajo de Ancón sur. Como comportamiento general se observa que tanto las velocidades medias como las velocidades superficiales aumentan a medida que el río transporta más caudal.

Tabla 5.6: Parámetros hidráulicos campaña 18 de Junio de 2018.

Estación	Hora	Ac [km^2]	Q [m^3/s]	Hm [m]	B [m]	At [m^2]	P [m]	Rh [m]	Vm [m/s]	V _{max} [m/s]
San Miguel (E1)	05:00	30.51	0.615	-	-	-	-	-	-	-
Primavera (E2)	06:15	54.00	2.72	0.39	7.5	3.05	8.15	0.37	0.89	1.2
Ancón Sur (E3)	08:19	131.17	6.37	0.84	15	12.65	16.98	0.75	0.5	1.3
Antes de San Fernando (E5)	11:40	232.55	8.52	0.65	21	15.37	22.41	0.69	0.55	0.825
Estación Poblado (Metro)	12:05	286.98	11.2	0.61	24.2	13.49	24.42	0.55	0.83	0.98
Puente Guayaquil (E7)	12:36	309.94	12.14	0.47	32.6	13.48	32.91	0.41	0.9	1.21
Aula Ambiental (E8)	12:30	470.80	13.99	-	-	-	-	-	-	-
Caribe	12:36	476.46	20.21	0.65	39	24.69	40.6	0.61	0.82	1.21
Puente Acevedo (E9)	14:00	504.12	22.73	0.77	39.87	27.82	40.62	0.68	0.82	0.975

Tabla 5.7: Parámetros hidráulicos campaña 19 de Junio de 2018.

Estación	Hora	Ac [km^2]	Q [m^3/s]	Hm [m]	B [m]	At [m^2]	P [m]	Rh [m]	Vm [m/s]	V _{max} [m/s]
Puente Machado (E11)	06:12	633.05	21.84	1.48	18	28.32	20.89	1.36	0.77	1.43
Ancón Norte (E12)	07:56	723.12	28.36	1.62	24.7	36.62	26.51	1.38	0.77	1.237
Puente Girardota (E13)	09:40	767.27	29.65	1.65	22	35.34	25.1	1.41	0.84	1.134
Hatillo (E15)	12:30	846.39	67.95	3.65	18.4	69.45	26.18	2.65	0.98	1.314
Papelsa (E16)	13:55	1003.62	70.11	1.64	33	52.85	33.74	1.57	1.33	1.816

Tabla 5.8: Parámetros hidráulicos campaña 20 de Junio de 2018.

Estación	Hora	Ac [km^2]	Q [m^3/s]	Hm [m]	B [m]	At [m^2]	P [m]	Rh [m]	Vm [m/s]	V _{max} [m/s]
Papelsa (E16)	06:32	1003.62	72.78	1.6	33	59.67	33.54	1.78	1.22	1.815
Pradera	10:30	1143.86	40.62	1.39	17	24.51	19.03	1.29	1.66	2.08
Puente Gabino (E20)	12:00	1315.62	89.15	-	-	-	-	-	-	-

A_c . = Área de la cuenca, B . = Ancho superficial, Q_t . = Caudal total, V_m . = Velocidad promedio, A_t . = Área total, P_m . = Perímetro mojado, H_m . = Profundidad media, R_h . = Radio hidráulico, V_{max} . = Velocidad Máxima. El caudal de las estaciones marcadas con (*) fue estimado a partir de la medición de la velocidad superficial.

En la figura 5.13 se muestra gráficamente el aumento de caudal hacía aguas abajo en el Río Aburrá-Medellín, separado por líneas punteadas durante cada día de la campaña (18,19 y 20 de Junio). Se observa el aumento progresivo del caudal en las dos primeras campañas, y una disminución en el caudal aforado en la estación Pradera en el tercer día de aforo. Esta disminución se debe a la captación de la PCH Carlos Lleras Restrepo. En otras estaciones el caudal aumenta en mayor proporción comparado con el aumento de las demás estaciones; como el caso de la estación Hatillo (E9) y puente Gabino (E20). En Hatillo el caudal aumenta por la descarga de la central hidroeléctrica “La Tasajeraz en Puente Gabino por la confluencia del río Aburrá-Medellín con Río Grande.

El caudal de la estación Puente Acevedo(E9) presenta una disminución del caudal aforado a las 2:00 pm del día 18 de Junio, al caudal aforado el 19 de junio a las 5:17 am. Esta disminución se debe a que no se presentaron lluvias en este lapso de tiempo como se describió en la sección 5.5.1. Además el caudal aforado tiende a ser menor en horas de la madrugada por la disminución de las descargas sobre el río Aburrá-Medellín.

El tercer día de la campaña no fue posible aforar la estación antes de la PCH Carlos Lleras (Popalito) debido a las altas velocidades del flujo, las cuales no permiten la correcta medición con el equipo.

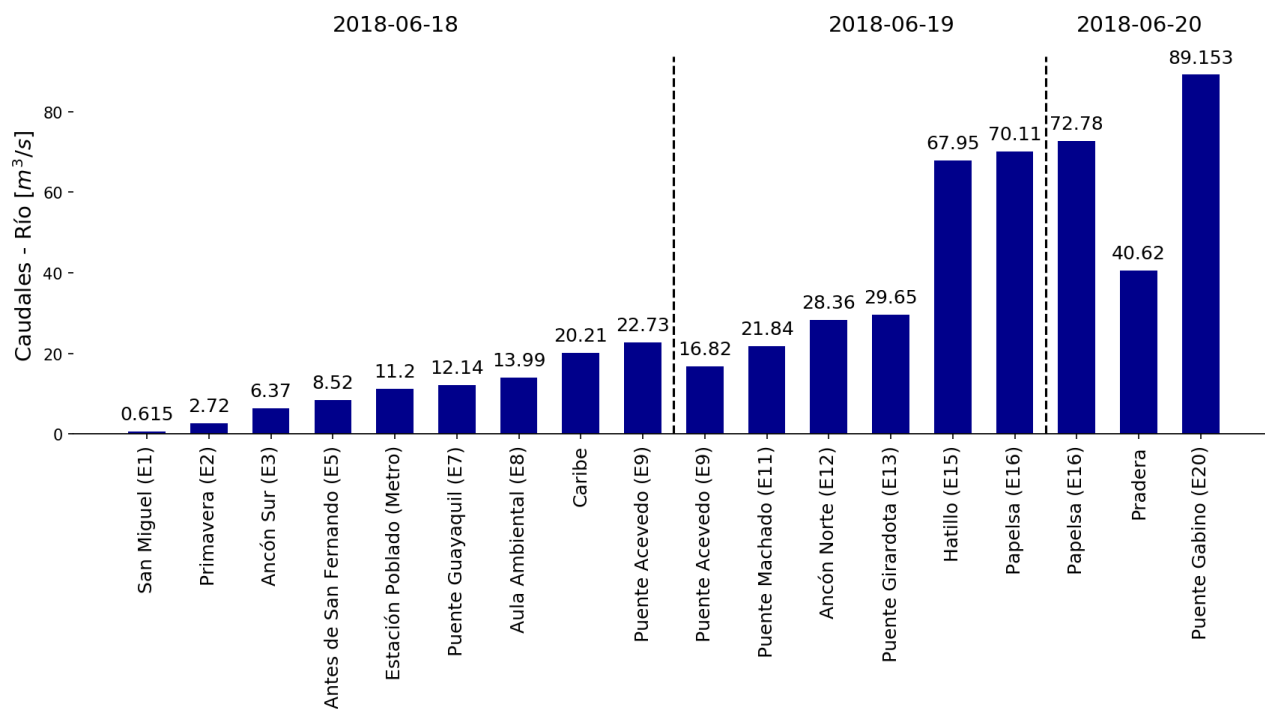


Figura 5.13: Resultados Campaña de tiempos de viaje

5.6. Campaña de modelación 5 y 6 de Julio.

5.6.1. Análisis de Lluvia

Esta campaña de medición ininterrumpida se realizó los días 5 y 6 de julio, durante un periodo de recesión largo en el cual no debían de haber precipitaciones antes o durante la campaña de monitoreo, en la figura 5.14, se muestran las magnitudes de precipitación (izquierda) y los acumulados de precipitación (derecha) durante los dos días de monitoreo. Durante la campaña no hubieron eventos representativos de precipitación que afectaran considerablemente las mediciones, aun así se presentaron dos lluvias con intensidades inferiores a 1.2 mm/h; la primera se presentó el 5 de Julio entre la 1:00 y las 2:00 hrs, y la segunda el 6 de Julio a las 17:20 hrs. Estos dos eventos generaron un acumulado inferior a 40 mm en la zona sur del Valle de Aburrá, debido a las bajas intensidades no se generó reporte de lluvia por parte de SIATA.

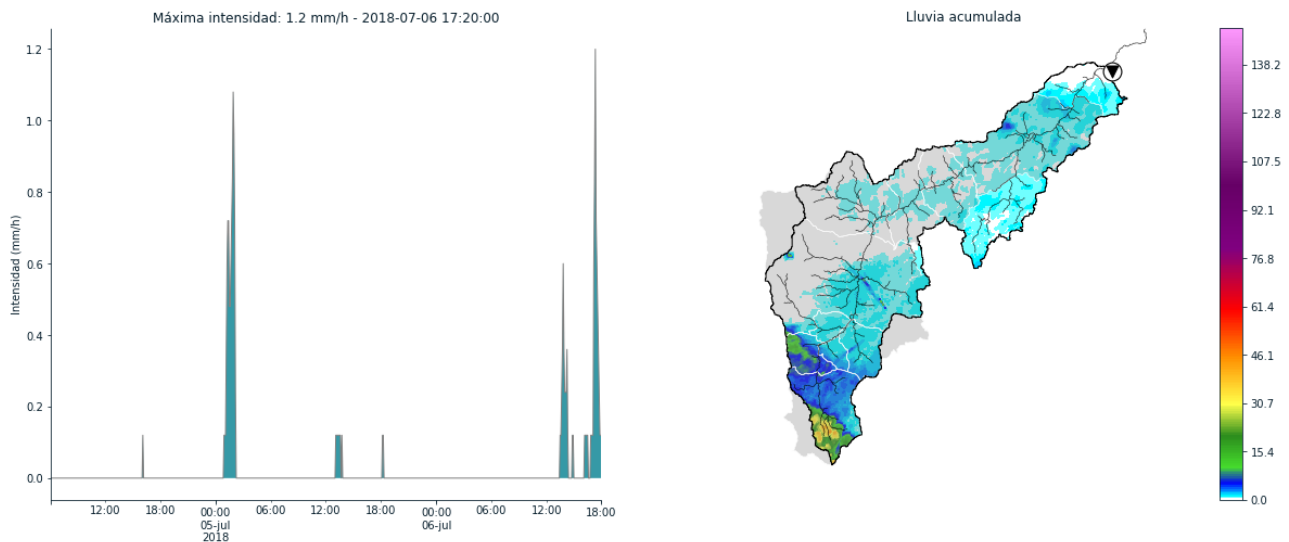


Figura 5.14: Lluvia Campaña de modelación

5.6.2. Análisis de resultados

En la figura 5.15, se presenta un diagrama de barras que muestra el comportamiento de los caudales a lo largo del cauce principal, en la cual se observa un incremento escalonado de los caudales conforme aumenta el tamaño el área de drenaje de la cuenca. Las estaciones San Miguel (E1), aula ambiental (E8) y Puente Gabino (E20), cuentan con secciones calibradas, por lo que se tienen los valores de caudal sin la necesidad de realizar el aforo físico, Los caudales de las demás estaciones se obtuvieron por medición directa en la corriente. Las estaciones “Antes de la captación de la PCH (Popalito) y después de la captación PCH”, no se pudieron aforar debido a las condiciones turbulentas del flujo y a las altas velocidades,

lo cual no permitió el ingreso del dispositivo de aforo a la corriente, haciendo imposible el levantamiento de la sección transversal y el cálculo del caudal incluso con métodos de medición indirectos.

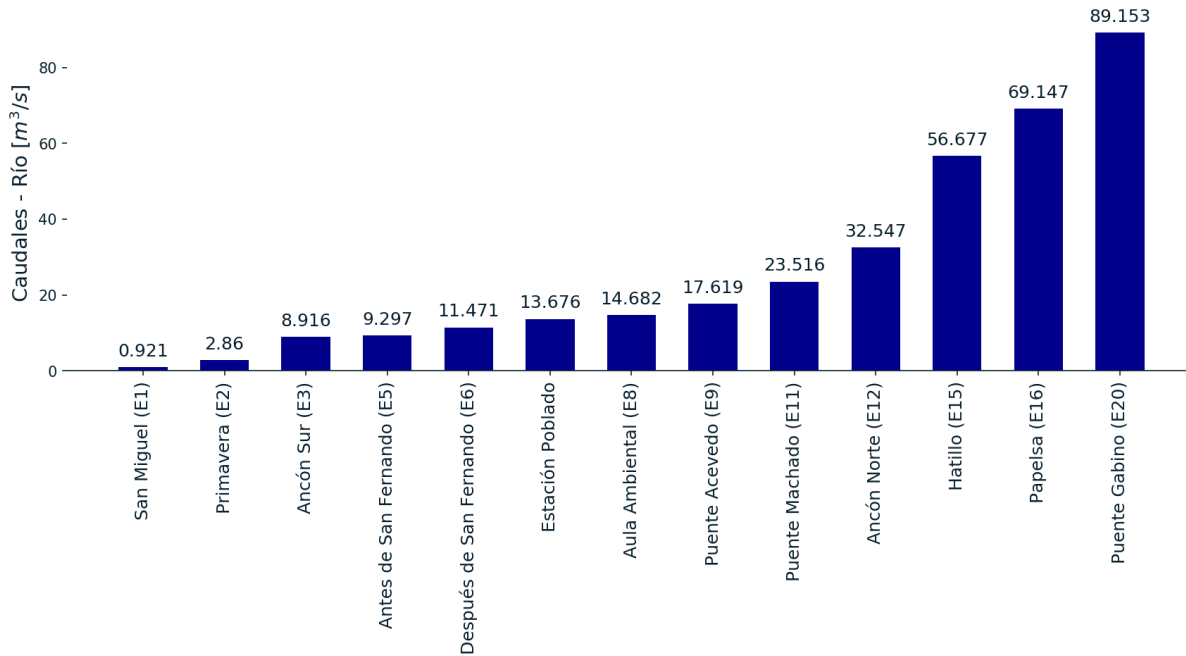


Figura 5.15: Caudales aforados a lo largo del río Aburrá-Medellín.

En las quebradas y afluentes presentados en el a figura 5.16 se observa que el caudal aumenta en aquellas quebradas de mayores dimensiones, como la Doña Maria (E4), La Garcia (E10) y Río Grande (Q31).

En las tablas 5.9 y 5.10, se muestran algunos de los parámetros hidráulicos de mayor relevancia. Los caudales de este día estuvieron por debajo de la media de cada estación, es decir que representan el comportamiento del río Aburrá-Medellín en una época de caudales bajos o en una época seca. La velocidad del flujo es otro parámetro relevante en las campañas de modelación; este parámetro se comportó de manera uniforme durante la campaña, solamente tomó valores altos en las estaciones antes de San Fernando(E5), Poblado y Papelsa (E16).

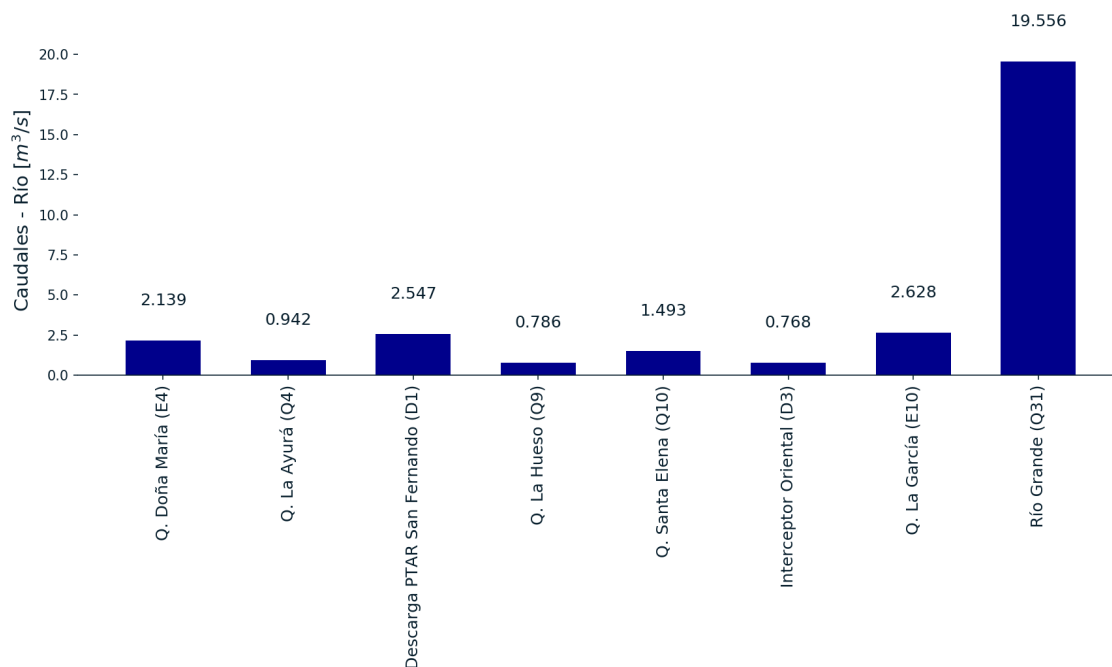


Figura 5.16: Caudales aforados en los afluentes localizados a largo del río Aburrá-Medellín.

Tabla 5.9: Caudales a lo largo del río Aburrá-Medellín de la campaña de modelación días 5 y 6 de julio

Estación	Hora	Q [m³/s]	At [m²]	Hm [m]	P [m]	B [m]	Vm [m/s]	Rh [m]
San Miguel (E1)*	06:07	0.921	-	-	-	-	-	-
Primavera (E2)	06:07	2.86	3.193	0.42	8.339	7.9	0.896	0.383
Ancón Sur (E3)	10:07	8.916	11.141	0.833	16.185	14.9	0.8	0.688
Antes de San Fernando (E5)	12:07	9.297	8.563	0.433	20.634	19.8	1.086	0.415
Después de San Fernando (E6)	12:07	11.471	12.734	0.632	21.305	20.4	0.901	0.598
Estación Poblado	12:07	13.676	11.801	0.488	25.52	24.9	1.159	0.462
Aula Ambiental (E8)*	12:07	14.682	-	-	-	-	-	-
Puente Acevedo (E9)	15:07	17.619	22.74	0.767	30.953	30	0.775	0.735
Puente Machado (E11)	16:07	23.516	29.469	1.423	22.996	21.2	0.798	1.281
Ancón Norte (E12)	17:07	32.547	39.475	1.368	33.696	23.6	0.824	1.172
Hatillo (E15)	20:07	56.677	61.07	3.099	23.951	18	0.928	2.55
Papelsa (E16)	22:07	69.147	59.05	1.873	34.311	33.4	1.171	1.721
Puente Gabino (E20)*	06:07	89.153	-	-	-	-	-	-

$A_c.$ = Área de la cuenca, $B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico, El caudal de las estaciones marcadas con (*) fue estimado a partir de curva de calibración.

Tabla 5.10: Caudales afluentes de la campaña de modelación días 5 y 6 de julio

Estación	Hora	Q [m^3/s]	At [m^2]	Hm [m]	P [m]	B [m]	Vm [m/s]	Rh [m]
Q. Doña María (E4)	09:07	2.139	3.913	0.313	12.869	12.6	0.547	0.304
Q. La Ayurá (Q4)	14:07	0.942	2.633	0.305	9.738	9	0.358	0.27
Descarga PTAR San Fernando (D1)	15:07	2.547	1.78	0.39	5.35	4.57	1.431	0.333
Q. La Hueso (Q9)	16:07	0.786	0.957	0.342	3.638	3.2	0.281	0.263
Q. Santa Elena (Q10)	11:07	1.493	2.645	0.248	10.214	10	0.564	0.259
Interceptor Oriental (D3)	14:07	0.768	0.641	0.699	3.283	1	1.198	0.195
Q. La García (E10)	17:07	2.628	3.953	0.353	11.511	11	0.665	0.343
Río Grande (Q31)	12:06	19.556	-	-	-	-	-	-

$A_c.$ = Área de la cuenca, $B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico.

5.7. Campaña del 10 de Octubre de 2018

5.7.1. Análisis de Lluvia

El mes de octubre se caracteriza por ser uno de los más lluviosos del año, debido a que se ve influenciado por el paso de la ZCIT (Zona de convergencia intertropical) sobre Colombia, como resultado, antes y durante la campaña de monitoreo se presentaron lluvias de fuerte intensidad, en la figura 5.17, se muestran las magnitudes de precipitación (izquierda) y los acumulados de precipitación (derecha) durante un espacio de 36 horas que cubre el periodo de lluvias antecedentes y de mayor influencia sobre la magnitud de los caudales. El día anterior a la campaña de aforo se presentaron eventos de fuerte intensidad después de las 11:00 que se prolongaron hasta las 00:00 del día del aforo, con intensidades máximas sobre la cuenca de 1.92 mm/hr, después de las 00:00 se presentaron lluvias aisladas hasta pasadas las 12:00 donde se presentó un evento de mayor importancia en la zona central del Valle de Aburrá, con intensidades de 1.25mm/hr sobre las 16:00.

En el siguiente enlace se pueden consultar los reportes de lluvia generados por el SIATA para la fecha en la cual se realizó el aforo. Estos reportes se muestran como información adicional al análisis de lluvia que se realiza en cada campaña: [http://siata.gov.co/reporte_eventos/1517-Informe_Evento_Precipitacion_\(2018-10-10\).pdf](http://siata.gov.co/reporte_eventos/1517-Informe_Evento_Precipitacion_(2018-10-10).pdf)

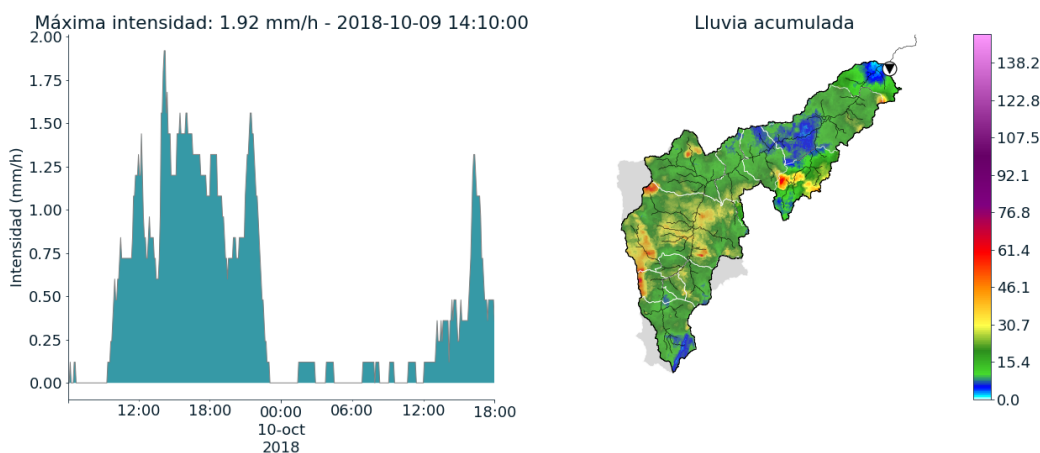


Figura 5.17: Lluvia Campaña 10 de Octubre.

5.7.2. Análisis de resultados

En la figura 5.18, se presenta un diagrama de barras que muestra el comportamiento de los caudales a lo largo del cauce principal, en la cual se observa un incremento escalonado de los caudales conforme aumenta el tamaño el área de drenaje de la cuenca. Las estaciones San Miguel (E1), aula ambiental(E8) y Puente Gabino (E20), cuentan con secciones calibradas,

por lo que se tienen los valores hora a hora los cuales, los cuales se muestran en la figura 5.19, Los caudales de las demás estaciones se obtuvieron por medición directa en la corriente. el caudal de la estación aula ambiental(E8) mostrado en la figura 5.18 tiene un valor muy alto ya que es el caudal registrado a las 16:00 horas, en la cual ya habían llluvias intensas aguas arriba de la zona de monitoreo, por lo cual los caudales dieron mucho mayor a los demás caudales aforados aguas abajo de la estación, este comportamiento se evidencia de mejor forma en la figura 5.19b, donde se ve el incremento en los caudales a partir de las 16:00 debido principalmente a las lluvias registradas en las horas de la tarde (ver figura 5.17).

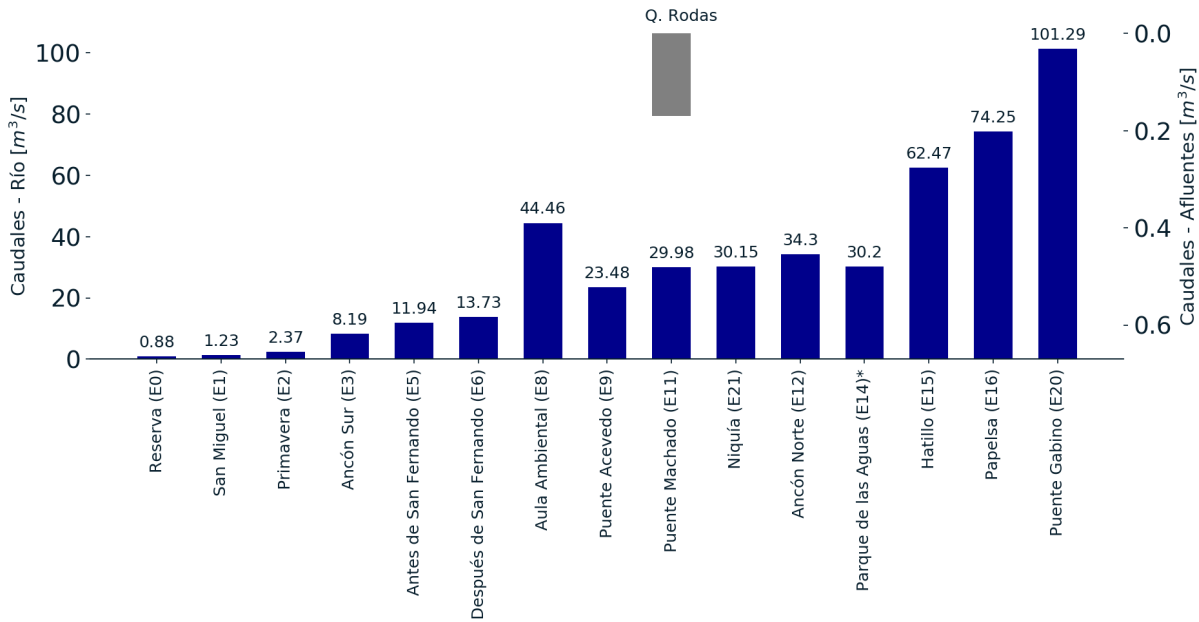
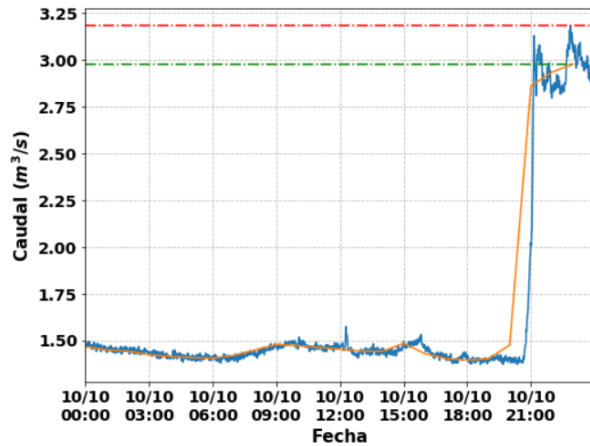


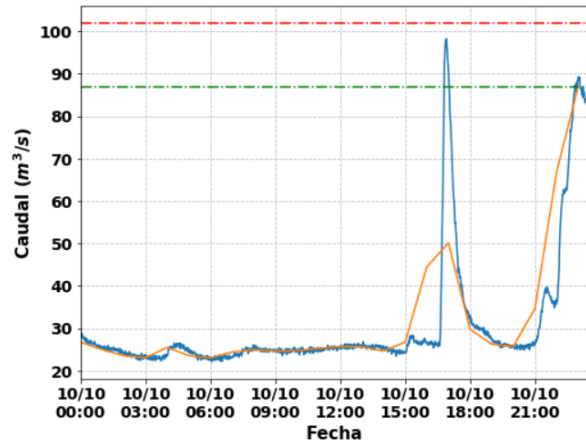
Figura 5.18: Caudales aforados a lo largo del río Aburrá-Medellín.

En la tabla 5.11, se muestran algunos de los parámetros hidráulicos de mayor relevancia. Los caudales de este día estuvieron por encima de la media de cada estación, es decir que representan el comportamiento del río Aburrá-Medellín en una época de caudales altos o en temporada de lluvias. La velocidad del flujo es otro parámetro relevante en las campañas de modelación; este parámetro se comportó de manera uniforme durante la campaña, solamente tomó valores altos en las estaciones antes de San Fernando(E5) y Papelsa (E16).

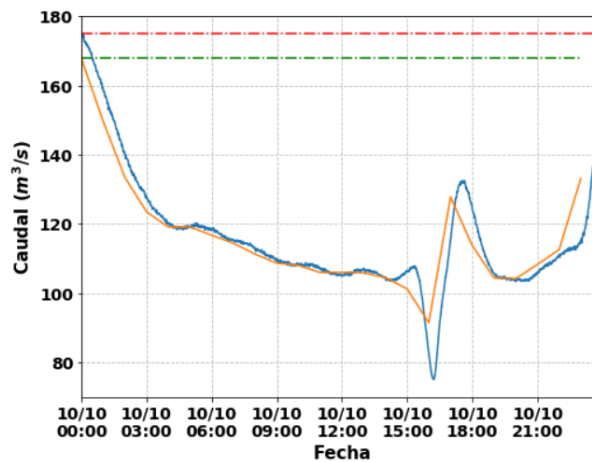
A continuación en la figura 5.20 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en cada estación y su ubicación en la cuenca del río Aburrá Medellín.



(a) Estación La clara



(b) Estación Aula Ambiental



(c) Estación Puente Gabino

Figura 5.19: Comportamiento de los caudales en las estaciones automáticas el 10 de octubre de 2018, La línea naranja representa la magnitud de los caudales horarios, y la línea azul es la magnitud de los caudales minuto a minuto, la línea punteada roja es el máximo valor alcanzado minuto a minuto, y la línea verde punteada es la magnitud máxima del caudal hora a hora.

Tabla 5.11: Caudales a lo largo del río Aburrá-Medellín de la campaña del 10 de Octubre

Estación	Hora	Q [m^3/s]	At [m^2]	Hm [m]	P [m]	B [m]	Vm [m/s]	Rh [m]
Reserva (E0)	06:10	0.88	1.08	0.2	6.07	6.03	0.81	0.18
San Miguel (E1)	06:52	1.229	1.386	0.427	4.218	3.6	0.887	0.329
Primavera (E2)	07:40	2.369	2.327	0.449	6.471	6.2	1.018	0.36
Ancón Sur (E3)	08:53	8.185	8.954	0.849	12.665	12	0.914	0.707
Antes de San Fernando (E5)	09:54	11.936	10.374	0.493	21.911	21.6	1.151	0.473
Después de San Fernando (E6)	15:39	13.733	12.74	0.704	18.639	18	1.078	0.684
Aula Ambiental (E8)*	16:00	44.46	-	-	-	-	-	-
Puente Acevedo (E9)	13:19	23.484	27.039	0.772	39.062	38.4	0.869	0.692
Puente Machado (E11)	12:29	29.979	32.293	1.37	29.122	27.5	0.928	1.109
Niquía (E21)*	12:40	30.147	-	-	-	-	-	-
Ancón Norte (E12)	11:07	34.296	34.652	1.581	28.027	25.25	0.99	1.236
Parque de las Aguas (E14)*	10:11	30.199	-	-	-	-	-	-
Hatillo (E15)	08:58	62.468	57.145	3.922	22.841	17.5	1.093	2.502
Papelsa (E16)	07:10	74.248	59.492	1.835	35.108	34.08	1.248	1.695
Puente Gabino (E20)*	13:10	101.29	-	-	-	-	-	-

$A_c.$ = Área de la cuenca, $B.$ = Ancho superficial, $Q_t.$ = Caudal total, $V_m.$ = Velocidad promedio, $A_t.$ = Área total, $P_m.$ = Perímetro mojado, $H_m.$ = Profundidad media, $R_h.$ = Radio hidráulico, El caudal de las estaciones marcadas con (*) fue estimado de manera indirecta.

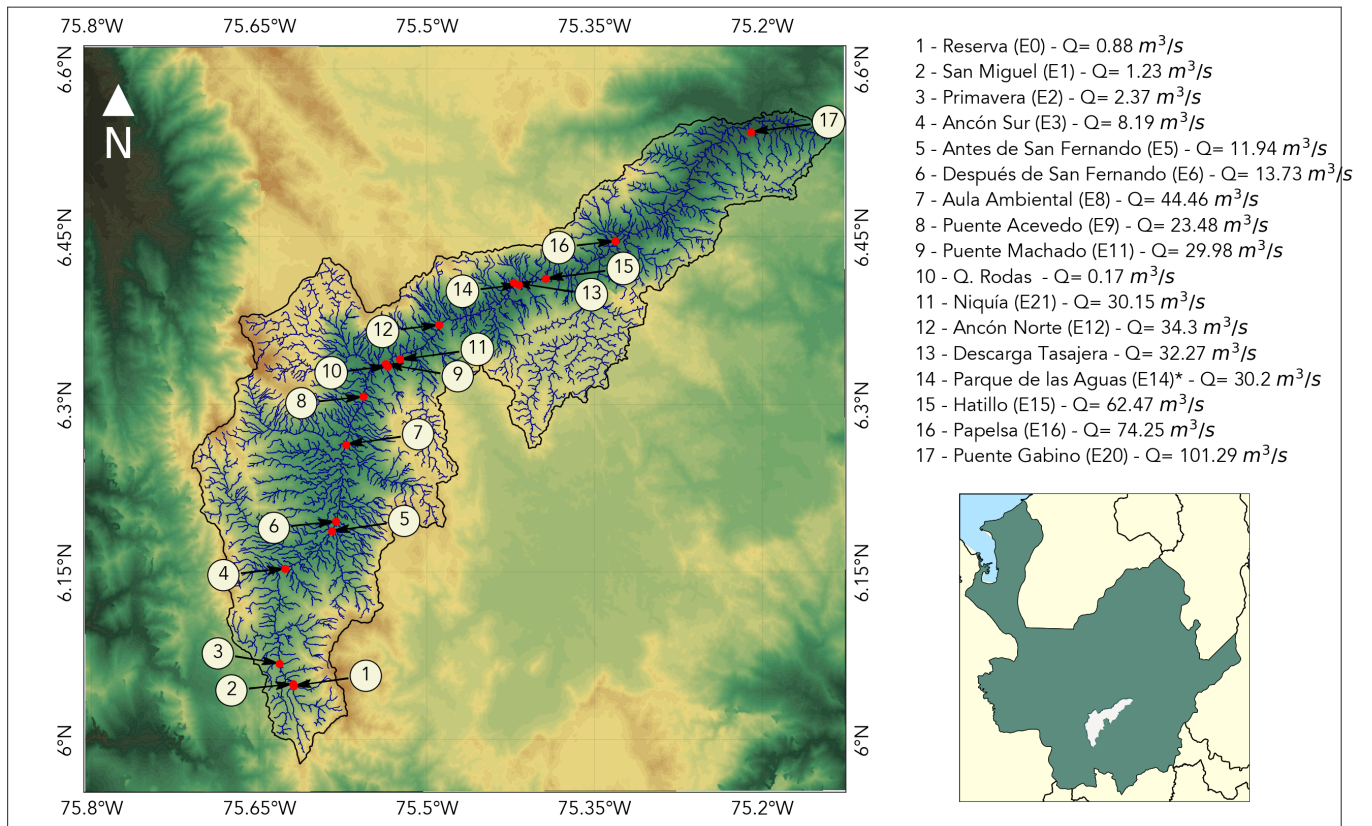


Figura 5.20: Mapa de estaciones de aforos sobre el río Aburrá Medellín para la campaña de muestreo de octubre 10 de 2018

6 Análisis global de resultados

6.1. Análisis de los acumulados de precipitación a escala mensual

Durante las fases de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá - Medellín, se realizaron campañas de aforos de caudal a lo largo del cauce principal y sus afluentes. Para presentar un análisis de los aforos puntuales realizados, se debe tener en cuenta que la variabilidad de estos responde no solo a la época del año sino a las condiciones climáticas antecedentes, por tal motivo es pertinente aplicar un método de análisis que sea adecuado a la escala de tiempo de muestreo.

Con el fin de evaluar el comportamiento temporal de los caudales aforados, se realiza un resumen de las precipitaciones mensuales y se compara el régimen de caudal aforado contra las condiciones de lluvia mensual, para esto se utiliza la información pluviométrica de 16 estaciones que EPM tiene en todo el Valle de Aburrá, las cuales se muestra en la figura 6.1 a la izquierda, junto con las estaciones pluviométricas del SIATA (120 estaciones) ubicadas a la derecha, las estaciones de SIATA tienen hasta el momento 6 años de registro continuo, por lo que solo se realiza una comparación respecto al promedio, ya que no se pueden considerar como climatologías por el tiempo de registro. En la tabla 6.1 se describen las estaciones de EPM usadas para este análisis y los años de registro para cada estación.

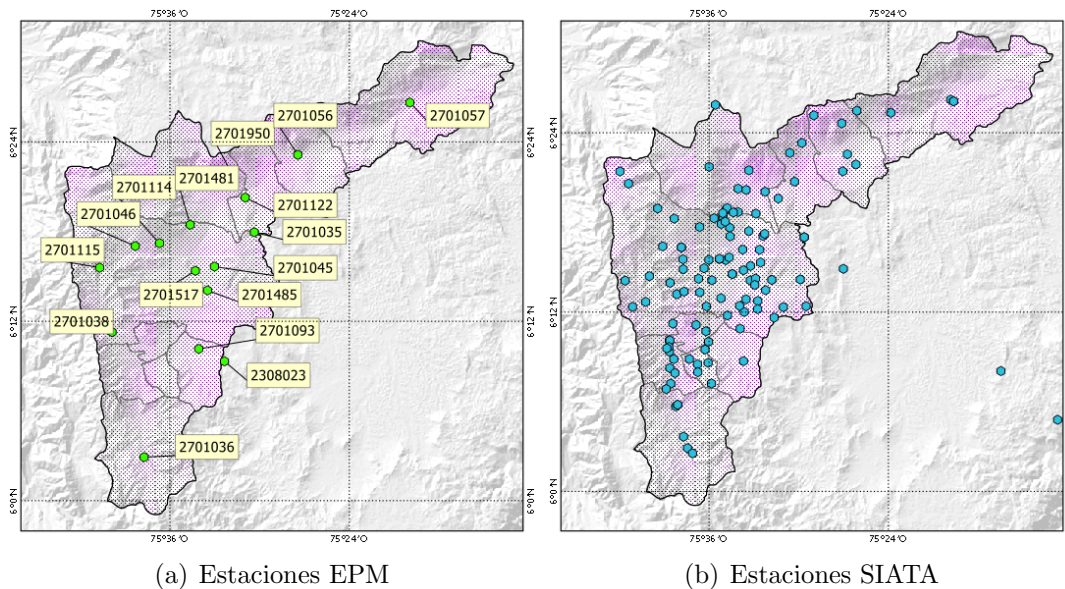


Figura 6.1: Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas.

Tabla 6.1: Estaciones pluviométricas de la red de EPM.

ID	Código	Nombre	Fecha inicial	Fecha final
1	2701057	Barbosa	1959	2018
2	2701056	Girardota	1959	2018
3	2701122	El Convento (Copacabana)	1995	2018
4	2701035	Chorrillos	1951	2018
5	2701950	Manantiales	1987	2018
6	2701481	Pedregal	1997	2018
7	2701046	San Cristóbal	1950	2018
8	2701114	Cucaracho	1993	2018
9	2701045	Planta Villa Hermosa	1949	2018
10	2701517	Miguel de Aguinaga (Medellín)	1955	2018
11	2701485	Gerona	1997	2018
12	2701115	El Astillero	1991	2018
13	2701038	San Antonio de Prado	1950	2018
14	2701093	Ayurá	1972	2018
15	2308023	Palmas	1950	2018
16	2701036	Caldas	1952	2018

En las figuras 6.2 y 6.3 se muestran los registros de cada una de las 16 estaciones de EPM. Para cada estación se calculó el acumulado de lluvia mes a mes (línea continua) y se comparó contra los promedios mensuales históricos (línea punteada), obteniendo un porcentaje de variación de la lluvia para cada mes, estos resultados se muestran en un diagrama de barras mes a mes, en el cual la lluvia del respectivo mes está expresada como porcentaje de la climatología. Cada barra corresponde a una estación identificada con los IDs de la Tabla 6.1. El dato de la media corresponde al 100 %, para el cual se construyeron unas bandas de confianza del 30 % por encima y por debajo, es decir las barras con color azul representan las estaciones con registros superiores al 130 % y las rojas a estaciones con registros inferiores al 70 %. Este análisis se realizó tanto para el año 2017 como para el 2018.

En el año 2017, los mayores registros de acumulados de precipitación se presentaron en el mes de marzo, donde todas las estaciones superaron el valor de los registros históricos. Por otro lado, los menores registros se presentaron en el mes de julio donde todas las estaciones alcanzaron valores mucho menores a la climatología. Los meses restantes tuvieron un comportamiento similar al histórico.

En el año 2018, durante el mes de enero se presentaron los registros más altos de acumulados de precipitación en comparación con el promedio histórico, 10 de las 16 estaciones superaron el valor de los registros históricos. Este comportamiento se atenuó en los meses siguientes (Febrero, Marzo, Abril), en donde el acumulado de cada mes fue muy similar al comportamiento del promedio histórico. Para los meses de junio, julio y agosto el comportamiento de las precipitaciones estuvo muy por debajo de la climatología, es decir que respecto al comportamiento histórico, han sido los meses más secos en lo que va corrido del año.

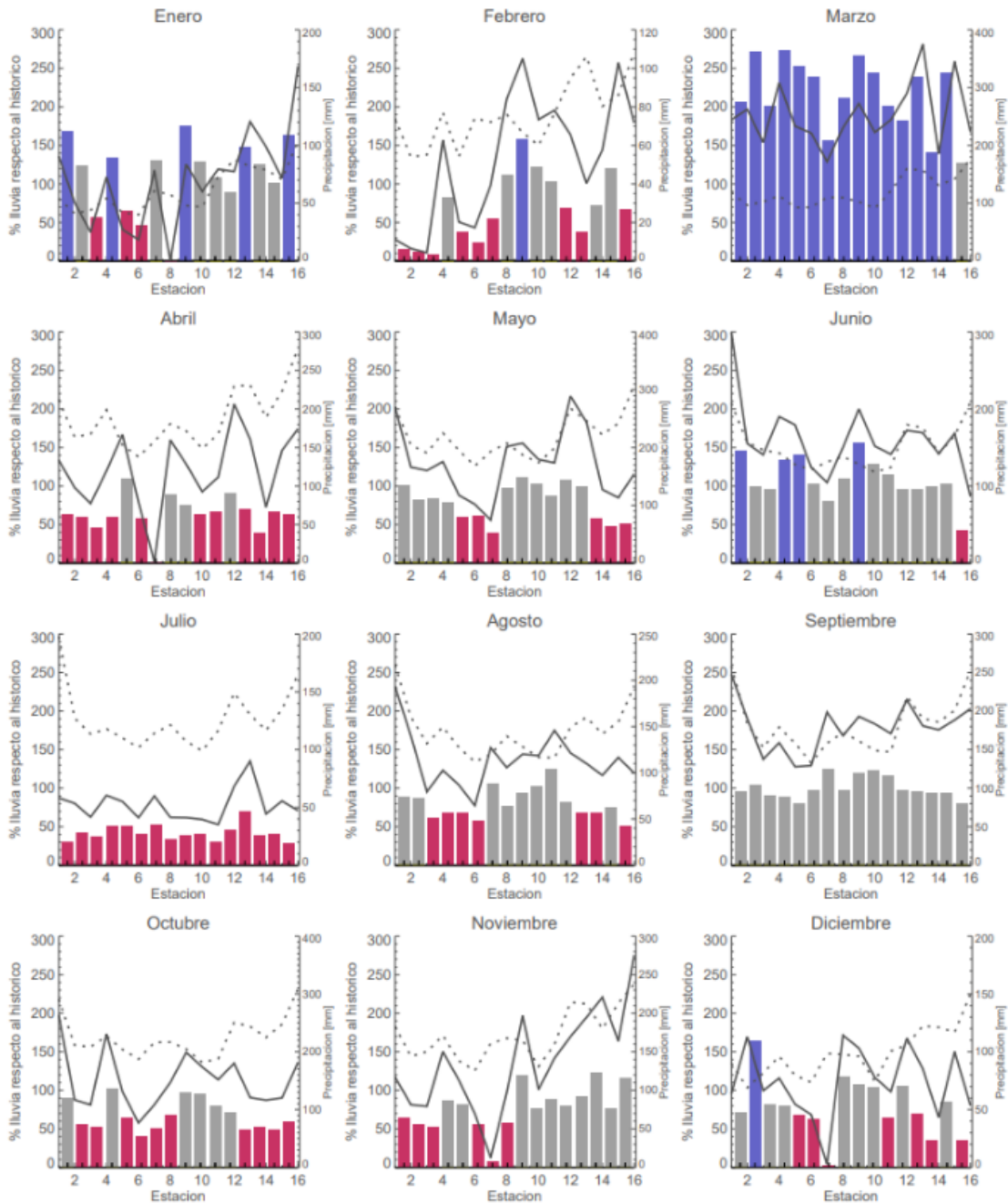


Figura 6.2: Comportamiento de la lluvia para el valle de Aburrá durante el 2017

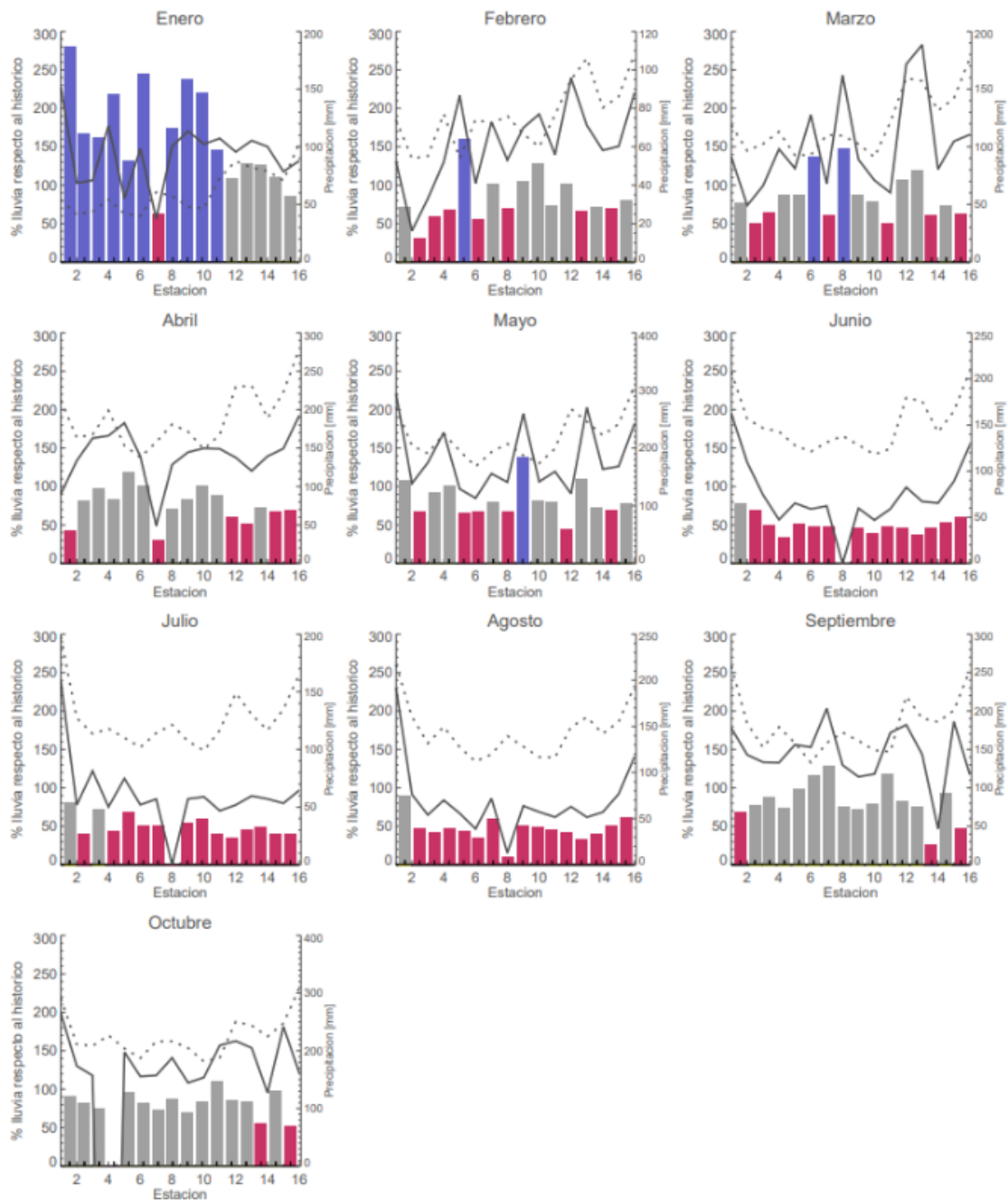


Figura 6.3: Comportamiento de la lluvia para el valle de Aburrá durante el 2018 según las estaciones de EPM

En las figuras 6.4 y 6.5, se observa el comportamiento de la precipitación en el año 2017 y 2018 respectivamente de acuerdo al promedio mensual multianual de los últimos 6 años de las estaciones pluviométricas de la red de monitoreo de SIATA. En el caso de 2017 se puede observar que sobre todo el Valle en el mes de marzo se presentó más lluvia respecto al promedio y que en los meses de Abril y Julio la magnitud de la precipitación acumulada estuvo comparable o por debajo del promedio en la mayoría del Valle.

De igual manera para el año 2018 se puede observar que en los meses de abril y mayo, las precipitaciones estuvieron por encima del promedio en la mayor parte del Valle de Aburrá, en especial hacia la zona centro-oriental del mismo, mientras que para los meses de junio y julio las precipitaciones estuvieron en un rango de normal a bajo. Los resultados tanto para el año 2017 como para el año 2018 ratifican los resultados obtenidos con las estaciones de EPM.

Según los acumulados de precipitación que se presentan en las figuras 6.2 y 6.4, el mes de Febrero en el año 2017 fue uno de los menos lluviosos, lo cual se evidenció en la campaña del 22 de Febrero, donde se aforaron los menores caudales con relación a las demás campañas. Este comportamiento tiene mayor incidencia hacia la parte sur de la cuenca, donde las estaciones de precipitación presentaron un comportamiento por debajo de la media mensual multianual, mientras que hacia la parte central de la cuenca hubo mayores eventos de precipitación por lo que los caudales después de la Planta de Tratamiento San Fernando permanecieron en condiciones medias-bajas hasta la estación Ancón Norte.

Los caudales aforados durante la campaña del 8 de Agosto de 2017, presentaron un comportamiento medio-bajo, esto relacionado con la disminución en la precipitación que afectó de manera directa la humedad del suelo, y como consecuencia se presentó un abatimiento general de los caudales en la parte baja de la cuenca.

Los caudales aforados durante las campañas del 10 de Julio y 27 de Septiembre de 2018 tuvieron un comportamiento muy similar. A pesar de que durante el mes de julio la precipitación de la zona estuvo por debajo de la media histórica, la precipitación del mes de junio fue muy similar a la presentada durante el mes de septiembre, y debido a que el aforo se realizó los primeros días de julio, las condiciones de humedad del suelo ayudaron a que los regímenes de caudal permanecieran en condiciones medias.

De acuerdo al comportamiento mostrado por la precipitación en las figuras 6.3 y 6.5, se explican los altos caudales que se obtuvieron en las campañas del 9 y 10 de mayo del año 2018, en especial para las microcuencas de las quebradas Doña María y Santa Elena. Los caudales de las campañas registrados en los meses de junio y julio no tuvieron la misma respuesta a la recesión ubicándose en el rango de medición media-alta, lo cual se explica considerando que estos fueron los meses con menor precipitación en el año 2018.

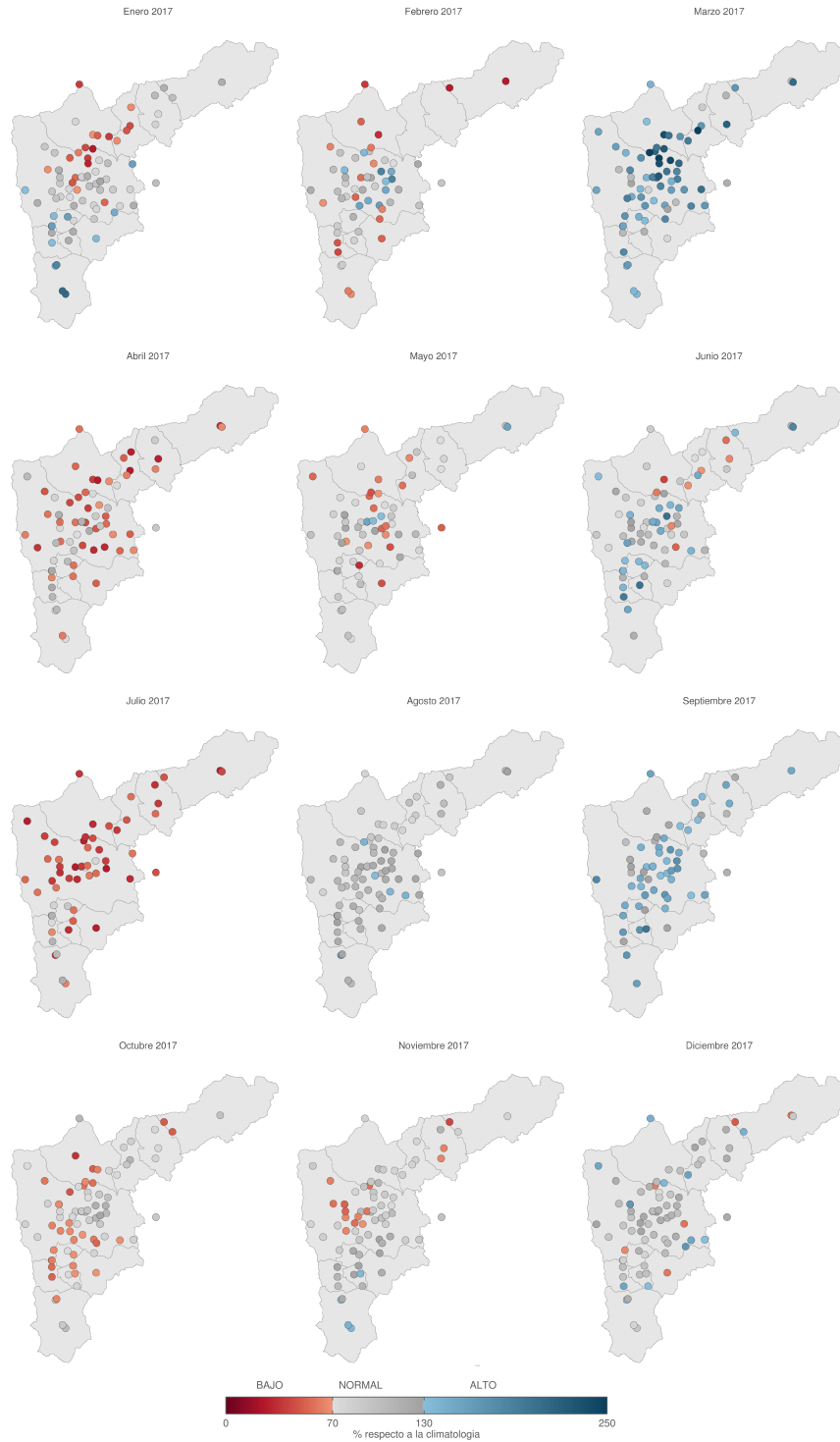


Figura 6.4: Comportamiento de la lluvia en las estaciones del SIATA para el valle de Aburrá durante 2017.

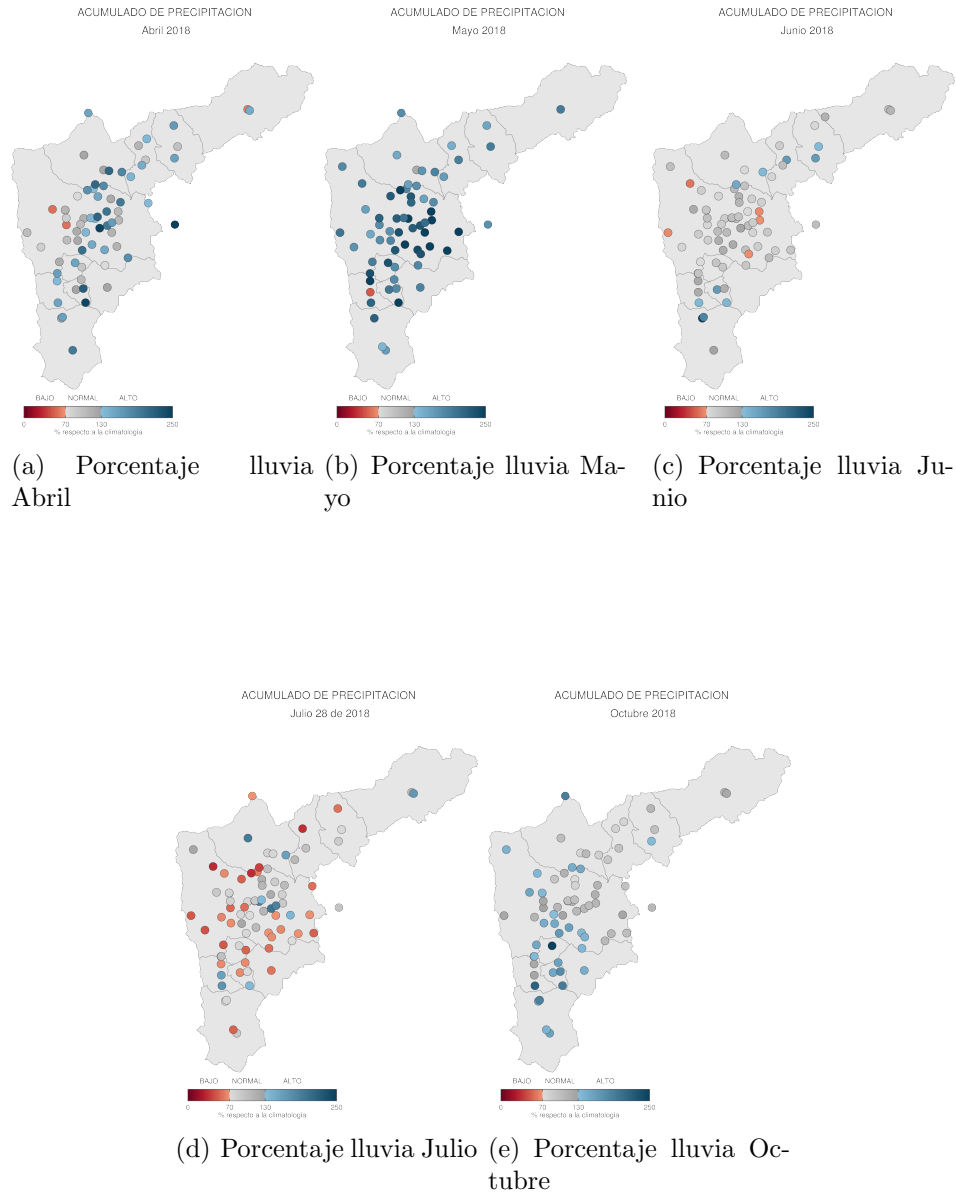


Figura 6.5: Comportamiento de la lluvia en las estaciones del SIATA para el valle de Aburrá durante 2018.

6.2. Comportamiento general de los caudales sobre el cauce principal del río Aburrá-Medellín

Teniendo como premisa el análisis sobre los acumulados de precipitación a escala mensual, se evaluaron los resultados de las campañas de aforo en términos de su comportamiento espacial y temporal, para esto se resumieron los caudales aforados en los años 2017 y 2018 en la figura 6.6, en la cual se muestran las variaciones espaciales y temporales del caudal en el Río Aburrá-Medellín en cada sitio aforado durante cada campaña. En el eje x se ubican

las estaciones según el área de drenaje en Km^2 , y en el eje y el valor del caudal en m^3/s a escala logarítmica.

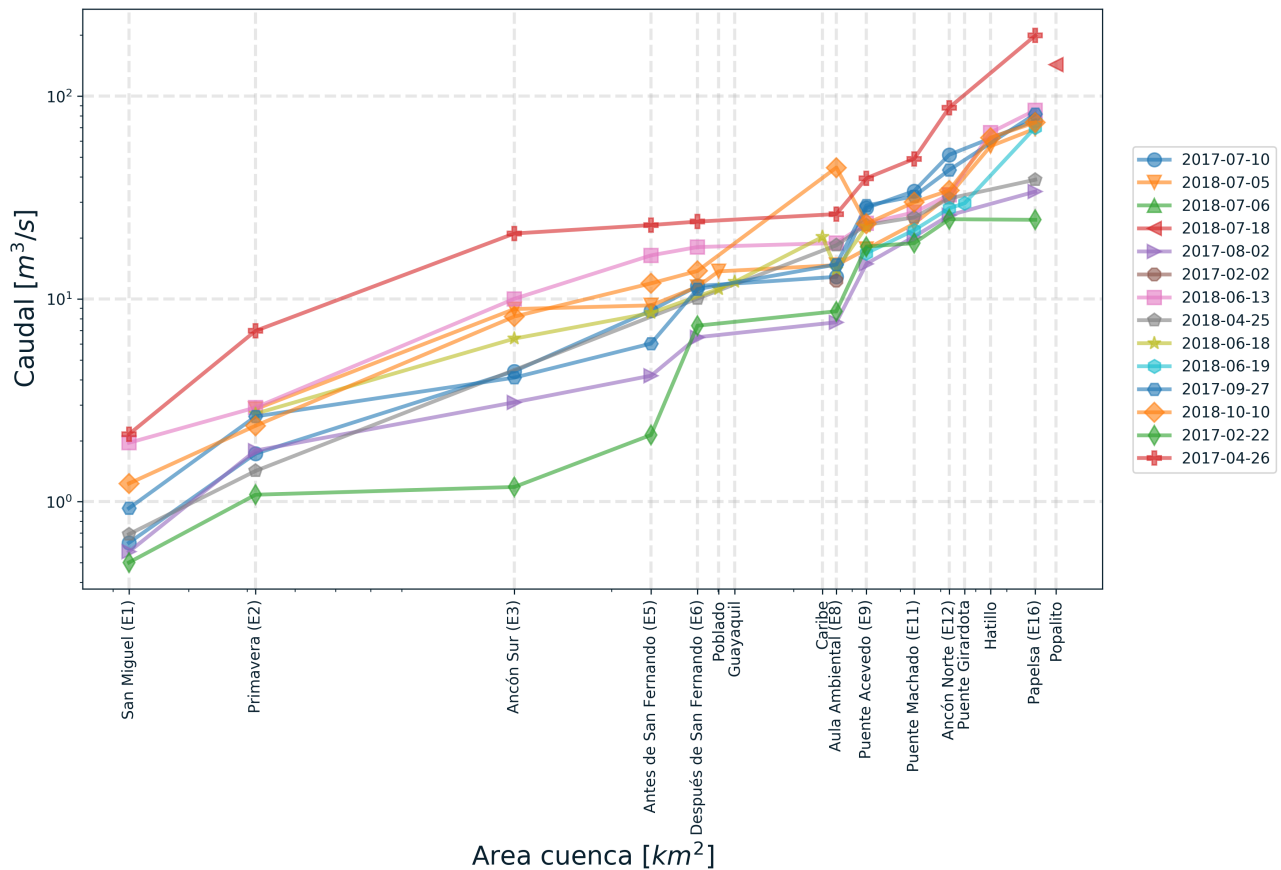


Figura 6.6: Comportamiento del río Aburrá-Medellín durante las campañas de aforo del año 2017 y 2018

De acuerdo con la Figura 6.6, se observa un aumento de caudal consistente con el aumento área de drenaje a medida que se viaja aguas abajo del Río Aburrá-Medellín, con variaciones relativamente similares en las diferentes campañas, aclarando que la magnitud de los caudales aforados presenta mayores valores de acuerdo a la precipitación antecedente, en los casos en que ocurrieron eventos de precipitación significativos en las horas previas al aforo. Además cabe resaltar que los cambios abruptos presentados en la estación Aula Ambiental (E8) y después de San Fernando (E6) en las campañas del 2018-10-10 y el 2018-07-06 respectivamente ocurrieron debido a la ocurrencia de eventos de precipitación al sur del valle cerca de la hora del aforo. Por último, se observa que el comportamiento teórico lineal esperado en el espacio log-log entre el área de la cuenca y los caudales se cumple para la cuenca del Valle Aburrá.

6.3. Clasificación del régimen de caudal para los aforos realizados en el cauce principal del Río Aburrá-Medellín durante el 2017.

Con el fin de determinar el régimen de caudales (caudales altos, medios y bajos) para cada una de las estaciones de medición sobre el río Aburrá – Medellín en la campañas de aforo realizada en el 2017, se tuvieron en cuenta los registros históricos de aforo de todas las fases.

Utilizando estos registros históricos, se ajustó una función de distribución de probabilidad para cada una de las estaciones de medición, para así determinar caudales para distintas probabilidades de excedencia y definir los límites para considerar los caudales de dichas campañas como altos medios y bajos.

A partir de la función de distribución de probabilidad se definió que aquellos datos de caudal inferiores al correspondiente a una probabilidad de excedencia de 33 % pueden considerarse como régimen de aguas bajas, aquellos superiores al correspondiente a una probabilidad de excedencia del 66 % como régimen de aguas altas y aquellos entre estos dos valores como régimen de aguas medias.

En la Tabla 6.2 se presenta para cada estación el rango de caudales para cada régimen de aguas.

Tabla 6.2: Régimen de Caudales para las estaciones sobre el Río Aburrá-Medellín

Estación	Número de aforos	Régimen Aguas Bajas [m^3/s]	Régimen Aguas medias [m^3/s]	Régimen Aguas Altas [m^3/s]
San Miguel (E1)	65	$Q < 0.42$	$0.42 \leq Q \leq 0.82$	$Q > 0.82$
Primavera (E2)	35	$Q < 1.21$	$1.21 \leq Q \leq 1.96$	$Q > 1.96$
Ancón Sur (E3)	65	$Q < 3.06$	$3.06 \leq Q \leq 6.5$	$Q > 6.5$
Antes de San Fernando (E5)	48	$Q < 3.91$	$3.91 \leq Q \leq 9.03$	$Q > 9.03$
Después de San Fernando (E6)	35	$Q < 7.15$	$7.15 \leq Q \leq 11.48$	$Q > 11.48$
Aula Ambiental (E8)	62	$Q < 11.15$	$11.15 \leq Q \leq 19.34$	$Q > 19.34$
Puente Acevedo (E9)	50	$Q < 14.0$	$14.0 \leq Q \leq 25.26$	$Q > 25.26$
Puente Machado (E11)	35	$Q < 16.47$	$16.47 \leq Q \leq 26.18$	$Q > 26.18$
Ancón Norte (E12)	47	$Q < 17.86$	$17.86 \leq Q \leq 30.3$	$Q > 30.3$
Papelsa (E16)	34	$Q < 33.69$	$33.69 \leq Q \leq 58.4$	$Q > 58.4$

Teniendo en cuenta los rangos antes definidos se clasificaron los caudales de las campañas de aforo del año 2017. En las Tablas 6.3 y 6.4 se presentan estos resultados.

Tabla 6.3: Clasificación del régimen de caudal para el año 2017 parte 1

Estación	Caudales [m^3/s]	Régimen
Campaña del 22 de febrero de 2017		
San Miguel (E1)	0.5	Q. medio
Primavera (E2)	1.08	Q. bajo
Ancón Sur (E3)	1.18	Q. bajo
Antes de San Fernando (E5)	2.13	Q. bajo
Después de San Fernando (E6)	7.38	Q. medio
Aula Ambiental (E8)	8.69	Q. bajo
Puente Acevedo (E9)	18.14	Q. medio
Puente Machado (E11)	18.84	Q. medio
Ancón Norte (E12)	24.73	Q. medio
Papelsa (E16)	24.57	Q. bajo
Campaña del 26 de abril de 2017		
San Miguel (E1)	2.85	Q. alto
Primavera (E2)	6.96	Q. alto
Ancón Sur (E3)	21.03	Q. alto
Antes de San Fernando (E5)	23.15	Q. alto
Después de San Fernando (E6)	24.07	Q. alto
Aula Ambiental (E8)	26.22	Q. alto
Puente Acevedo (E9)	39.41	Q. alto
Puente Machado (E11)	49.06	Q. alto
Ancón Norte (E12)	87.75	Q. alto
Papelsa (E16)	199.16	Q. alto
Campaña del 10 de julio de 2017		
San Miguel (E1)	0.89	Q. alto
Primavera (E2)	1.73	Q. medio
Ancón Sur (E3)	4.4	Q. medio
Antes de San Fernando (E5)	8.77	Q. medio
Después de San Fernando (E6)	11.59	Q. alto
Aula Ambiental (E8)	12.86	Q. medio
Puente Acevedo (E9)	28.11	Q. alto
Puente Machado (E11)	34.05	Q. alto
Ancón Norte (E12)	51.37	Q. alto
Papelsa (E16)	75.9	Q. alto

6.4. Clasificación de caudales en las quebradas para el año 2017 según los aforos históricos

Para evaluar el comportamiento del caudal aforado en las quebradas, se usó el diagrama de cajas y bigotes (boxplot), el cual proporciona una visión general de la simetría de la distribución de los datos, con algunos parámetros estadísticos como son: el máximo, mínimo y los percentiles más representativos (25, 50 y 75%). Además según la amplitud de los

Tabla 6.4: Clasificación del régimen de caudal para el año 2017 parte 2

Estación	Caudales [m^3/s]	Régimen
Campaña del 02 de Agosto de 2017		
San Miguel (E1)	0.73	Q. medio
Primavera (E2)	1.6	Q. medio
Ancón Sur (E3)	3.09	Q. medio
Antes de San Fernando (E5)	4.18	Q. medio
Después de San Fernando (E6)	6.47	Q. bajo
Aula Ambiental (E8)	7.67	Q. bajo
Puente Acevedo (E9)	14.9	Q. medio
Puente Machado (E11)	20.28	Q. medio
Ancón Norte (E12)	25.85	Q. medio
Papelsa (E16)	33.84	Q. medio
Campaña del 27 de Septiembre de 2017		
San Miguel (E1)	1.15	Q. alto
Primavera (E2)	2.63	Q. alto
Ancón Sur (E3)	4.09	Q. medio
Antes de San Fernando (E5)	6.02	Q. medio
Después de San Fernando (E6)	11.18	Q. medio
Aula Ambiental (E8)	14.79	Q. medio
Puente Acevedo (E9)	28.9	Q. alto
Puente Machado (E11)	32.08	Q. alto
Ancón Norte (E12)	43.23	Q. alto
Papelsa (E16)	81.69	Q. alto

“bigotes” se puede establecer valores atípicos también llamados outliers.

La razón de que estos valores atípicos se presenten es que los caudales están afectados no sólo por la época del año sino por diversos factores, como: eventos de precipitación que incrementan significativamente los caudales y el ciclo diario de estos teniendo en cuenta las descargas de la red de vertimientos a lo largo del la red de drenaje.

Para la elaboración de los boxplot se utilizaron los aforos de todas las campañas en las distintas fases del proyecto, para el calculo de los estadísticos solo se analizaron las quebradas que tuvieran un numero de aforos mayor a 8, esto debido a que construir un estadístico con pocos datos no es un análisis robusto y se podría incurrir en errores. En las Tablas 6.5 y 6.6 se presenta un resumen de las estaciones, el número de aforos con los que se realizó el análisis y los estadísticos q25 q50 y q75.

Teniendo en cuanta los resultados de lluvia mensual y diaria, los caudales aforados durante el mes de marzo se vieron afectados debido a la alta pluviosidad presentada durante este mes, en especial el caudal de la estación Doña María el 8 de marzo, ya que sobre esa cuenca el día del aforo se presentaron lluvias de alta intensidad en las horas de la mañana, generando un caudal muy por encima del promedio mostrado en la gráfica 6.11(a), el mismo caso se presento en la quebrada la Ayurá, Quebrada la Hueso y la Altavista, El mes de

Tabla 6.5: Estadísticos Boxplot para las quebradas del sur del Valle de Aburrá

Estaciones	$N.$	$Q_{25}. [m^3/s]$	$Q_{50}. [m^3/s]$	$Q_{75}. [m^3/s]$
Q. La Picacha (Q20)	12.0	0.1	0.18	0.25
Q. La Doctora (Q3)	9.0	0.15	0.19	0.27
Q. La Valeria (Q1)	10.0	0.18	0.2	0.24
Q. Altavista (Q8)	17.0	0.25	0.33	0.55
Q. La Hueso (Q9)	18.0	0.28	0.38	0.58
Q. La Grande (Q5)	10.0	0.35	0.38	0.66
Q. La Miel (Q2)	11.0	0.5	0.64	0.79
Q. La Ayurá (Q4)	11.0	0.54	0.83	1.02
Q. Doña María (E4)	17.0	1.07	1.53	2.13

$N.$ = Número de aforos, $Q_{25}. [m^3/s]$ = 25 % de los datos, $Q_{50}. [m^3/s]$ = 50 % de los datos, $Q_{75}. [m^3/s]$ = 75 % de los datos.

Tabla 6.6: Estadísticos Boxplot para las quebradas del norte del Valle de Aburrá

Estaciones	$N.$	$Q_{25}. [m^3/s]$	$Q_{50}. [m^3/s]$	$Q_{75}. [m^3/s]$
Q. El Chuscal (Q32)	9.0	0.14	0.14	0.18
Q. La Madera (Q13)	16.0	0.21	0.26	0.37
Q. La Rosa (Q12)	16.0	0.24	0.32	0.38
Q. Santa Elena (Q10)	13.0	1.19	1.52	1.81
Q. La García (E10)	29.0	1.7	2.37	3.09

$N.$ = Número de aforos, $Q_{25}. [m^3/s]$ = 25 % de los datos, $Q_{50}. [m^3/s]$ = 50 % de los datos, $Q_{75}. [m^3/s]$ = 75 % de los datos.

septiembre es uno de los mas lluviosos del año, según el análisis de la lluvia la pluviosidad se mantuvo muy similar a la media histórica, como consecuencia los caudales registrados durante este mes tienden a ser superiores a las demás aforos, pero menores a los registrados en marzo en las cuencas mencionadas, el mes de julio fue el mas seco de todos, por lo cual los caudales aforados en su mayoría se clasifican como medios-bajos, los resultados de esta clasificación se muestran en la tabla 6.7.

En las quebradas del norte los resultados difieren mucho de los obtenidos en las cuencas del sur, debido a que las lluvias se localizaron en su gran mayoría hacia la parte sur-centro de la cuenca del río Aburrá, por tal motivo, de los aforos realizados en el norte, la quebrada que presento mayor caudal fue la quebrada Santa Elena, que corresponde a una respuesta ante los eventos de precipitación ocurridos en la ladera oriental el día del aforo (ver figura 6.11(b)), los demás aforos se clasificaron como medios-bajos debido a las condiciones de lluvia en la cuenca. El resumen de la clasificación de los caudales aforados en el norte se encuentran en la tabla 6.8 .

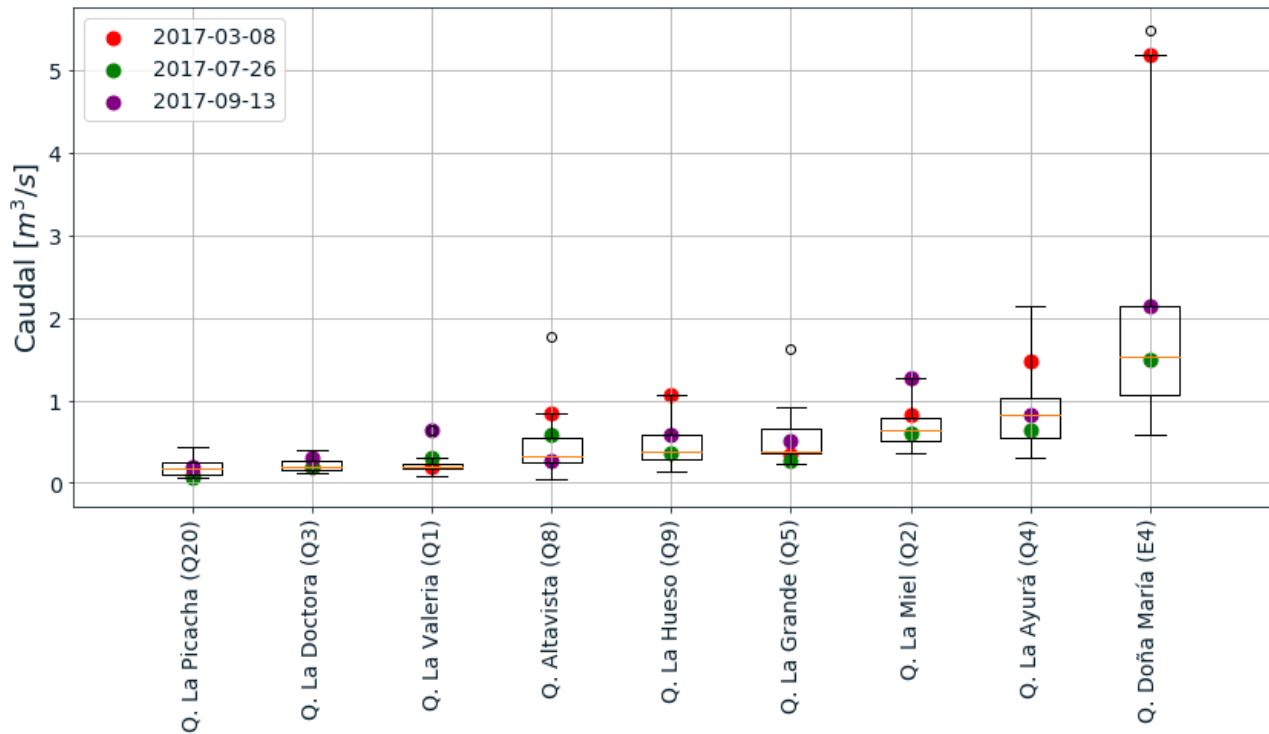


Figura 6.7: Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del sur del Valle de Aburrá

Tabla 6.7: Régimen de Caudales Quebradas del sur del Valle de Aburrá

Estaciones	Qo.	Regimen	Qo.	Regimen	Qo.	Regimen
	Aforo 8 de MAR		Aforo 26 de JUL		Aforo 13 de SEP	
Q. La Valeria (Q1)	0.2	Q. medio	0.3	Q. alto	0.64	Q. alto
Q. La Miel (Q2)	0.82	Q. alto	0.6	Q. medio	1.26	Q. alto
Q. La Grande (Q5)	0.35	Q. medio	0.26	Q. bajo	0.51	Q. medio
Q. La Doctora (Q3)	0.19	Q. medio	0.2	Q. medio	0.29	Q. alto
Q. Doña María (E4)	5.19	Q. alto	1.5	Q. medio	2.13	Q. medio
Q. La Ayurá (Q4)	1.47	Q. alto	0.63	Q. medio	0.83	Q. medio
Q. Altavista (Q8)	0.85	Q. alto	0.58	Q. alto	0.26	Q. medio
Q. La Picacha (Q20)	0.09	Q. bajo	0.07	Q. bajo	0.2	Q. medio
Q. La Hueso (Q9)	1.06	Q. alto	0.36	Q. medio	0.58	Q. medio

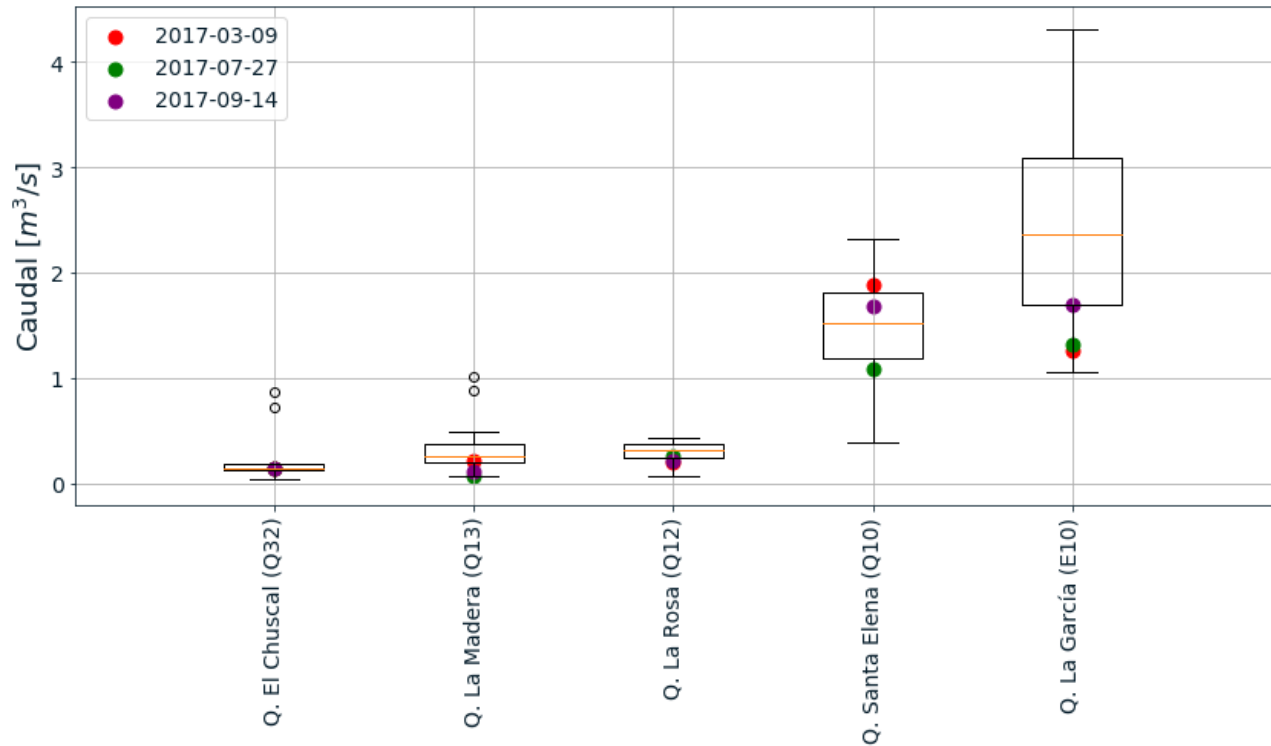


Figura 6.8: Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del norte del Valle de Aburrá

Tabla 6.8: Régimen de Caudales Quebradas del Norte del Valle de Aburrá

Estaciones	Qo.	Régimen	Qo.	Régimen	Qo.	Régimen
	Aforo 9 de MAR		Aforo 27 de JUL		Aforo 14 de SEP	
Q. Santa Elena (Q10)	1.88	Q. alto	1.09	Q. bajo	1.68	Q. medio
Q. La Rosa (Q12)	0.2	Q. bajo	0.27	Q. medio	0.22	Q. bajo
Q. La Madera (Q13)	0.22	Q. medio	0.08	Q. bajo	0.11	Q. bajo
Q. La García (E10)	1.26	Q. bajo	1.32	Q. bajo	1.7	Q. medio
Q. El Chuscal (Q32)	0.14	Q. medio	0.14	Q. medio	0.14	Q. medio

6.5. Clasificación del régimen de caudal para los aforos realizados en el cauce principal del Río Aburrá-Medellín durante el 2018.

Siguiendo la metodología presentada para la clasificación de los caudales en las quebradas durante el año 2017 se evalúa el comportamiento de las diferentes campañas de monitoreo realizadas en el año 2018.

En la Estación Reserva (E0) no se puede hacer una clasificación del régimen de caudales, debido a que se cambio el sitio de aforo por un lugar ubicado aguas arriba y no es válido comparar los registros históricos entre ambas estaciones. En las estaciones Parque de las Aguas (E14) y Niquía (E21), no se cuenta con los suficientes registros históricos para realizar una clasificación de caudales. El caudal en Puente Gabino (E20) no puede ser clasificado con el mismo método anteriormente descrito, debido a que las muestras son tomadas después de la confluencia con Río Grande, el cual puede aportar caudales considerables a la cuenca del río Aburrá-Medellín, lo cual podría generar clasificaciones atípicas respecto al resto de estaciones, en la figura 6.9 se puede ver la clasificación de los caudales según el rango intercuartil.

Tabla 6.9: Clasificación de régimen de caudal para el año 2018 sobre el río Aburrá-Medellín.

Estación	N	Q25 [m^3/s]	Q50 [m^3/s]	Q75 [m^3/s]	2018-04-25	2018-06-13	2018-06-18	2018-06-19	2018-06-20	2018-07-05
Papelsa (E16)	36.0	34.56	51.19	70.15	38.74 →	85.30 ↑	-	70.11 →	72.78 ↑	69.15 →
Ancón Norte (E12)	50.0	17.97	25.06	30.11	31.3 ↑	32.65 ↑	-	28.36 →	-	32.55 ↑
Puente Machado (E11)	33.0	14.30	20.98	25.17	25.26 ↑	26.8 ↑	-	21.84 →	-	23.52 →
Puente Acevedo (E9)	56.0	12.72	17.35	23.11	23.16 ↑	23.56 ↑	22.73 →	16.82 →	-	17.62 →
Aula Ambiental (E8)	67.0	7.93	12.32	16.39	18.39 ↑	18.87 ↑	13.99 →	-	-	14.68 →
Después de San Fernando (E6)	33.0	7.44	10.04	12.14	10.04 →	18.03 ↑	-	-	-	11.47 →
Antes de San Fernando (E5)	48.0	3.89	5.78	9.28	7.53 →	16.41 ↑	8.52 →	-	-	9.3 ↑
Ancón Sur (E3)	75.0	2.94	3.69	5.40	6.83 ↑	10.01 ↑	6.37 ↑	-	-	8.92 ↑
Primavera (E2)	41.0	1.07	1.72	2.12	1.42 →	2.91 ↑	2.72 ↑	-	-	2.86 ↑
San Miguel (E1)	52.0	0.38	0.50	0.77	0.69 →	1.95 ↑	0.62 →	-	-	0.92 ↑
Puente Guayaquil (E7)	21.0	7.32	7.68	9.26	-	-	12.13 ↑	-	-	-
Puente Girardota (E13)	13.0	28.36	29.70	52.71	-	-	-	29.65 →	-	-
Pradera	22.0	24.92	29.29	34.77	-	-	-	-	40.62 ↑	-

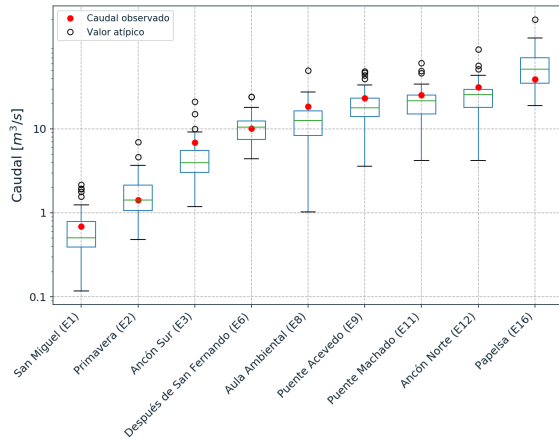
N. = Número de aforos, Q_{25} . [m^3/s] = 25 % de los datos, Q_{50} . [m^3/s] = 50 % de los datos, Q_{75} . [m^3/s] = 75 % de los datos, → régimen normal de caudal, ↑ régimen de caudales altos, ↓ régimen de caudales bajos.

Según el análisis presentado en el capítulo 5.1 de la campaña del 25 de Abril de 2018, los caudales aguas abajo de la estación Parque de las aguas, se vieron afectados por la lluvia que se presentó en la madrugada del día de la campaña. El régimen de caudal medio en la estación Papelsa (E16), se debe a la hora en la cual se realizó el aforo, ya que antes de las 10:00 hrs no se realizaron descargas de la “Central La Tasajera”, que tiene una influencia en los caudales aforados, en la figura 6.10(a) se puede observar respecto a los históricos aforados.

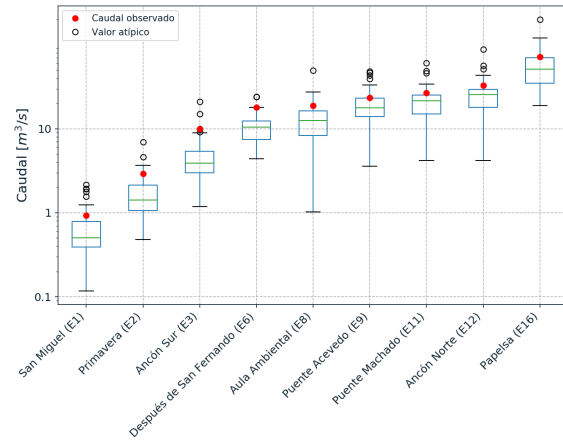
La campaña del 13 de Junio de 2018 tiene el régimen de caudal alto para todas las estaciones, esto a pesar de que no hubo precipitaciones significativas antes o durante la campaña de monitoreo de acuerdo a lo mostrado en el capítulo 5.4, y 6.1, estos caudales



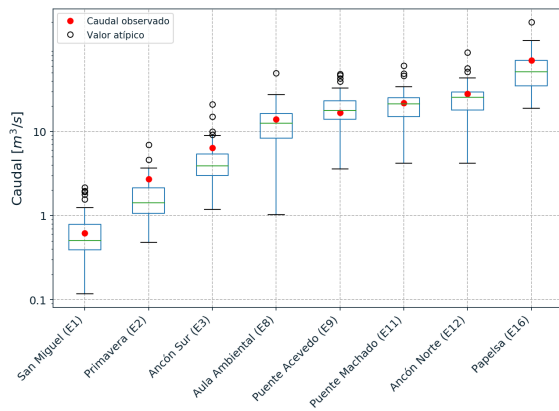
Figura 6.9: Diagrama de bigotes para las diferentes estaciones sobre el río Aburrá Medellín.



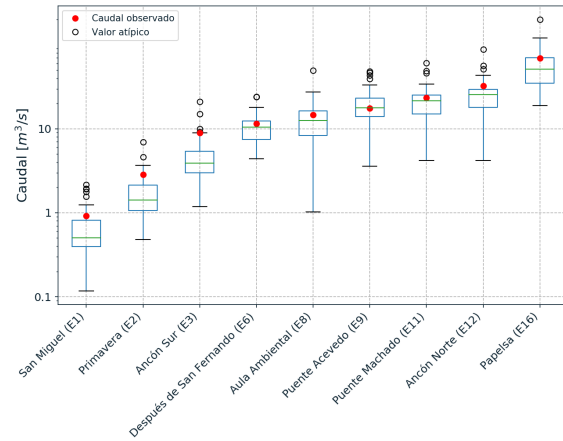
(a) Comportamiento de los caudales aforados el día 25 de abril.



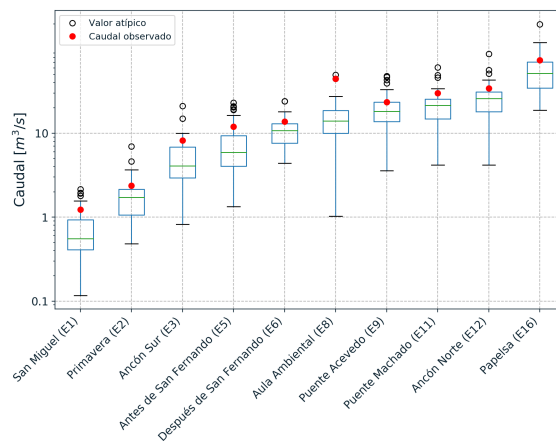
(b) Comportamiento de los caudales aforados el día 13 de Junio.



(c) Comportamiento de los caudales aforados los días 18-19 y 20 de Junio.



(d) Comportamiento de los caudales aforados el día 5 y 6 de Julio.



(e) Comportamiento de los caudales aforados el día 10 de Octubre.

se explican debido a que durante el mes de mayo de 2018 hubo más precipitación, en algunos casos superando el promedio de 6 años como se observa en la figura 6.5, lo que aumentó el nivel base de la quebrada, y durante la campaña de monitoreo estos niveles aun se encontraban altos comparados con los históricos aforados, en la figura 6.10(b), se logran apreciar las magnitudes de los caudales aforados respecto a los históricos.

Para la campaña del 18, 19 y 20 de Junio de 2018 (ver figura 6.10(c)), los caudales aforados presentan un régimen mixto entre caudales altos y normales, los caudales con régimen alto corresponden a las estaciones ubicadas en la partes sur del Valle de Aburrá, la misma situación ocurre con los caudales de la campaña del 5 de julio (ver figura 6.10(e)), este comportamiento se puede atribuir a los cambios de cobertura entre la zona sur y central del Valle de Aburrá, este efecto se debe en un principio a que en la parte urbana el río se encuentra canalizado y la respuesta de la cuenca tiende a ser mas rápida, mientras que en la parte rural debido a que se tiene en gran parte cobertura vegetal, los tiempos de respuesta de la cuenca son menores haciendo que el río en esta zona permanezca durante mas tiempo en caudales altos.

Finalmente se presentan los caudales clasificados de la campaña del 10 de octubre de 2018

Tabla 6.10: Clasificación de régimen de caudal sobre el río Aburrá-Medellín.

Estación	N	Q ₂₅ [m ³ /s]	Q ₅₀ [m ³ /s]	Q ₇₅ [m ³ /s]	2018-10-10
Papelsa (E16)	36.0	34.56	51.19	70.15	74.25 ↑
Ancón Norte (E12)	50.0	17.97	25.06	30.11	34.30 ↑
Puente Machado (E11)	33.0	14.30	20.98	25.17	29.98 ↑
Puente Acevedo (E9)	56.0	12.72	17.35	23.11	23.48 ↑
Aula Ambiental (E8)	67.0	7.93	12.32	16.39	44.46 ↑
Después de San Fernando (E6)	33.0	7.44	10.04	12.14	13.73 ↑
Antes de San Fernando (E5)	48.0	3.89	5.78	9.28	11.94 ↑
Ancón Sur (E3)	75.0	2.94	3.69	5.40	8.19 ↑
Primavera (E2)	41.0	1.07	1.72	2.12	2.37 ↑
San Miguel (E1)	52.0	0.38	0.50	0.77	1.23 ↑

N. = Número de aforos, Q₂₅. [m³/s] = 25 % de los datos, Q₅₀. [m³/s] = 50 % de los datos, Q₇₅. [m³/s] = 75 % de los datos, → régimen normal de caudal, ↑ régimen de caudales altos, ↓ régimen de caudales bajos.

Los caudales aforados el 10 de octubre, se clasifican como altos, ya que todos los valores de caudal obtenidos durante la campaña de monitoreo están por encima del percentil 75 de los datos históricos. Esto en respuesta a la temporada de lluvias presente durante todo el mes de octubre. Durante esta campaña los caudales calculados fueron clasificados dentro del tercer cuartil debido a que durante el día anterior y las horas previas a estos aforos, se presentó precipitación de baja intensidad, pero que persistió durante un largo periodo de tiempo casi en la totalidad de la cuenca, este comportamiento se presentó para todas las estaciones excepto par ala estación Aula Ambiental (E8), pues esta fue la última estación

aforada durante la jornada y en ese momento comenzó a producirse precipitación de alta intensidad en el sur del valle lo cual provocó un aumento significativo del caudal.

6.6. Clasificación de caudales en las quebradas para el año 2018 según los aforos históricos

Siguiendo la metodología presentada del percentil 25, 50, 75 se clasifican los caudales de las diferentes quebradas aforadas durante el año 2018, en la tabla 6.11 se presenta la clasificación en cada una de las campañas, las convenciones siguen siendo las mismas a las presentadas con el régimen de caudal de las estaciones sobre el río Aburrá-Medellín.

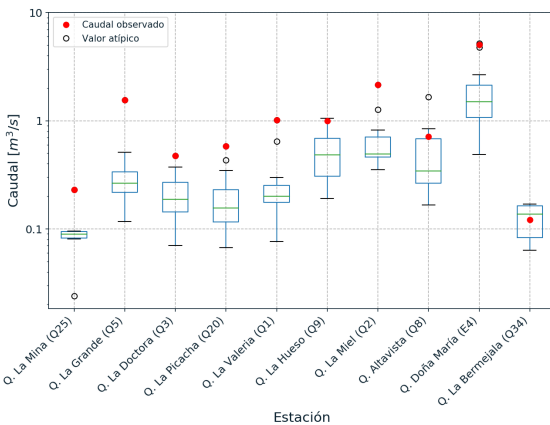
Tabla 6.11: Clasificación de caudales en quebradas.

Estación	N	Q25 [m^3/s]	Q50 [m^3/s]	Q75 [m^3/s]	2018-04-25	2018-05-09	2018-05-10	2018-06-13	2018-07-05
Q. La García (E10)	36.0	1.53	2.32	3.00	-	-	4.68 ↑	-	2.63 →
Q. La Madera (Q13)	16.0	0.18	0.27	0.38	-	-	0.43 ↑	-	-
Q. Rodas	9.0	0.11	0.13	0.21	0.21 ↑	-	-	0.22 ↑	-
Q. La Picacha (Q20)	13.0	0.12	0.16	0.23	-	0.58 ↑	-	-	-
Q. La Doctora (Q3)	10.0	0.14	0.19	0.27	-	0.48 ↑	-	-	-
Q. La Valeria (Q1)	11.0	0.18	0.20	0.25	-	1.01 ↑	-	-	-
Q. La Grande (Q5)	11.0	0.22	0.26	0.34	-	1.55 ↑	-	-	-
Q. La Miel (Q2)	11.0	0.46	0.49	0.71	-	2.15 ↑	-	-	-
Q. Altavista (Q8)	14.0	0.26	0.34	0.61	-	0.71 ↑	-	-	-
Q. La Hueso (Q9)	17.0	0.31	0.48	0.69	-	0.99 ↑	-	-	0.79 ↑
Q. La Ayurá (Q4)	11.0	0.41	0.59	0.91	-	-	-	-	0.94 ↑
Q. Doña María (E4)	18.0	0.98	1.47	2.14	-	5.06 ↑	-	-	2.14 →
Q. El Chuscal (Q32)	10.0	0.14	0.14	0.50	-	-	0.61 ↑	-	-
Q. El Hato (Q14)	17.0	0.16	0.20	0.40	-	-	0.8 ↑	-	-
Q. La Rosa (Q12)	17.0	0.21	0.30	0.35	-	-	0.43 ↑	-	-
Q. La Iguaná (Q11)	14.0	0.66	1.11	1.53	-	-	1.94 ↑	-	-
Q. Santa Elena (Q10)	16.0	1.12	1.29	1.56	-	-	2.78 ↑	-	1.49 →
Descarga Tasajera	14.0	13.54	23.81	30.65	-	-	-	31.62 ↑	-

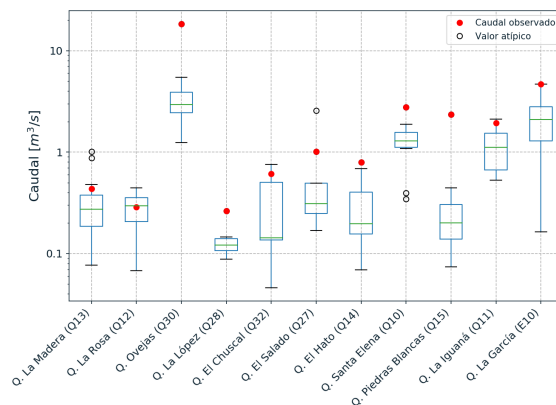
N . = Número de aforos, Q_{25} . [m^3/s] = 25 % de los datos, Q_{50} . [m^3/s] = 50 % de los datos, Q_{75} . [m^3/s] = 75 % de los datos, → régimen normal de caudal, ↑ régimen de caudales altos, ↓ régimen de caudales bajos.

En los siguientes Boxplot se puede visualizar en que medida se acercan o se alejan los caudales aforados de la mediana histórica de cada estación. Para la campaña del sur llevada a cabo del 9 de Mayo, se observa que los valores atípicos más alejados de la mediana se presentan en las estaciones Q. Doña María, Q. La Miel y Q. La Grande (Figura 6.11(a)). En los boxplots se observa como el dato del caudal observado se comporta en la mayoría de las estaciones como un dato anómalo o Outlayer (menos en la estación Q. La Bermejala), debido a los altos caudales que se obtuvieron por ser temporada de lluvias. Así mismo para la campaña del 10 de Mayo, los mayores caudales se presentan en la Quebrada Ovejas, Piedras Blancas y Q. La García (Figura 6.11(b)), en esta campaña ningún dato de caudal se encuentra dentro del rango de la mediana histórica.

Figura 6.10: Diagrama de bigotes para las diferentes Quebradas afluentes del río Aburrá Medellín.



(a) Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del sur del Valle de Aburrá el día 9 de Mayo.



(b) Comportamiento general de los caudales aforados en las quebradas del norte del Valle de Aburrá el día 10 de Mayo.

6.7. Clasificación de niveles de acuerdo a las estaciones automáticas de nivel de SIATA.

SIATA cuenta con estaciones de nivel automáticas, a las cuales se les realizó una clasificación de los niveles según su distribución en el tiempo, para esto se toma toda la serie de niveles, eliminando los valores anómalos y se clasifican según su percentil, construyendo una curva de duración de niveles, a partir de esto, se identifican los percentiles 25 y 75, clasificando sus niveles como altos cuando los niveles son superiores al percentil 75 de la serie, o bajos cuando son menores al percentil 25 de la serie, según las necesidades del año 2017 y 2018 del proyecto RedRío, se clasifican las estaciones de nivel 169 la clara, la cual es coincidente con la estación de monitoreo de San Miguel (E1), y la estación de nivel 99 Aula Ambiental, la cual coincide con la estación de monitoreo de aula ambiental (E8).

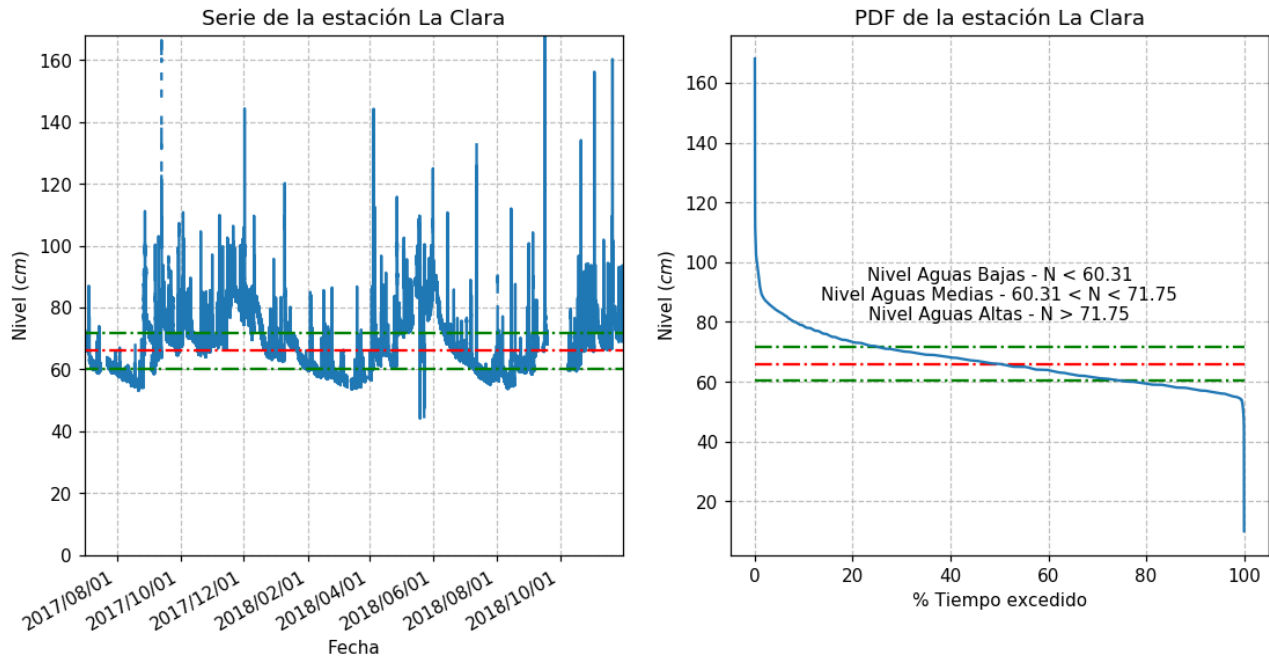


Figura 6.11: Clasificación de los niveles de la estación del SIATA 169 - San Miguel (E1)

En la figura 6.11 se muestran los niveles desde el 1 de julio de 2017 hasta el 30 de Noviembre de 2018, en donde se identifican 3 periodos secos, y 3 periodos de niveles altos, el primero de los periodos secos se logra apreciar entre el 1 de julio y 1 septiembre de 2017, el segundo periodo seco se logra apreciar entre el 1 de febrero y el 1 de abril de 2018, el tercer periodo con presencia de niveles mínimos ocurre entre el 1 de julio y 1 de septiembre de 2018, marcando una periodicidad de periodos secos que ocurre entre julio y septiembre, los periodos con presencia de niveles altos se presentan entre los meses de octubre de 2017 y enero de 2018, y entre el 1 de mayo de 2017 y el 1 de julio de 2018, y con un periodo sin terminar que va desde el mes de octubre de 2018 hasta el 30 de noviembre de 2018.

En la figura 6.12), se muestran los niveles desde el 1 de enero de 2017 hasta el 30 de Noviembre de 2018, en donde se identifican 4 periodos secos, y 4 periodos de niveles altos, el primer periodo de niveles bajos ocurrió entre los meses de enero y abril de 2017, el segundo periodo entre los meses de julio y septiembre de 2017, el tercero entre los meses de febrero y abril de 2018 y el cuarto entre los meses de julio y octubre de 2018, el periodo donde se registro menores niveles fue en el primer periodo seco de 2017; los periodos de niveles altos fueron 4 periodos, divididos 2 en el año 2017 y 2 en el 2018. El primer periodo de 2017 ocurrió entre los meses de mayo y junio, y el segundo ocurrió entre octubre y noviembre, el primer periodo de 2018 ocurrió entre los meses de mayo y julio de 2018, el segundo entro los meses de octubre y noviembre.

Mientras que en la figura 6.11, se logra identificar claramente los periodos de niveles bajos y altos, en la figura 6.12 no se logra identificar debido principalmente al tamaño de la cuenca, debido a que la estación Aula Ambiental recibe muchos tributarios los cuales

alcanzan niveles altos aun en temporadas de niveles bajos.

En ambos casos se logran apreciar un ciclo de mínimos y máximos coincidentes con los periodos de lluvia presentados en el capítulo 6.1, además también se logra apreciar como para la estación (E8) el régimen de caudal cambia a niveles bajos desde mucho antes que la estación (E1), lo cual se debe en gran parte a los cambios de sección y cobertura que sufre la cuenca en su nacimiento y en el centro de la misma.

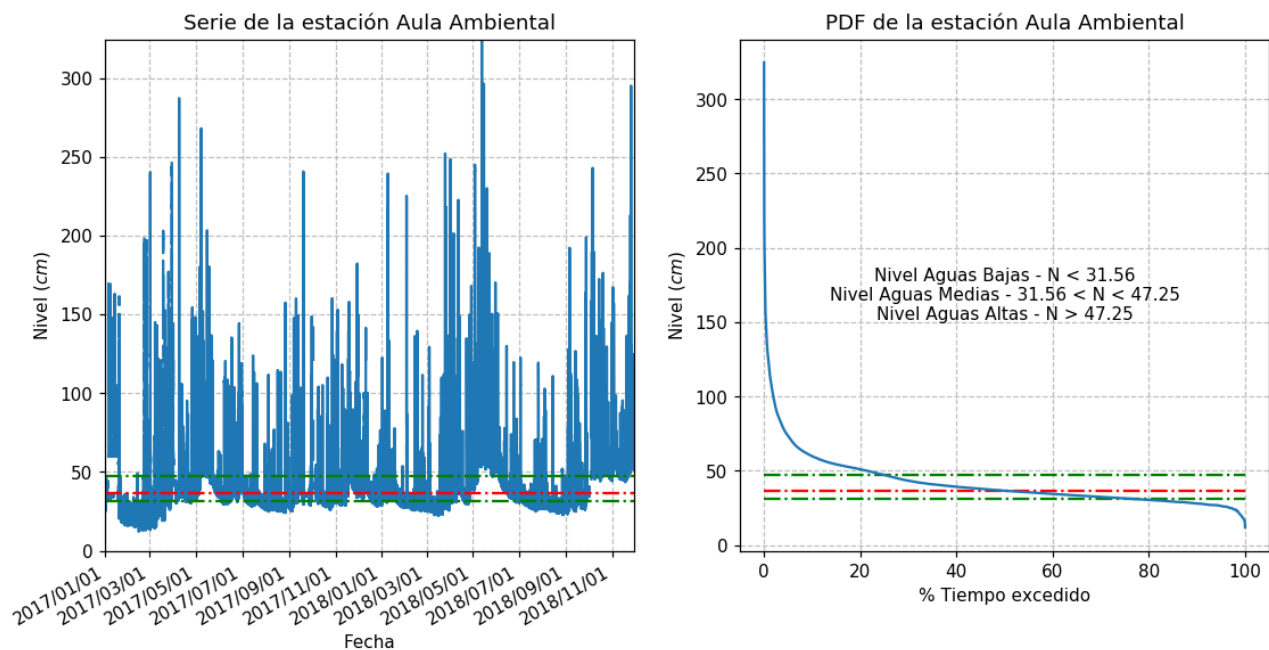


Figura 6.12: Clasificación de los niveles de la estación del SIATA 99 - Aula Ambiental (E8)

6.8. Curva de calibración estaciones automáticas de SIATA.

La estimación de caudales $Q(t)$ requiere de una curva de calibración, mediante la cual se relacione los niveles registrados $N(t)$ con $Q(t)$. Usualmente tiene un comportamiento potencial, sin embargo, esta relación presenta mucha incertidumbre debido principalmente a las condiciones de flujo no permanente y a las extrapolaciones de la curva de calibración por fuera del rango de las medidas tomadas en campo. En el caso potencial (ver ecuación 6.1), C y α son parámetros de calibración, que se obtienen a partir de una interpolación no lineal ajustada mediante mínimos cuadrados.

$$Q = C.N.(t)^\alpha \quad (6.1)$$

La metodología estándar para la obtención de los caudales, es realizar campañas de medición de las que se obtiene medidas discretas de h y $Q(h)$. las cuales requieren de una

actualización periódica para tener en cuenta los cambios en la geometría de canal y los cambios en el régimen de las descargas.

El número de campañas y la falta de aforos durante eventos extremos, sesga los resultados estableciendo relaciones que subestiman los caudales máximos durante eventos de avenida torrencial.

La disponibilidad de sensores de velocidad superficial en tiempo real, supone un avance en esta dirección. Cada sensor registra la velocidad de la lámina superficial de agua sobre un punto específico de la sección, sin limitaciones relacionadas con niveles altos en el canal ya que no hay contacto directo. Actualmente el SIATA cuenta con 4 sensores de velocidad superficial instalados en diferentes puntos de la red hídrica del Valle de Aburrá, además, en cada punto se encuentra instalado un sensor de nivel. El registro de ambos sensores minuto a minuto, posibilita la estimación de $Q(t)$ en un número de casos mayor al obtenido mediante aforos, y permite tener estimaciones durante crecientes.

Los datos de nivel de lámina se registran mediante el sensor Siemens (ver figura 6.14a). La resolución temporal de las medidas de nivel es de 1min, sin embargo, con el objeto de eliminar ruido estos han sido agregados a 5min. En la 6.14b se presenta una fotografía del sensor de velocidad superficial STALKER Pro II, la escala temporal del sensor se ha ajustado a la escala del sensor de nivel. El análisis del presente trabajo se limita a las estaciones en donde se cuenta con registro de nivel y velocidad de forma simultánea.



(a) sensor de Nivel (b) sensor de velocidad

El caudal es estimado por dos metodologías, a partir de los datos tomados durante los aforos, y mediante relaciones entre la V_{sup} (velocidad superficial) y la V_{med} (velocidad media de la sección). La estimación mediante aforos se realiza de acuerdo a la metodología presentada por Chow (1956), en esta se calcula la velocidad y el área de cada transecto. La velocidad se calcula como el promedio ponderado de las velocidades tomadas (Chow, 1956), y el área se obtiene a partir del levantamiento batimétrico y el nivel de la corriente. La estimación de Q a partir de V_{sup} se realiza mediante la ecuación 6.2, en donde A corresponde al área de la sección transversal (teniendo en cuenta el nivel actual) y f_v es el factor de relación entre V_{med}/V_{sup} .

$$Q = F_v \cdot V_{sup} \cdot A \quad (6.2)$$

El valor de F_v reduce la magnitud de V_{sup} de manera que sea similar a V_{med} , sin embargo, este valor tiende a variar entre secciones. Estas variaciones parecen estar asociadas a características de la geometría hidráulica de cada sección. Con el uso conjunto de las ecuaciones 6.1 y 6.2, se estima el caudal y se obtiene una curva de calibración en cada punto. En las estaciones La clara, 3 aguas, Aula Ambiental y Puente fundadores, se cuenta con información histórica de aforos realizados en los últimos años.

En estas estaciones se realiza una comparación entre las curvas de calibración obtenidas mediante la metodología clásica y la metodología propuesta a partir de estaciones de velocidad, de forma adicional, en todas las estaciones se presenta la ecuación de calibración obtenida y las bandas de confianza asociadas a la estimación.

Según (Costa. et al.), numerosas observaciones y medidas, muestran que en canales naturales, la velocidad del flujo se incrementa en la vertical con el logaritmo de la distancia tomado desde el fondo del canal, la velocidad cambia rápidamente cerca a la capa límite del fondo, y más lentamente hacia el centro del flujo, como resultado del comportamiento logarítmico, la velocidad media de cada vertical se ubica aproximadamente a 60 % de la altura de la lámina de agua. Debido al avance en la recolección de velocidades superficiales con sensores que no tienen contacto con el agua, y asumiendo que el perfil de velocidades tiene un comportamiento logarítmico, la velocidad superficial se transforma a la velocidad media del canal mediante un factor que se encuentra entre 0.8 y 0.9.

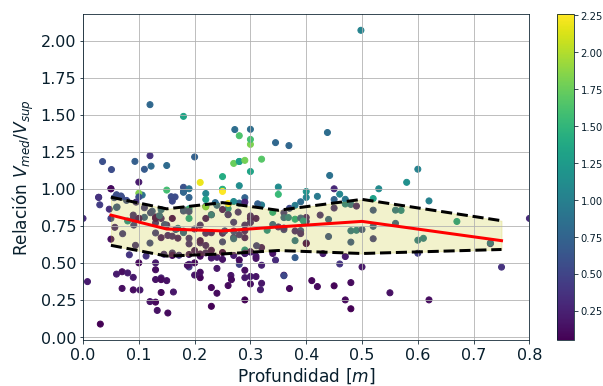


Figura 6.13: Cambio de la relación V_{med}/V_{sup} con respecto a la profundidad del canal, La línea roja corresponde a la evolución de la mediana por intervalos de clase, las líneas negras al rango intercuartil 25-75 %

De la figura 6.13, se puede observar como el Cambio de la relación V_{med}/V_{sup} con respecto a la profundidad del canal, En los puntos de análisis la velocidad superficial tiende a tener una relación estable con la velocidad media de la sección. Esta característica permite usar a V_{sup} como un estimador adecuado de V_{med} . Y, debido a la alta cantidad de datos (tomados cada minuto), en canales naturales al tener un poco mas de resistencia a la corriente este

valor se fija en 0.5, en canales canalizados o de grandes cuencas el valor se fija en 0.8.

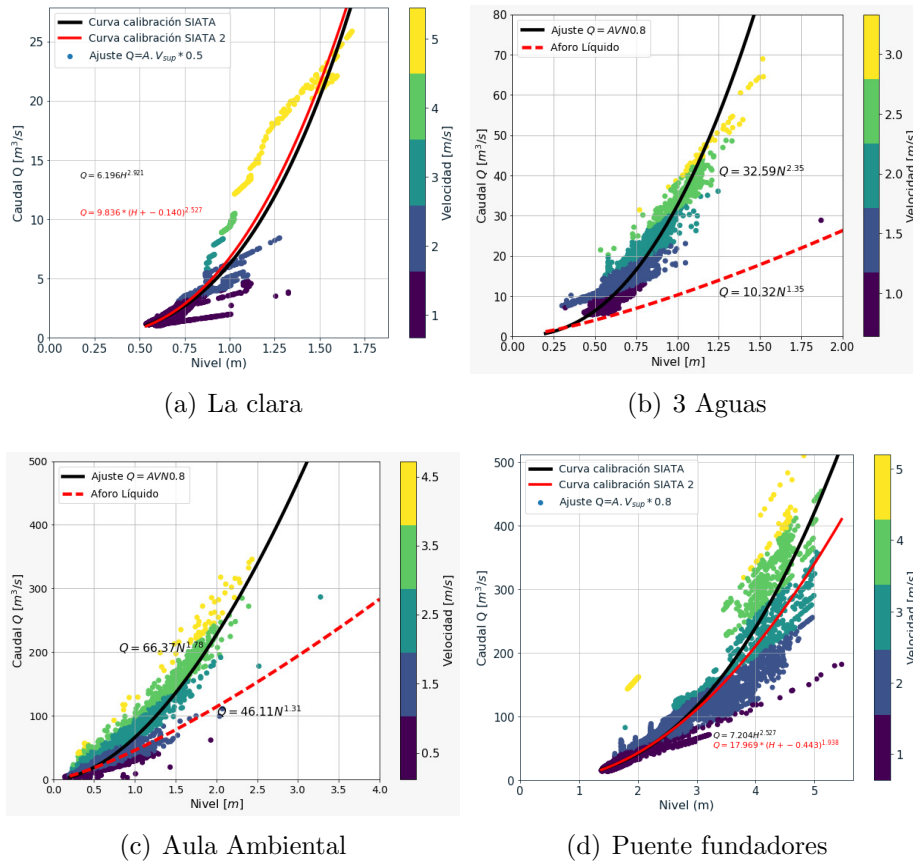


Figura 6.14: Curvas de calibración estimadas en los puntos evaluados. La banda de colores representa la velocidad superficial registrada. La línea negra corresponde al ajuste realizado a partir de los datos tomados por el sensor de velocidad, y la roja a estimaciones previas realizadas a partir de aforos.

Es de aclarar que a medida que se tengan mas datos dentro de la serie de datos, se van a mejorar los filtros de calidad, y se van a ir reduciendo la incertidumbre de los cálculos de las diferentes curvas de calibración, por lo que las curvas acá presentadas solo deben ser usados para obtener ordenes de magnitud y calibraciones de modelos lluvia escorrentía, en caso de ser usados por decisores políticos se deben realizar medidas adicionales de caudal, y estudios hidráulicos que validen las condiciones particulares de cada zona de monitoreo, ya que la metodología acá presente a pesar de la mejora en la obtención de caudales máximos sigue siendo una metodología experimental, que no tiene en cuenta todas las condiciones hidráulicas del entorno de cada cuenca.

7 Conclusiones

- Los resultados de los caudales son susceptibles tanto a los eventos de lluvia antecedentes al aforo, como a las condiciones climáticas que se presentaron durante el mes de la campaña, pero se ve una mayor influencia en el régimen de caudales altos por las lluvias que se presentan en horas cercanas al aforo.
- Durante el año 2017, en las estaciones que contaban con la estimación horaria de caudales, se trató de identificar el tiempo de respuesta de la corriente ante los eventos de precipitación y el comportamiento de las descargas en la cuenca. En las estaciones que se ubican sobre el río Aburrá-Medellín, se observó una respuesta marcada ante eventos de precipitación en el día o la noche anterior al aforo. En las quebradas el tiempo de respuesta es inferior pero igualmente responde con un aumento de caudal, según el acumulado de precipitación en la cuenca.
- Durante el año 2018, en campañas realizadas en quebradas, en general se obtuvieron regímenes de caudales altos, siendo aún más altos aquellos caudales influenciados por eventos de precipitación el día anterior al día del aforo. En el caso de la campaña del 9 de Mayo de 2018, debido a las precipitaciones del día anterior en la parte alta de la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, los mayores caudales se obtuvieron en la quebrada Doña Maria, La Ayurá, La Grande y la La Miel. En la campaña del 10 de Mayo del mismo año los mayores caudales se presentaron en las quebradas la Iguana, Santa Elena, Ovejas, influenciados por los núcleos de precipitación ubicados cerca de las descargas de estas corrientes en el río Aburrá-Medellín.
- A partir de Ancón Norte, los caudales sufren un escalamiento muy grande, debido principalmente a los aportes de caudal de otras cuencas vecinas, en especial el caudal de Río Grande, y la descarga de la central hidroeléctrica Tasajera capaz de generar un efecto remanso que puede llegar a abatir los niveles aguas abajo por algunos minutos.
- La estación de aforo Ancón Norte presenta la particularidad que el puente no esta ubicado perpendicular al cauce, por tal motivo los caudales tienden a ser mayores a los esperados, incluso pueden llegar a ser mayores a los caudales obtenidos en la estación Papelsa. Aun así, estas sobre estimaciones se presentan desde la fase I, por lo que se tiene un registro histórico con el cual se puede evaluar de manera adecuada los regímenes de caudal.
- Los cambios de cobertura y sección transversal sobre el río Aburrá-Medellín juegan un papel importante a la hora de explicar el régimen de caudal en temporada seca o en temporada de lluvias, ya que los tiempos de respuesta se ven influenciados directamente por el tipo de cobertura y las pendientes de las laderas.
- Los caudales Aforados desde la primera fase del proyecto, están en aguas bajas o medias, esto es debido a la dificultad que presenta tomar mediciones en temporada

de lluvias, ya que las velocidades y niveles del cauce son muy grandes, lo cual puede llegar a dañar el equipo de aforo o pueden atentar contra la seguridad del personal en campo, por tal motivo el uso de mediciones sin contacto como lo es el sensor de velocidad superficial es un paso hacia adelante en la investigación, y la forma de obtener los caudales en tiempo real para las futuras campañas de monitoreo.

- Se hace necesaria la instrumentación con sensores de velocidad superficial y nivel debido a que los aforos se realizan únicamente cuando el caudal de la corriente es bajo y permite el ingreso del personal, esto con el fin de tener una clasificación completa de caudales, que incluya los caudales altos.

Referencias

Jhon Costa., Spicer Kurt R., Cheng Ralph T., Haeni F. Peter, Melcher Nick B., Thurman E. Michael, Plant William J., and Keller William C. Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4): 553–556. doi: 10.1029/1999GL006087.

J Le Coz, B Camenen, X Peyrard, and G Dramais. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow measurement and Instrumentation*, 26: 18–29, 2012.

POMCA. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Aburrá – POMCA*. 2007.