

MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO: MODELAMIENTO
HIDROLÓGICO Y OPCIONES DE MANEJO USANDO EI SOFTWARE MIKE

JEISSON JAVIER LEAL ROJAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2016

MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO: MODELAMIENTO
HIDROLÓGICO Y OPCIONES DE MANEJO USANDO EL SOFTWARE MIKE

JEISSON JAVIER LEAL ROJAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Ambiental

MARIA ESTHER RIVERA
PhD. Hidrología
Director Académico

JESÚS RAMÓN DELGADO
Geólogo
Codirector Académico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2015

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Pamplona, 7 de Junio del 2016.

Dedicatoria.

A Dios y a mis padres, porque sin su ayuda no estaría donde estoy, ni sería lo que soy.

El futuro nos tortura y el pasado nos encadena. He ahí por qué se nos escapa el presente.

Gustave Flaubert

Escritor francés (1821-1880).

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su complicidad, paciencia y entrega en todas las salidas de campo.

A mis profesores María Esther y Jesús Ramón (Chucho), por su apoyo, exigencia, buenos consejos y dedicación a lo largo de esta etapa de mi vida.

A toda la comunidad de la microcuenca de la Quebrada El Bobo, sin su colaboración no hubiese sido posible la realización de mi tesis, un agradecimiento especial a Edgar Rico, Jairo Manuel y Francisco Jaimes, quienes me brindaron su ayuda incondicional y desinteresada.

A DHI, quienes de forma altruista promueven la investigación y el desarrollo de nuevos profesionales a nivel mundial, sin ellos, los resultados hubiesen sido otros.

A Alejandro E. Lasarte, Alberto Galvis C. y Juan Gabriel Urrego por su aporte y ayuda en el manejo de MIKE.

A Statistical Solution, por su colaboración y entrega del software Solas versión 5.0.

A Dios, por todos los pequeños milagros que hace por mí.

A todos ustedes, muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. PLATENAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	14
4. OBJETIVOS.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
5. MARCO REFERENCIAL.....	16
5.1 MARCO CONTEXTUAL.....	16
5.2 ESTADO DEL ARTE.....	17
5.3 MARCO TEORICO.....	19
5.3.1 Características físicas y morfométricas de una cuenca.....	19
5.3.2 Monitoreo de caudales y lámina de agua e imputación de datos faltantes.....	29
5.3.3 Curva de Duración de Caudales.....	32
5.3.4 Curvas IDF, Hidrógrama e Hietograma.....	33
5.3.5 Recopilación de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	38
5.3.6 Índice de Escasez.....	40
5.3.7 Geología característica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	40
5.3.8 Análisis granulométrico.....	41
5.3.9 Paquete computacional para ambientes acuáticos MIKE.....	42
5.3.10 Modelo unidimensional MIKE 11.....	42
5.3.11 Modelo hidrológico MIKE SHE.....	47
5.3.12 Modelo MIKE BASIN.....	51
6. METODOLOGIA.....	54
6.1 Caracterización física y morfométrica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	54
6.2 Monitoreo de caudales y lámina de agua, secciones transversales, imputación de datos faltantes y Curva de duración de caudales de microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	55
6.3 Curvas IDF, Hietograma y Hidrógrama de la microcuenca de la Quebrada el Bobo.....	57

6.4 Recopilación de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo	58
6.5 Índice de Escasez de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	58
6.6 Geología característica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	58
6.7 Granulometría de la Red fluvial de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	58
6.8 Modelo unidimensional MIKE 11.....	59
6.9 Modelo hidrológico MIKE SHE.....	59
6.10 Modelo MIKE BASIN.....	61
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	62
7.1 Caracterización física y morfométrica de la Microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	62
7.2 Monitoreo de caudales y lámina de agua, secciones transversales, imputación de datos faltantes y curva de duración de caudales de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	65
7.2.1 Imputación de datos faltantes.....	65
7.2.2 Curva de Duración de Caudales de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	66
7.3 Curvas IDF de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	69
7.4 Hidrógrama de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	70
7.5 Hietograma de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	72
7.6 Recopilación de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	73
7.7 Índice de Escasez de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	74
7.8 Geología característica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	75
7.9 Granulometría de la red fluvial de la microcuenca.....	78
7.10 Modelo Unidimensional MIKE 11.....	82
7.11 Modelo Hidrológico MIKE SHE.....	84
7.12 Modelo MIKE BASIN.....	87
CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES.....	93
BIBLIOGRAFIA.....	94

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Clases de forma de una cuenca según el coeficiente de compacidad	20
Tabla 2. Clasificación de rangos de pendiente.....	21
Tabla 3. Ecuaciones de tiempo de concentración.....	28
Tabla 4. Ecuaciones de Periodo de retorno y probabilidad de excedencia....	32
Tabla 5. Numeración y abertura de tamicés.....	41
Tabla 6. Estructura modular del sistema MIKE 11.....	43
Tabla 7. Características Morfométricas de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	62
Tabla 8. Características Morfométricas de la Red de Drenaje.....	63
Tabla 9. Tiempos de concentración según varios autores.....	65
Tabla 10. Imputaciones simples y múltiples para los datos faltantes de precipitación mediante el software SOLAS.....	66
Tabla 11. Estadísticos descriptivos básicos para cada punto de aforo.....	68
Tabla 12. Análisis de la calidad del agua para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	74
Tabla 13. Índices de Escasez para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	74
Tabla 14. Coeficientes de Rugosidad de Manning de las secciones transversales.....	83
Tabla 15. Constantes de Humedad de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	84
Tabla 16. Características principales de los tipos de vegetación de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	86
Tabla 17. Distribución espacial de los usuarios del recurso hídrico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	90
Tabla 18. Disminución del Caudal por uso Doméstico/Agrícola.....	90

LISTA DE IMÁGENES

	Pág
Imagen 1. Ubicación de la Microcuenca de la quebrada El Bobo.....	16
Imagen 2. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión.....	22
Imagen 3. Curva hipsográfica o de altura media.....	23
Imagen 4. Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales.....	25
Imagen 5. Patrones de drenaje de una cuenca.....	26
Imagen 6. Curva de duración de caudales.....	32
Imagen 7. Curvas IDF.....	33
Imagen 8 Hidrógrama.....	34
Imagen 9. Hietograma.....	37
Imagen 10. Productos de DHI.....	42
Imagen 11. Tramo de un cauce con la malla computacional.....	44
Imagen 12. Estructura básica del proceso del sistema de modelamiento hidrológico MIKE SHE.....	47
Imagen 13. Tramos y puntos H de MIKE 11 en las celdas con enlaces en los ríos de MIKE SHE.....	49
Imagen 14. Interfaz de usuario de MIKE BASIN en ArcMap.....	51
Imagen 15. Esquema sobre la utilización del recurso hídrico en MIKE BASIN.....	52
Imagen 16. Puntos de aforo de la microcuenca de la Quebrada El Bobo....	55
Imagen 17. Modelo Hidrológico MIKE SHE.....	59
Imagen 18. Pantalla de inicio de MIKE BASIN.....	61
Imagen 19. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuenca de la Quebrada EL Bobo.....	64
Imagen 20. Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes para la Microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	64
Imagen 21. Curvas de duración de caudales - Zona baja Aforo 1.....	66
Imagen 22. Curva de duración de caudales - Zona media Aforo 5.....	67
Imagen 23. Curva de duración de caudales - Zona alta Aforo 8.....	67
Imagen 24. Curvas IDF de la Estación ISER PAMPLONA para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	69
Imagen 25. Hidrógrama Unitario Sintético de Snyder para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	70
Imagen 26. Hidrógrama Triangular del U.S Bureau of Reclamation para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	70
Imagen 27. Hidrógrama triangular de Témez para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	71

Imagen 28. Hietogramas con diferentes periodos de retorno para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	72
Imagen 29. Puntos de muestreo de calidad del agua para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	73
Imagen 30. Mapa Geológico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo....	75
Imagen 31. Formación Tibú Mercedes (Kitm) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	76
Imagen 32. Formación Aguardiente (Kia) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	76
Imagen 33. Depósito Fluvio-torrencial (Qtf) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	77
Imagen 34. Depósito de Ladera (Ql) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	77
Imagen 35. Puntos de muestreo de granulometría para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	78
Imagen 36. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 1 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	78
Imagen 37. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 2 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	79
Imagen 38. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 3 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	79
Imagen 39. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 4 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	80
Imagen 40. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 5 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	80
Imagen 41. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 6 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	81
Imagen 42. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 7 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	81
Imagen 43. Microcuenca de la Quebrada El Bobo en MIKE 11.....	82
Imagen 44. Puntos de muestreo de Constantes de Humedad para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	84
Imagen 45. Cobertura Vegetal de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	87
Imagen 46. Usuarios del recurso hídrico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	88
Imagen 47. Cultivos de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	88
Imagen 48. Modelo MIKE BASIN para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.....	89

RESUMEN

La explotación de los recursos naturales produce deterioros ambientales, lo cual cobra una especial importancia en zonas donde no se cuenta con estudios suficientes que permitan un uso racional de dichos recursos, este es el caso de la microcuenca de la Quebrada El Bobo. Se realizó una caracterización morfométrica, monitoreo de caudales y lámina de agua durante un periodo de 6 meses, imputación de datos faltantes mediante el software Solas 5.0, Hietogramas, Curvas de Duración, Curvas IDF, Hidrógramas, Índice de Escasez, Granulometría y se desarrolló la modelación de la microcuenca utilizando MIKE 11, MIKE SHE y MIKE BASIN. La microcuenca presentó una red de drenaje poco jerarquizada, potencial de erosión y peligro de avenidas torrenciales y mostro una capacidad de almacenamiento a medida que se descende por la red fluvial. Las Curvas de Duración de Caudales y los análisis estadísticos de la caudales mostraron un aumento en la variación de los caudales a medida que se descende por la microcuenca, indicado zona de recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca, lo cual se vio corroborado por la mayoría de los demás parámetros. El modelo MIKE 11 presento desbordamiento en algunas secciones transversales, esto no afecta de manera directa a la población pero esta si se ve afectada por daños indirectos en las conducciones hidráulicas y los sedimentos que transporta el agua. El modelo MIKE SHE no presentó ninguna zona de inundación, esto se debió a la alta pendiente que presento la microcuenca al estar ubicada en zona de montaña. El modelo MIKE BASIN junto con el índice de escasez reveló una sobre explotación del recurso hídrico. Aunque la microcuenca presenta una zona de recarga hídrica en la parte alta, la sobre explotación del recurso puede generar racionamiento y escasez de agua. Se recomiendan realizan estudios más a fondo para lograr un descripción completa de la microcuenca, seguir realizando monitoreo de los parámetro hidrológicos y elaborar planes de manejo hídrico en donde se logre la apropiación del recurso hídrico por parte de la comunidad y de las autoridades competentes.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto que existe una gran cantidad de estudios hidrológicos a nivel mundial y nacional, también es cierto que en Colombia existen muchos estudios locales no documentados y aún persisten zonas con poca información al respecto como lo es la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Esta falta de información junto al mal uso de los recursos naturales desencadena un deterioro ambiental. Un estudio hidrológico en la microcuenca de la Quebrada El Bobo es un paso hacia un manejo sostenible de los recursos naturales. Esta Microcuenca se encuentra localizada al Nororiente de Colombia, perteneciendo a la región Sur – Occidente del Departamento Norte de Santander y es límite geográfico entre los municipios de Pamplona y Pamplonita.

Para realizar el estudio hidrológico de la Microcuenca de la Quebrada El Bobo, primero se establece un levantamiento de información hidrometeorológica y, con base en esta información se obtiene la hidrología básica de la microcuenca (Caudal promedio, Curva de duración de caudales, Curvas IDF, Características morfométricas de la microcuenca, entre otras). Obtenida la hidrología básica, se desarrolla una modelación del cauce principal de la quebrada El Bobo y sus tributarios mediante el Software MIKE versión 2014 (desarrollado por el Instituto de Hidráulica de Dinamarca-DHI, por sus siglas en Inglés) basándose en la morfología del cauce, registros de caudal y lámina de agua y rugosidad. Luego, se analiza y busca dar una visión del estado actual de la microcuenca dando posibles opciones de manejo del recurso hídrico. Además, se da a conocer el índice de escasez de la microcuenca de la Quebrada El Bobo siguiendo la metodología planteada por la resolución 0865 del 2004. Toda esta información y análisis realizados servirán como base de un buen manejo del recurso hídrico por parte de sus habitantes y las autoridades competentes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Maass (2007), el desarrollo económico y social depende en gran medida de sistemas productivos basados en la apropiación de los recursos y servicios que ofrecen los sistemas naturales. La explotación de los sistemas naturales ocasiona un deterioro progresivo de los recursos naturales. Lo que demuestra que uno de los objetivos centrales del manejo de cuencas hidrográficas es lograr esquemas de desarrollo basados en sistemas productivos económicos, sociales y ecológicamente sustentables.

Si sumado al deterioro del entorno se añade la falta de información de la microcuenca hidrográfica de la Quebrada El Bobo. Su inadecuado manejo de la información facilita el mal uso de los recursos naturales lo que llevaría a un deterioro ambiental y con el tiempo va a generar problemas de sostenibilidad a sus habitantes.

Por lo anterior, la realización del estudio hidrológico de la Microcuenca de la Quebrada El Bobo va a generar el conocimiento fundamental para formular planes de manejo del entorno con proyectos orientados a la explotación sostenible de la agricultura, ganadería, piscicultura y actividades en donde el recurso hídrico sea fundamental. Finalmente la realización del estudio permitirá generar los conocimientos para concientizar a los habitantes de la microcuenca de la importancia de crear hábitos y costumbres ambientalmente saludables con respecto al manejo del agua.

3. JUSTIFICACIÓN

Con base en la problemática planteada se ve explícitamente la necesidad de mejorar el conocimiento de los recursos naturales, incluido el recurso hídrico. En los municipios de Pamplona y Pamplonita se tiene, no solamente un precario conocimiento de los recursos naturales e hidrológicos, sino que no se cuenta con las herramientas que permitan mantener y proyectar planes de manejo y regulación de dichos recursos.

Por lo tanto, la realización del proyecto será el primer paso a seguir en aras de obtener el conocimiento y la formulación de propuestas de manejo hídrico orientadas al sostenimiento del entorno a medida que se realiza una explotación económicamente rentable por parte de sus habitantes.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio hidrológico de la Microcuenca de la Quebrada El Bobo utilizando el Software MIKE VERSIÓN 2014.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar física y geomorfométrica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo utilizando la plataforma ArcGIS versión 10.2.2.

Caracterizar las propiedades físicas del suelo en el cauce de la quebrada.

Realizar el monitoreo de caudales y lámina de agua del cauce de la de la Quebrada El Bobo.

Calcular el índice de escasez.

Elaboración de las curvas IDF de la zona de estudio.

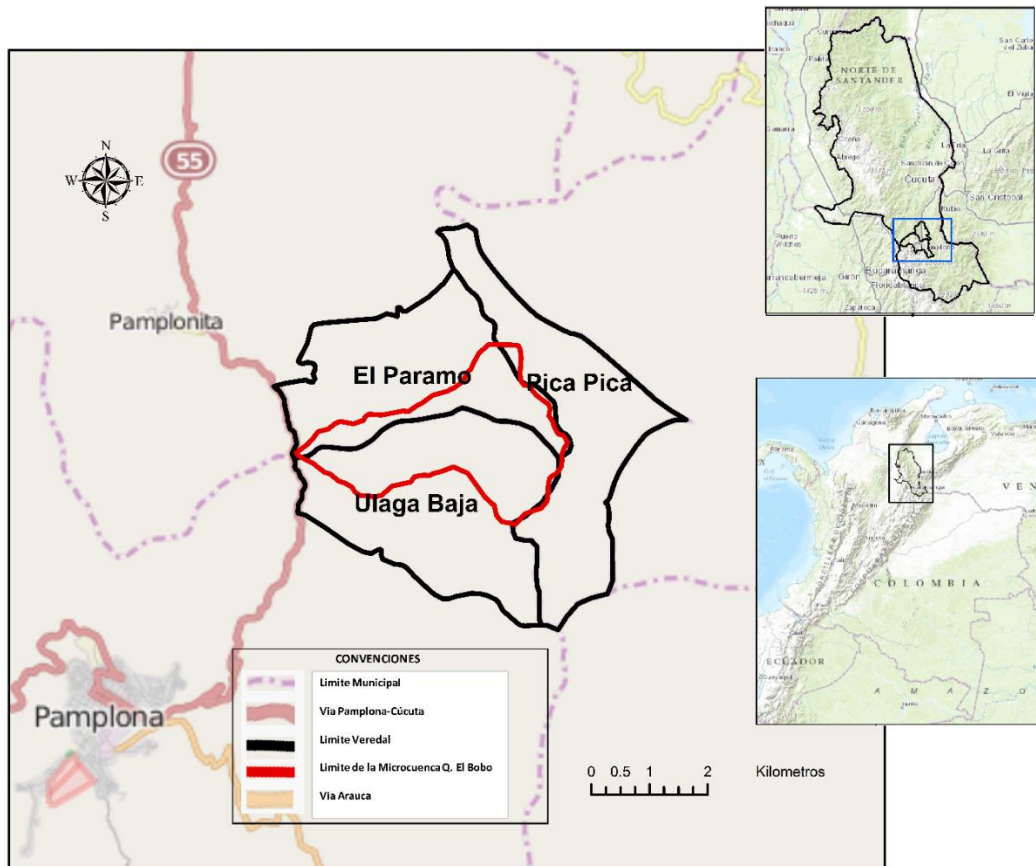
Realizar la modelación hidrológica en el software MIKE 11, MIKE SHE y MIKE HYDRO BASIN que permitan la formulación de propuestas de planificación.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONTEXTUAL

La Microcuenca de la Quebrada El Bobo se encuentra localizada al Nororiente de Colombia, perteneciendo a la región Sur – Occidente del Departamento Norte de Santander, es límite geográfico entre los municipios de Pamplona y Pamplonita. Está conformada por áreas territoriales correspondientes a tres veredas: la Vereda el Páramo y la Vereda Pica Pica del municipio de Pamplonita y la Vereda Ulaga baja del municipio de Pamplona (Imagen 1), de las cuales se encarga de suministrar el recurso hídrico a los habitantes de la vereda el Páramo y la vereda Ulaga baja, para el caso de la Vereda Pica Pica no existe un uso del recurso hídrico por parte de la microcuenca.

Imagen 1. Ubicación de la Microcuenca de la quebrada El Bobo.



Fuente: Esri et al. Editado por: Leal J, 2016.

5.2 ESTADO DEL ARTE

Desde hace mucho tiempo era evidente que las grandes civilizaciones tenían una estrecha relación con el recurso hídrico. Por ejemplo, es conocida la relación entre Mesopotamia y los ríos Tigris y Éufrates; la civilización Romana y sus sistemas de acueducto y alcantarillado. Estudios realizados por Darcy en 1856, Saint-Venant en 1871 y Manning en 1891 llevaron a que en el siglo XX se profundizaran los conocimientos hidrológicos. Sherman en 1932 elaboro el Hidrograma Unitario; Richards en 1931 diseño las Ecuaciones del flujo subterráneo; Horton en 1933 elaboro la Teoría de la Infiltración y en 1945 el análisis de la red de drenaje de la cuenca; Gumbel en 1941 propone la aplicación de las leyes de valores extremos en los estudios hidrológicos. Sin embargo, lo que marcó la evolución de la hidrología fue la incorporación de la tecnología digital, ya que esta permitió la posibilidad de simular mediante modelos matemáticos, las condiciones y situaciones de eventos naturales cuya secuencia y magnitud no necesariamente se habían registrado en el pasado. (Fattorelli y Fernandez, 2011).

A nivel mundial, en el 2003, Paul Christen Røhr realizo un estudio hidrológico titulado "A Hydrological Study Concerning the Southern Slopes of Mt Kilimanjaro, Tanzania", cuyo objetivo principal fue estudiar los procesos hidrológicos que tienen lugar en la ladera sur del monte Kilimanjaro, a la luz de las complejas interacciones con el uso de la tierra y de cómo el uso del suelo influye en la respuesta hidrológica de la cuenca. En el estudio hidrológico realizado en el Rio Mala (Perú) en abril del 2007 por el Ministerio de Agricultura se buscó describir, evaluar, cuantificar y simular el funcionamiento de la cuenca como un sistema hidrológico integral de los sucesos del ciclo hidrológico. Con respecto a la modelación hidrológica, se encuentra un sin fin de documentos relacionados con el uso del software MIKE, en el 2004, Thompson et al. Desarrollaron una modelación con el uso acoplado de MIKE SHE y MIKE 11 en búsqueda de una mejora a la perdida y degradación de un humedal ubicado al sureste de Inglaterra mediante diferentes simulaciones y un registro de 18 meses de datos hidrológicos. En 1999, Demetriou y Punthakey modelaron y evaluaron diferentes opciones de manejo sostenible mediante MIKE SHE, donde la gestión de los crecientes niveles freáticos y la salinización de la tierra provoco un problema constante para el riego en el distrito de Wakool ubicado al sur de Gales (Australia). En Junio del 2012, Charalampos Doulgeris et al. Realizaron una modelación en MIKE 11 de un sistema hidrológico conformado por el rio Strymonas y el lago Kerkini; ubicado entre Bulgaria y Grecia, en donde se analizaron dos escenarios, el primero se basó en la modelación de las condiciones en las que se encontraba el rio Strymonas y el lago Kerkini, para el segundo escenario se tuvieron en cuenta todas las condiciones que se necesitaría para la protección y conservación del rio Strymonas y el lago Kerkini, en donde medidas como la reforestación y la cuidado del entorno amortiguaría los efectos generados en periodos de sequía.

A nivel nacional, se cuenta con innumerables estudios hidrológicos que buscan solventar una necesidad o necesidades específicas. El Estudio Nacional del Agua (ENA), con su última actualización en el 2014 tuvo como objetivo dar a conocer el estado en el cual se encuentra el recurso hídrico a nivel nacional; La Guía Técnica de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Guía POMCAs) fue formulada con propósito de establecer los criterios técnicos, procedimientos y metodologías a través del desarrollo de los alcances y diferentes procesos que se deben tener en cuenta en las fases de aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y zonificación ambiental, formulación, ejecución y seguimiento y evaluación, así como los lineamientos para abordar los temas de participación y la inclusión de la gestión de riesgo en cada una de las fases previstas para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. “El Estudio Hidrológico e Hidráulico de la Cuenca del Río San Eugenio para Generar una Información Básica para la Intervención de la Cuenca en su Tramo Urbano”, fue realizado por el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad de Antioquia en el 2006.

A nivel Regional, en el año 2010 la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) publicó el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Pamplonita con el objetivo general de orientar la gestión ambiental en la cuenca del río Pamplonita procurando mantener y mejorar la calidad y oferta permanente de agua, la recuperación y conservación de áreas de especial significancia ambiental y el uso y manejo sostenible del suelo de manera concertada con los actores sociales, basándose en la caracterización de la cuenca hidrográfica y el establecimiento de la línea base. En relación con la modelación a nivel nacional en MIKE se han realizado varios trabajos. La modelación matemática del río Cauca tramo Salvajina - La Virginia, realizado en Junio del 2001 por la facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle y la Corporación Autónoma regional del Valle del Cauca (CVC), en donde se describió, se caracterizó y se realizaron modelaciones hidrodinámicas, morfológicas y de calidad del agua usando de MIKE 11 en el tramo Salvajina - La Virginia. El estudio realizado por Jaime Burbano Jaime B., Efraín D. y Andrés E. (2009), se realizó una modelación hidrológica para comparar el efecto de cuatro escenarios de manejo espacial de la cobertura del suelo sobre la mitigación de nutrientes provenientes de prácticas agrícolas en la cuenca alta del río Magdalena.

Dentro de los estudios locales existentes se encuentra:

- Hernández P, S. (2010). Realizo un trabajo denominado “Valoración monetaria de los beneficios que puede rendir un uso óptimo del suelo en la microcuenca monte dentro del Río Pamplonita, Pamplona, N. de S”.
- Villamizar L, P. (2012). “elaboración de las curvas IDF de la estación ISER-PAMPLONA para la microcuenca Quebrada Jurado del Municipio de Pamplona, Norte de Santander”.
- Jaramillo et al, (2007). “los suelos de la microcuenca Hidrográfica de Ulaga y su vínculo con la disponibilidad del recurso hídrico El Escorial”.

Con respecto a la zona de estudio, la Microcuenca Q. El Bobo, la información disponible es muy escasa. Se menciona lo siguiente:

-En el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de Pamplonita y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Pamplona se hace referencia a la Vereda el Páramo y la Vereda Ujala Baja respectivamente.

-Estudios que viene trabajando el Instituto Agropecuario Colombiano (ICA) con relación a la temática agropecuaria.

-Dentro del proceso de Planificación y Ordenamiento Ambiental Territorial, CORPONOR sede Pamplona, llevo a cabo la primera etapa de socialización para la reglamentación del uso del agua de la quebrada El Bobo en la sede educativa vereda el Páramo (Pamplonita) y la segunda etapa se llevó a cabo en la Sede Educativa Vereda Ujala Bajo (Pamplona) con el fin de informar sobre los procedimientos que se deben realizar para obtener las concesiones de agua.

5.3 MARCO TEORICO

5.3.1 Características físicas y morfométricas de una cuenca.

Dentro de un estudio hidrológico de cualquier cuenca, uno de los primeros procedimientos a realizar es la caracterización física y morfométrica. Estas características brindan información básica relevante sobre el posible comportamiento hídrico en cualquier cuenca. Según Henao (1998), las características físicas y morfométricas que se deben tener en cuenta en cualquier estudio hidrológico son:

- Área considerada como la medida de la superficie de la cuenca, encerrada por la divisoria topográfica.
- El perímetro como la medición de la línea envolvente del área.
- Longitud Axial, distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- El ancho promedio como el cociente entre el área de la cuenca y su longitud axial.
- Uno de los parámetros que controla la velocidad con que el agua llega al cauce principal es la forma de la cuenca, cuando sigue su curso, desde el origen hasta la desembocadura, la cual se expresa por un índice numérico. Entre los índices sugeridos se encuentran:
 - a) Factor Forma (Ff), expresa la relación entre el ancho promedio y la longitud axial. Este índice da alguna indicación de la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Así, las cuencas con factores forma bajos,

- son menos propensas a tener lluvias intensas y simultáneas sobre su superficie, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor.
- b) Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (K_c), es el valor resultante de dividir el perímetro de la cuenca por el perímetro de un círculo de igual área que la de la cuenca. El coeficiente de compacidad está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración y se distinguen tres clases de formas básicas (Tabla 1). En general, cuencas con K_c cercanos a la unidad presentaran una tendencia a concentrar volúmenes de agua y a generar avenidas torrenciales; caso contrario para valores del K_c bajos.

Tabla 1. Clases de forma de una cuenca según el coeficiente de compacidad.

Clase de forma	Rangos de clase	Forma de la cuenca	Descripción
KC ₁	De 1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda	Cuencas con alto peligro de avenidas torrenciales con grandes volúmenes de agua
KC ₂	De 1.25 a 1.50	Oval-redonda a oval oblonga	Cuencas con peligro de avenidas torrenciales con volúmenes de agua considerables
KC ₃	De 1.5 a 1.75	Oval oblonga a rectangular-oblonga	Cuencas con bajo peligro de avenidas torrenciales con volúmenes de agua moderados

Fuente: Henao (1998), Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Editado por: Leal J, 2016.

- c) El índice de alargamiento (I_a) se obtiene relacionando la longitud más grande de la cuenca con el ancho mayor, medido perpendicularmente a la dimensión anterior. Si se presenta un Índice de alargamiento (I_a) menor a 1.4, la cuenca es poco alargada; si se presenta entre 1.5 a 2.8, la cuenca es moderadamente alargada y si la cuenca presenta de 2.9 a 4.2 o mayor, la cuenca es muy alargada (Cortolima, 2008).
- d) El índice de homogeneidad (I_h) se obtiene relacionando el área de la cuenca con la de un rectángulo que tiene por eje mayor la longitud máxima de la cuenca y por eje o lado menor el ancho máximo de la cuenca.
- e) El índice asimétrico (A_d) es el cociente entre la superficie de la vertiente más extensa y la menos extensa. Si A_d se acerca a la unidad, el drenaje se considera homogéneo de una vertiente a otra, pero si A_d es claramente mayor que la unidad, el talweg principal no se encuentra en el centro de la cuenca, presumiéndose un recargo de la red de drenaje hacia una de las vertientes.

- La pendiente media de la cuenca (P_m), es una medida que se obtiene relacionando las diferentes alturas por donde pasa el cauce (curvas de nivel) con las distancias recorridas en metros. Para efectos prácticos en trabajos de cuencas se utiliza siempre la pendiente media.

Para determinar la pendiente media de la cuenca mediante un mapa topográfico se usa la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$P_m = \frac{(P_1 \cdot S_1) + (P_2 \cdot S_2) + \dots + (P_n \cdot S_n)}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde: P_m = Pendiente media de la cuenca.

P_1, P_2, \dots, P_n = Pendientes medias que caracterizan a la superficie.

S_1, S_2, \dots, S_n = Superficie entre curvas de nivel.

La clasificación adoptada en términos descriptivos se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de rangos de pendiente.

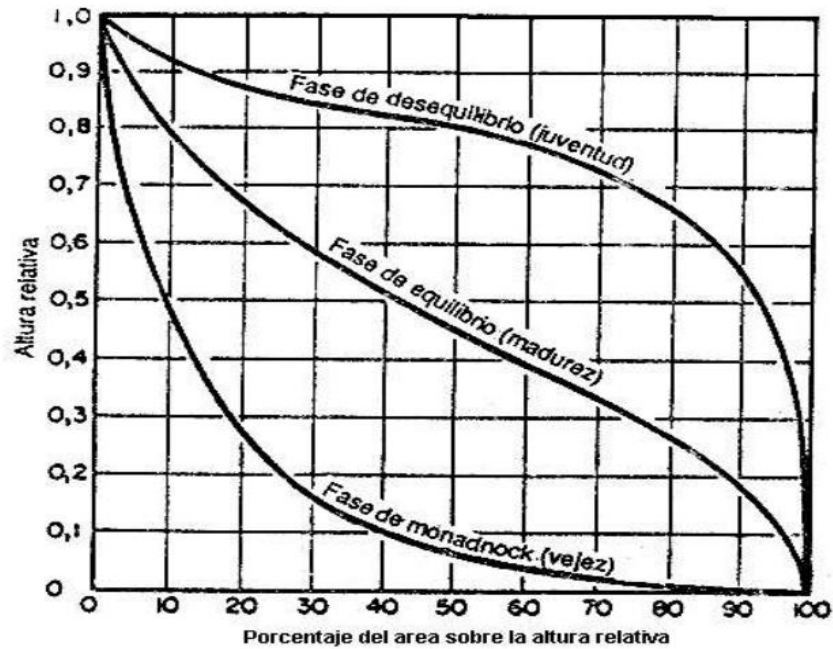
Pendientes medias (%)	Relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Mediano
12-20	Accidentado
20-35	Fuerte
35-50	Muy fuerte
50-75	Escarpado
Mayor de 75	Muy escarpado

Fuente: Henao (1998), Introducción al manejo de cuencas hidrográficas.

Según Monsalve (1999), la curva hipsométrica es un parámetro de gran importancia porque permite la representación del relieve de una cuenca, relacionando el valor de la cota, en las ordenadas, con el porcentaje del área acumulada, en las abscisas.

En la imagen 2 se observan las curvas hipsométricas que se pueden presentar en una cuenca, las cuales se puede clasificar en tres fases: Juventud, madurez y vejez. Una curva hipsométrica en fase de juventud refleja el gran potencial erosivo de la cuenca, en fase de madurez la cuenca esta en equilibrio (producción y deposición de sedimentos) y, en fase de vejez la cuenca presenta una alta capacidad de sedimentación (Schumn, 1977. Citado por Silva. 1999 y Guerra, González. 2002).

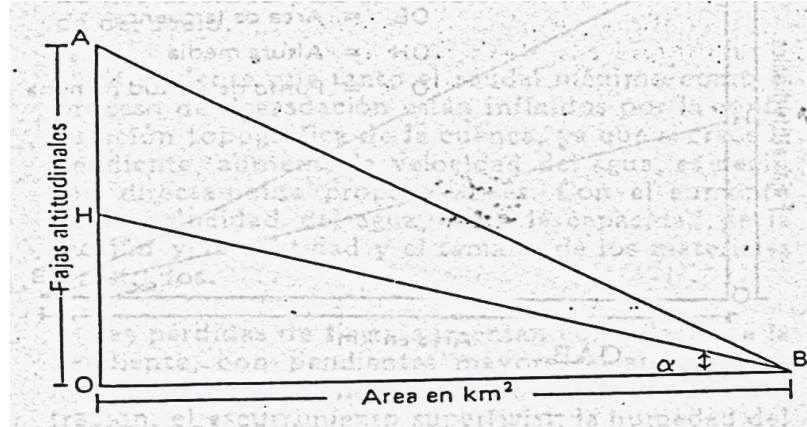
Imagen 2. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión.



Fuente: Strahler (1952), Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Citado por Guerra y González, 2002.

De acuerdo a Henao (1998), la altitud media o mediana de altitud se determina por medio de la curva hipsométrica. Su valor desde el punto de vista hidrológico es más representativo, pues con él se aprecia que la mitad de la superficie de la cuenca está influenciada por relaciones determinadas entre elevaciones y la temperatura- evaporación, porque, a mayor altitud menor será la temperatura y viceversa. Primero se establece la curva de altura media, también llamada curva hipsográfica, luego la superficie y la longitud respectivamente proporcionales al volumen y a la superficie proyectada de la cuenca. Finalmente se divide una por la otra (Imagen 3).

Imagen 3. Curva hipsográfica o de altura media.



Fuente: Henao (1998), *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*.

Para definir el relieve de una cuenca se utilizan tres índices: coeficiente de masividad, coeficiente orográfico, índice de masividad (Henao, 1998).

- a. El coeficiente de masividad de De Martone ($\tan \alpha$) se obtiene de la división de la altura media de la cuenca por su superficie proyectada (Imagen 3).

El coeficiente de masividad crece, mientras que la altura media del relieve aumenta y las superficies de la cuenca disminuyen. Por consiguiente, toma valores bastante grandes para cuencas muy pequeñas y montañosas; como caso típico, se disminuye para cuencas extensas con poco relieve acentuado. Aunque, se puede utilizar para medir el relieve, no permite alcanzar una cuantificación verdadera.

- b. El coeficiente orográfico es el producto entre la altura media de la cuenca y su coeficiente de masividad, este combina dos variables esenciales del relieve: su altura, que influye sobre la energía potencial del agua, y su pendiente la cual ejerce una acción sobre la escorrentía. El coeficiente orográfico puede caracterizar el relieve de las cuencas en un sentido más completo, evitando en gran parte los inconvenientes de los coeficientes de "altura media" y "coeficiente de masividad". Si dos cuencas tienen el mismo coeficiente orográfico, debido, en un caso, a la altura media del relieve; y en otro caso, al coeficiente de masividad, nada impide suponer que los caracteres del relieve son capaces de ejercer las mismas intensidades en cada uno de ellos, en cuanto al grado de erosión alcanzado por la cuenca bajo la influencia del clima.
- c. Según Strahler (1952), el índice de masividad establece la construcción de un tipo especial de curvas hipsográficas, relacionando

las siguientes variables: el porcentaje de superficie de la curva situado por encima de una altitud dada y el porcentaje de altitud situado por encima de un nivel base escogido. Ellas permiten determinar la repartición de masas rocosas que constituyen el relieve y tener una imagen de la topografía en conjunto de la cuenca.

- La orientación de la cuenca determina la cantidad de radiación solar que recibe durante el día y el Angulo de los rayos solares sobre la misma. Por lo tanto, la orientación de la cuenca con respecto al movimiento del sol y a la interposición de las cadenas montañosas con respecto a las corrientes de aire, es un factor que influye en su comportamiento hidro-meteorológico (Rojo, 2008).
- Sistemas de drenaje o patrones de drenaje: Carrasco (1992) considera que es la forma como es evacuada el agua caída dentro de los límites de la cuenca. La rapidez de evacuación del agua caída sobre una cuenca depende de la conformación del sistema o red de drenaje, de la pendiente de la cuenca, de la vegetación, de los tipos de suelos así como de su estado de humedad en el momento en el que se presenta la lluvia.

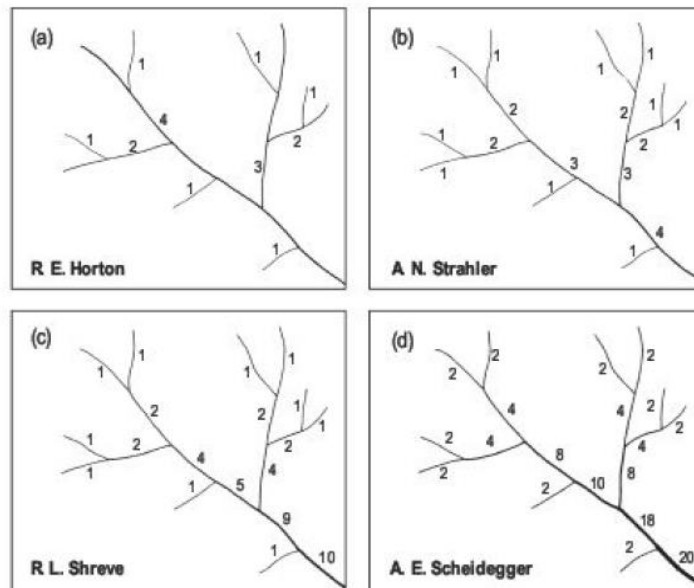
Para Monsalve (1999), los tipos de corrientes se dividen en:

- I. Perennes: Corrientes con agua todo el tiempo. El nivel de agua subterráneo mantiene una alimentación continua y no desciende debajo del lecho del río.
- II. Intermitentes: Corrientes que escurren en estaciones de lluvia y se secan durante el verano. El nivel de agua subterráneo se conserva por encima del nivel del lecho del río solo en la estación lluviosa. En verano el escurrimiento cesa, u ocurre solamente durante o inmediatamente después de las tormentas.
- III. Efímeros: Existen apenas durante o inmediatamente después de los periodos de precipitación, y solo transportan escurrimiento superficial. El nivel de agua subterráneo se encuentra siempre debajo del nivel inferior del lecho de la corriente; no hay, por lo tanto, posibilidad de escurrimiento subterráneo.

Existen diferentes clasificaciones de los sistemas de drenaje en donde se da una jerarquización de la red fluvial o un orden de drenaje (Imagen 4). Los dos sistemas de clasificación más conocidos son los propuestos por Horton (1945), los cauces correspondientes a las nacientes de la red de drenaje que no tienen afluentes se consideran de primer orden (1). El cauce de segundo orden (2) se forma con la unión de dos cauces de primer orden, a su vez, la unión de dos cauces de segundo orden forma un segmento del cauce de tercer orden (3) y así sucesivamente.

En el caso de Strahler (1952), opina que el cauce principal de la cuenca se clasifica desde el primer orden hasta el último teniendo en cuenta los puntos en los que se unen los tributarios al cauce principal. Shreve (1975), clasifica los segmentos de la red de drenaje como el número de afluentes que concurren a dicho segmento de la red de drenaje, y Scheidegger (1965), sigue un proceso similar al descrito por Shreve (1975) con la diferencia de que solo asigna números pares.

Imagen 4. Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales.



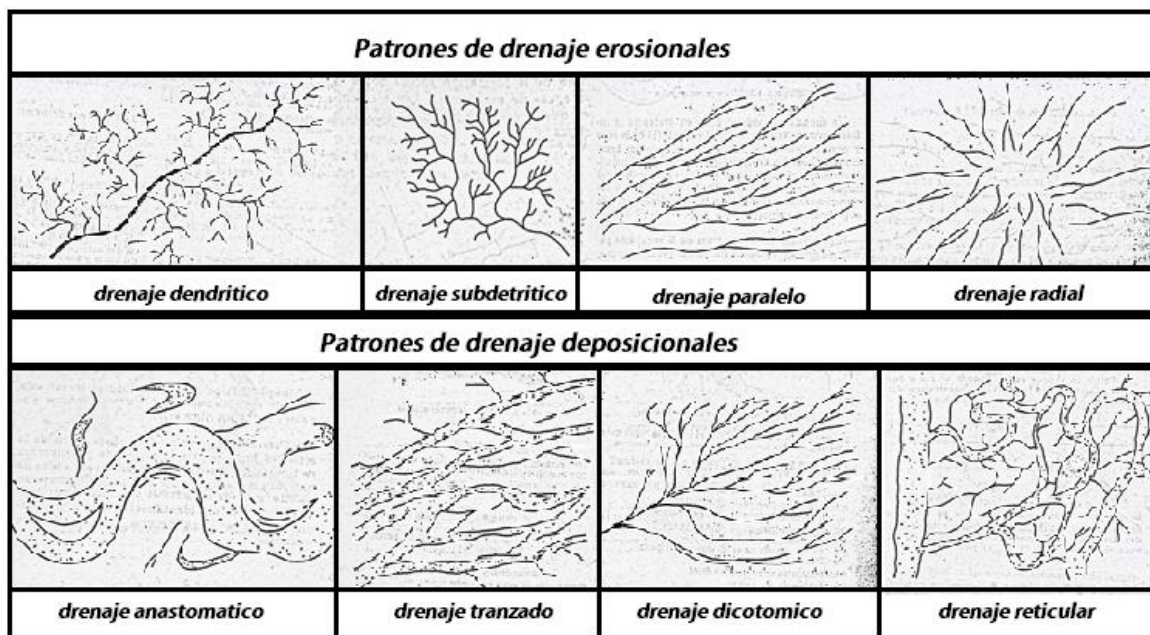
*Fuente: Gregory K. y Walling D. (1973), Drainage basin form and process.
Tomado de: Gutiérrez E. (2008), Geomorfología.*

El sistema de drenaje que se forma en un área determinada está directamente relacionado con la topografía del terreno y las propiedades físicas del suelo, especialmente la composición y granulometría del suelo o roca por donde transita el lecho del río.

Los estudios realizados con los sistemas de drenaje, han permitido diferenciar cierto número de estos, basados exclusivamente en su forma, lo cual ha dado a la clasificación de estos patrones (Gámez, 2007).

Existen patrones de drenaje originados por ríos erosionales donde se producen procesos de erosión, y patrones de drenaje por ríos deposicionales, donde ocurren procesos de sedimentación. En la imagen 5, se observan algunos de los patrones de drenaje (Cadena, 2009).

Imagen 5. Patrones de drenaje de una cuenca.



*Fuente: Henao (1998), Introducción al manejo de cuencas hidrográficas.
Editado por: Leal J, 2016.*

- Densidad de drenaje (Dd): Es un parámetro que se obtiene dividiendo la longitud total (L) de las corrientes permanentes e intermitentes de la cuenca expresada en Kilómetros, entre el área (A) de la cuenca en Km² (Carrasco, 1992).

En general, cuanto mayor sea la densidad de drenaje de la cuenca, será más rápida la respuesta frente a una tormenta. Por lo tanto, el tiempo en el que el agua evacuaría la cuenca sería menor. Dd usualmente toma valores entre 0.5 Km/Km² para cuencas con drenaje pobre hasta 3.5 km/km² para cuencas excepcionalmente bien drenadas (Monsalve, 1999).

Según Monsalve (1999), La sinuosidad de las corrientes de agua (S) es la relación entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce (L), y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta (Lt). Este parámetro da una medida de la velocidad de escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor de S menor o igual a 1.25 indica una baja sinuosidad. Se define, entonces, como un río con alineamiento "recto".

- Superficie umbral de escurrimiento (A_0): área mínima necesaria para que haya un gasto total que produzca escurrimiento concentrado. El escurrimiento concentrado, ocurre cuando hay una descarga mayor que permite el desplazamiento de material grueso, lo cual facilita la excavación del talweg. Las aguas tienen entonces suficiente energía como para excavar un lecho y profundizarlo con cada lluvia sucesiva (Henao, 1998).

Se determina con la siguiente formula (Ecuación 2):

$$A_0 = A^{1/S} \text{ (Ec. 2)}$$

A_0 es la superficie umbral de escurrimiento concentrado, A es el área de la cuenca y S es el orden del talweg superior.

- Pendiente media del cauce principal: Es el grado de inclinación que presenta una corriente de agua, ofrece ayuda para la deducción de la velocidad alcanzada por la corriente de agua. Ante lo impreciso de este sistema, se desarrolló un nuevo método para su cálculo, el cual tiene como resultado, llevar el área comprendida por el perfil del río (A) a un triángulo rectángulo de idéntica área. Se calcula la altura (H) del triángulo dividiendo el área comprendida por el perfil, sobre la longitud del río (L), la altura obtenida viene a ser el desnivel más aproximado que presenta el río; entonces la pendiente más precisa de la corriente está dada por el cociente entre H y L (Henao, 1998).
- Tiempo de concentración (t_c): tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida (Ibañez A., Moreno R., Gisbert B., 2011). En cuanto a las ecuaciones para su cálculo, se tiene una gran variedad de las cuales destacan las presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones de tiempo de concentración.

Método	Formula	Indicaciones
Bransby-Williams	$tc = 14,6LA^{-0,1}S^{-0,2}$	tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m)
Kirpich	$tc = 0,02L^{0,77}S^{-0,385}$	tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (m) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m)
Ventura-Heras	$tc = a \frac{A^{0,5}}{S}$	tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente media del cauce principal (%) A= Área de la cuenca (Km ²) L= Longitud del cauce principal (Km) a= Alejamiento medio, $a = L/A^{0,5}$ Siendo $0,05 \leq a \leq 0,5$
Passini	$tc = \frac{[0,108(AL)^{1/3}]}{S^{0,5}}$	tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²)
Giandotti	$tc = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{SL}}$	tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²)
Témez	$tc = 0,3 \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$	tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km)
California Culvert Practice	$tc = 60 \left[\frac{0,87075L^3}{H} \right]^{0,385}$	tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (Km) H= diferencia del nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)
Clark	$tc = 0,335 \left[\frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,593}$	tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) A= Área de la cuenca (Km ²)

Fuente: compilado de Gutiérrez, A. 2006. e Ibañez A., Moreno R., Gisbert B., 2011.

5.3.2 Monitoreo de caudales y lámina de agua e imputación de datos faltantes.

- Monitoreo de caudales y lámina de agua: Existen diferentes metodologías para el cálculo del caudal en un punto de aforo, desde las más convencionales como el aforo volumétrico o por flotador hasta metodologías más meticulosas como la medición de caudal por medio de un molinete, mediante trazadores a algún tipo de estructura hidráulica como un vertedero. Para que el monitoreo de caudales y lámina de agua cumplan con los requisitos mínimos para obtener una buena medición se debe tener en cuenta algunas indicaciones (Bustamante, 2006): El lugar o tramo que se escoja para establecer el punto de medición debe ser recto, el flujo del agua tiene que estar calmado sin turbulencias y debe observarse una velocidad estable, el río debe estar limpio de malezas, matorrales y rocas de gran tamaño a fin de evitar imperfecciones en la medición.
- Imputación de datos faltantes: Los datos faltantes son aquellos datos que no son registrados debido a cualquier acontecimiento. Dentro de la imputación de datos se encuentran los métodos de imputación simple y múltiple. La imputación simple consiste en asignar un valor por cada dato faltante basándose en el valor de la propia variable o de otras variables, generando una base de datos completa, mientras que la imputación múltiple consiste en asignar a cada dato faltante varios valores (m), generando m conjuntos de datos completos, en cada conjunto de datos completo se estiman los parámetros de interés y posteriormente se combinan los resultados obtenidos (Otero, 2011). Rubin (1978) considera que el número mínimo de imputaciones para proporcionar estimaciones válidas es, en general, tres (Otero, 2011).

En teoría los datos faltantes pueden obedecer a uno de los siguientes patrones (Goicoechea, 2002. Citado por Medina, 2008), dado que todo el desarrollo de métodos para estimarlos se basa en simulación de información o generación de distribuciones:

1. MCAR (Missing Completely At Random). Este patrón ocurre, cuando se supone que la probabilidad de ocurrencia de un evento de una variable dada no depende ni del valor de ella como tal ni del valor de otros eventos de otras variables consideradas.
2. MAR (Missing At Random). Este ocurre, cuando se supone que la probabilidad de ocurrencia de un evento de una variable dada depende de la ocurrencia de un evento de otra variable.
3. NMAR (No Missing At Random). Cuando el dato faltante depende de la misma serie de datos como tal o de otras series de datos de otras variables.

Dada la complejidad de algunos métodos de imputación, en especial los métodos de imputación múltiple. Existen software capaces de realizar dichos procesos, dentro de los cuales destaca SOLAS for missing data analysis. Solas fue desarrollado por la compañía Statistical Solutions Ltd en conjunto con el profesor Donald B. Rubin, de la Universidad de Harvard. Dentro de las metodologías de imputación simple de datos que utiliza SOLAS se encuentran:

1. Group mean o imputación por media: propuesta por primera vez por Wilks (1932) consiste en imputar el dato o datos faltantes como el promedio aritmético de los datos que se tienen.
2. Hot Deck - proceso de duplicación. Cuando existe un dato faltante, se duplica un valor ya existente en la muestra para reemplazarlo (Otero, 2011). Una ventaja de la imputación Hot Deck es que los valores imputados no sufren la pérdida de variabilidad. Bajo la hipótesis que el mecanismo que genera la ausencia de datos es MAR ó MCAR, las estimaciones de la media e varianza son no sesgadas. Otra ventaja es que el método no necesita de fuertes presupuestos matemáticos para la estimación de los valores faltantes (Ferreira, 2003).
3. Predicted Mean: Este método de imputación de datos faltantes usa la imputación Hot Deck basada en la imputación mediante regresión lineal por mínimos cuadrados, propuesto por primera vez por Buck (1960). En su forma más simple, es más cercana a la imputación por el vecino más cercano en donde la distancia se define basándose en los valores predichos y_i del modelo de imputación (Durrant, 2005).

Para el caso de imputaciones múltiples SOLAS cuenta con las siguientes metodologías:

1. Predictive Model Based: Esta imputación se desarrolla utilizando una regresión de mínimos cuadrados ordinaria o un análisis de discriminantes. La información de un conjunto especificado por el usuario de covariables se utiliza para imputar los valores perdidos en las variables a ser imputadas, el uso de este modelo estima nuevos parámetros de regresión lineal que son extraídos aleatoriamente de una distribución bayesiana (Statistical Solutions, 2014).
2. Propensity Score Method o índice de propensión: El índice de propensión es definido por Rosenbaum y Rubin (1983) como la probabilidad condicional de recibir un tratamiento dadas las características de un pre-tratamiento (Becker y Ichino, 2002). El índice de Propensión para la una unidad i , $e(x_i)$, puede ser estimado a partir de regresiones logísticas de

las condiciones del tratamiento z_i en un vector de covarianza x_i y viene dado por la ecuación 3:

$$\ln\left(\frac{e(x_i)}{1-e(x_i)}\right) = \beta x_i \text{ (Ec. 3)}$$

Donde β es el vector de los coeficientes de regresión. El índice de propensión estima la probabilidad de un tratamiento de ser asignado basándose en los pretratamientos de las covariables ya observadas, es común que este método utiliza modelación paramétrica, particularmente en las regresiones logísticas, aunque métodos no paramétricos como árboles de regresión o modelos boosted pueden ofrecer, en algunos casos, mejores resultados (Lee, Lessler y Stuart, 2009; McCraffrey, Ridgeway y Morral, 2004; Setoguchi, Schneeweiss, Brookhart, Glynn Y cook, 2008. Citado por: Pan y Bai 2015).

3. Predictive Mean Matching: Es uno de los métodos más comúnmente usados (Durrant y Skinner, 2006). El método Predictive Mean Matching (PMM) se puede considerar como un método de imputación de Nearest Neighbor Donor (NND) particular (Zio y Guarnera, 2006). En este método utiliza regresiones lineales y se basa en un bootstrap bayesiano aproximado (Statiscal Solutions, 2014). La idea básica del modelo de imputación PMM es utilizar métodos de regresión para llegar a una estimación del dato faltante de la variable x . Sin embargo, en lugar de utilizar dicha estimación, identifica uno o más vecinos que posean valores estimados similares, el valor observado del vecino más próximo es utilizado como el valor imputado para el dato faltante de la variable x (Williams, 2015).
4. Distancia de Mahalanobis: La distancia de Mahalanobis es una medida que se puede utilizar para medir la similitud entre dos vectores. Los vectores serán los casos del conjunto de datos los cuales se componen de los valores de las covariables especificadas para el cálculo (Statiscal Solutions, 2014). La Distancia de Mahalanobis viene dada por la ecuación 4:

$$d(\vec{x}_i, \vec{y}) = \sqrt{(\vec{x}_i, \vec{y})^T S^{-1}(\vec{x}_i, \vec{y})} \text{ (Ec. 4)}$$

Donde: \vec{x}_i representa el vector con los datos completos, \vec{y} representa el vector con datos faltantes y S^{-1} representa la matriz de covarianzas. Cada valor de dato faltante a imputar, es extraído al azar del subconjunto de valores observados que poseen una menor distancia de Mahalanobis.

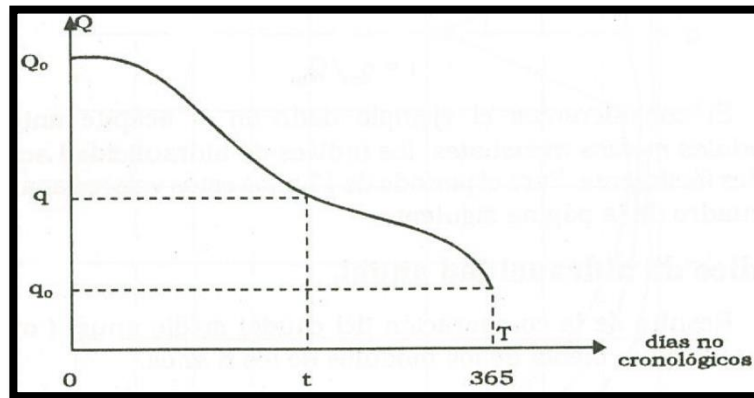
5. Propensity Score/Predictive Mean Matching/mahalanobis distance combination method: Es una combinación de los métodos de imputación

múltiple Propensity score, Predictive Mean Matching y la Distancia de Mahalanobis. Utiliza el índice de Propensión y Predictive Mean Matching al conjunto de datos. Los resultados son utilizados como covariables y se aplica el método de la Distancia de Mahalanobis para encontrar casos que se puedan utilizar para imputar los datos faltantes (Statiscal Solutions, 2014).

5.3.3 Curva de Duración de Caudales.

Se observa en la Imagen 6 donde el porcentaje de tiempo en el que un cierto valor de caudal es igualado o excedido. Es muy usada para estudios previos al aprovechamiento de un río y para la definición del caudal ecológico. (Fattorelli y Fernandez, 2011).

Imagen 6. Curva de duración de caudales.



Fuente: Carrasco (1992), Hidrología básica.

Para la elaboración de la curva de duración de caudales se utilizan periodos de retorno (T). Se define el periodo de retorno de un caudal como el intervalo medio de tiempo durante el cual existe la probabilidad de que se produzca una avenida con un caudal igual o superior al prefijado (Blázquez y García, 2000). Además, se define la probabilidad de excedencia (P) como el inverso del periodo de retorno (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones de Periodo de retorno y probabilidad de excedencia.

Formula	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
Weibull	$m/(N+1)$	$(N+1)/m$
Hazen	$(m-0.5)/N$	$N/(m-0.5)$
California	m/N	N/m

Fuente: Leal J, 2016.

Para la Tabla 4, N es el tamaño de la muestra y m representa la posición en la que se encuentra el valor del caudal en la columna ordenada en forma decreciente.

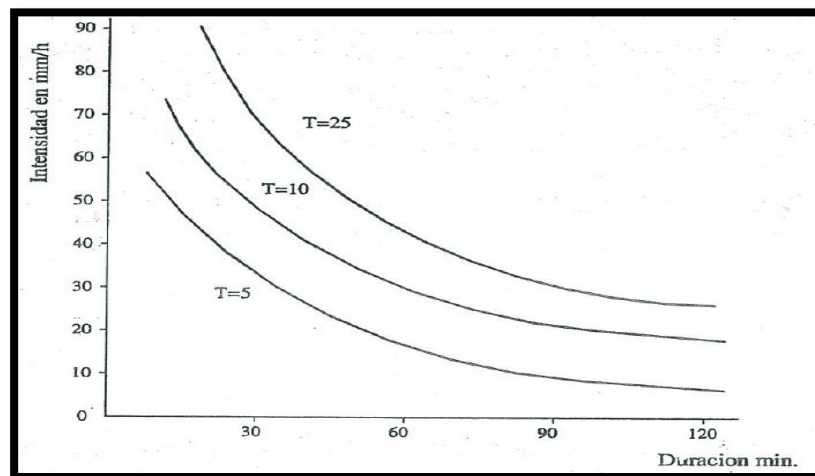
5.3.4 Curvas IDF, Hidrógrama e Hietograma.

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se pueden observar en la imagen 7 y las cuales se definen como patrones de conducta pluviométricas que se registra sobre un área ó región específica y que resultan de unir los puntos más representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Maldonado, Martínez y Matajira, 2007). Las curvas IDF estiman las frecuencias de sobrepaso de los eventos lluviosos observados a partir de su intervalo de observación y de su intensidad media, por interpolación grafica o matemática (Bertrand-Krajewski, 1999-2000; Citado por Torres, 2004). Las curvas IDF relacionan simultáneamente la intensidad, la duración y el periodo de retorno en una familia de curvas mediante la ecuación 5:

$$I = \frac{KT^m}{(d+c)^n} \text{ (Ec. 5)}$$

Donde k , m , n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, I y d corresponden a la intensidad de precipitación y la duración respectivamente y T corresponde a un periodo de retorno dado en años.

Imagen 7. Curvas IDF.



Fuente: Marín (2005), Hidrología Practica.

Chow et al (1994), plantean dos formas de trabajar con las curvas IDF. La primera, utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función Gumbel (Ecuación 6). La segunda, Expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica (Pizarro, 1996). Además, se suele utilizar la precipitación máxima probable en 24 horas para el cálculo de las curvas IDF. La precipitación máxima probable (PMP) se define como la cantidad de precipitación teóricamente más alta para una duración dada que es físicamente

posible sobre una localidad, en un área de tormenta y una época del año especificadas (Hansen et al, 1982; Citado por Casas, 1995). Para estimar la PMP en un lugar se han propuesto diversos procedimientos dependiendo de la situación de la cuenca, la disponibilidad de los datos y otras consideraciones (Wiesner, 1970; Schreiner y Reidel, 1978; WMO, 1986; Collier y Hardaker, 1996). La mayoría de ellos están basados en análisis meteorológico mientras que algunos se basan en análisis estadístico (Castello et al, 2013).

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde x representa el valor de la precipitación para un periodo de retorno dado, u y α se definen mediante las ecuaciones 7a y 7b respectivamente:

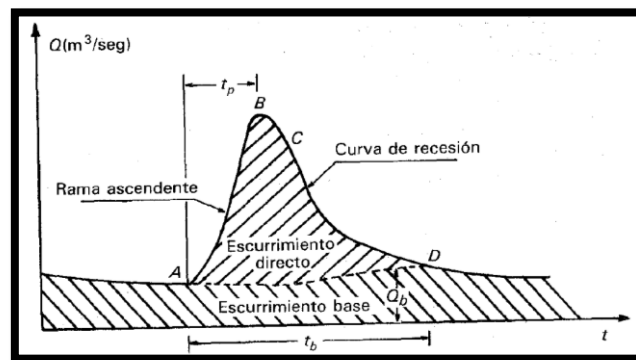
$$\alpha = \frac{\sqrt{6}s}{\pi} \quad (\text{Ec. 7a})$$

$$u = \bar{x} - 0.5772 \alpha \quad (\text{Ec. 7b})$$

Donde s representa la desviación estándar de la precipitación y \bar{x} representa el valor promedio de precipitación.

Hidrógrama: gráfica de los registros de caudales (o de alturas de lámina de agua convertidas en caudales) en función del tiempo (Carrasco, 1992). Según Aparicio (1992), aunque la forma de los hidrógramas producidos por tormentas particulares varía no solo de una cuenca a otra sino también de tormenta en tormenta, es posible, en general, distinguir las siguientes partes en cada hidrógrama (Imagen 8):

Imagen 8 Hidrógrama.



Fuente: Aparicio (1992), Fundamentos de Hidrología de superficie.

1. Punto de levantamiento (A): el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o

incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover.

2. Pico (B): gasto máximo producido por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrógrama para fines de diseño.
3. punto de inflexión (C): Este es el punto aproximado donde termina el flujo sobre el terreno, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.
4. Final del escurrimiento directo (D): De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión.
5. tiempo de pico (T_p): Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrógrama.
6. Tiempo base (T_b): Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es, entonces, el tiempo que dura el escurrimiento directo.
7. Rama ascendente: Es la parte del hidrógrama que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.
8. Rama descendente o curva de recesión: Es la parte del hidrógrama que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.

Según Carrasco (1992), los hidrógramas se pueden clasificar en:

1. Hidrógramas naturales: Se obtienen directamente de los caudales registrados en una sección determinada del cauce.
2. Hidrógramas sintéticos: Son simulados y se obtienen usando las características fisiográficas y parámetros de la cuenca receptora.
3. Hidrógramas unitarios: Obtenidos ya sea de los hidrógramas naturales o sintéticos y referidos a una lluvia uniforme de una altura unitaria de precipitación caída sobre una cuenca y en un tiempo especificado.
4. Hidrógramas adimensionales: Se elaboran para presentar hidrógramas unitarios usando el tiempo en el que se alcanza la máxima descarga y los porcentajes de caudales de punta como unidades básicas para representar los hidrógramas.

El hidrógrama Unitario sintético de Snyder (1938) se utiliza para cuencas intermedias a grandes, planteado por las ecuaciones 8a, 8b, 8c y 8d (Marín, 2005).

$$t_p = c_t(LL_c)^{0.3} \text{ (Ec. 8a)}$$

$$t_b = 3 + t_p/8 \text{ (Ec. 8b)}$$

$$Q_p = 2.78(C_pA)/t_p \text{ (Ec. 8c)}$$

$$t_o = 2/11t_p \text{ (Ec. 8d)}$$

Donde t_p - tiempo de retardo en horas, L - longitud en kilómetros del cauce principal, L_c - longitud en kilómetros desde el punto de desagüe de la cuenca hasta el centroide, c_t - coeficiente de almacenamiento del orden de 1.5 con rango entre 1.30 y 1.70, t_b - tiempo base en días (t_p de la ecuación 8b se debe expresarse en días), Q_p corresponde a la lluvia efectiva de 1cm (m^3/s), C_p es un coeficiente entre 0.45 y 0.75, A es el área en Km^2 y t_o - tiempo unitario dado en horas.

El hidrógrama triangular del "U.S Bureau of Reclamation" desarrollado por Victor Mockus basado en la revisión de un gran número de hidrógramas sintéticos de cuencas que varían en tamaño y ubicación geográfica están dados por las ecuaciones 9a, 9b y 9c (Pizarro et al, 1993):

$$t_p = (0.5D) + (0.6t_c) \text{ (Ec. 9a)}$$

$$t_b = (1.333D) + (1.602t_c) \text{ (Ec. 9b)}$$

$$Q_p = \frac{AE}{1.8t_b} \text{ (Ec. 9c)}$$

Donde t_c es el tiempo de concentración de la cuenca en horas, A es el área en Km^2 , E es la precipitación que cae en un tiempo unitario D producido por el hidrógrama unitario (normalmente toma el valor de 1mm), en el caso de D se recomienda utilizar el tiempo unitario obtenido por el hidrógrama unitario sintético de Snyder. Farías (2007) señala que el método del hidrógrama triangular del "U.S Bureau of Reclamation" es aplicable para cuencas pequeñas. Finalmente, el hidrógrama triangular de Témez, siendo similar al anterior, salvo la ecuación que define la pendiente del cauce viene dado por las ecuaciones 10a, 10b, 10c y 10d (Pizarro et al, 2013):

$$t_c = 0.3 * \left(\frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.75} \text{ (Ec. 10a)}$$

$$t_p = (0.5D) + (0.35t_c) \text{ (Ec. 10b)}$$

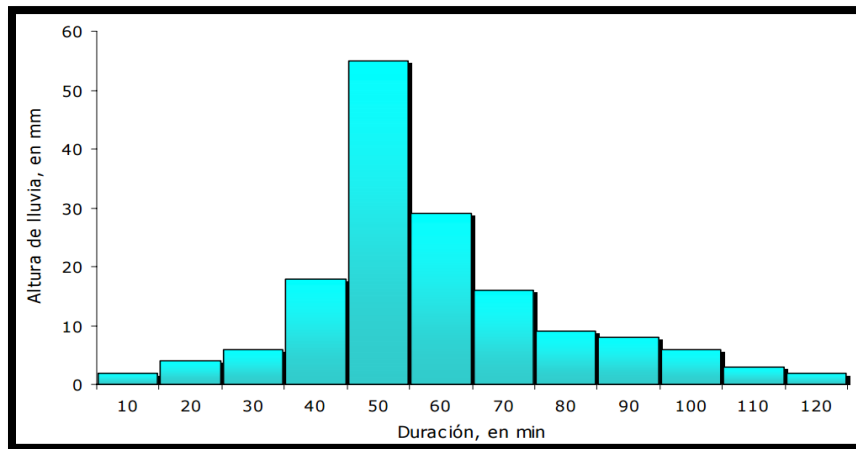
$$t_b = (0.5D) + (1.8t_c) \text{ (Ec. 10c)}$$

$$i = \frac{H_{m\acute{a}x} + H_{m\acute{i}n}}{L} \text{ (Ec. 10d)}$$

Donde i representa la pendiente media del cauce principal, D es el tiempo unitario en horas, $H_{m\acute{a}x}$ y $H_{m\acute{i}n}$ son la altura máxima del cauce principal y la altura mínima del cauce principal respectivamente.

Hietograma: gráfico que expresa la precipitación en función del tiempo en intervalos regulares de tiempo. Los hietogramas son utilizados en el diseño de tormentas y para el estudio de caudales máximos (Andía y Morales, 2009). Según Muñoz y Ritter (2005), el método de bloque alterno permite generar el hietograma a partir de las curvas IDF seleccionando un periodo de retorno y tormenta de duración total determinados (Imagen 9).

Imagen 9. Hietograma.



Fuente: García (2006), Hietogramas de diseño en zonas urbanas.

García (2006) cita otras metodologías diferentes al bloque alterno para la elaboración de un hietograma:

1. Método de la intensidad instantánea: la altura de precipitación para un periodo de duración alrededor del pico de la tormenta es igual al valor dado por la curva o ecuación que relaciona los valores de la intensidad-duración-periodo de retorno.
2. Método estadístico: requiere para su aplicación de información pluviográfica de las tormentas más desfavorables que han ocurrido en la cuenca o región hidrológica de estudio. Este método fue desarrollado e implementado en la Gran Bretaña.
3. Método de Tholin-Keifer (1959), considera como fundamental la forma típica de las curvas masas acumuladas de precipitación que se han registrado en el pasado durante un tiempo lo suficientemente confiable, en las estaciones pluviográficas de la cuenca o región de análisis. En una fase posterior, con la información disponible se efectúa un análisis espacial para detectar si la distribución de las curvas masas de precipitación, registradas en la red de estaciones de medición, presenta un comportamiento homogéneo y/o heterogéneo. Si la distribución de las curvas masas no presenta grandes variaciones, se concluye que hay

consistencia y homogeneidad en las curvas masas y en caso contrario hay una heterogeneidad en los datos.

5.3.5 Recopilación de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

AGROSOIL LAB es un establecimiento de Comercio de COLINAGRO S. A., matriculado en la Cámara de Comercio de Bogotá bajo el número 01190255 y registrado ante el ICA bajo resoluciones 01320 y 2397 y posee el certificado ISO 9001: 2008 otorgado por BUREAU VERITAS. Los análisis llevados a cabo por Agrosoillab con respecto a la calidad del agua van de acuerdo a las necesidades del estudio. En general realiza análisis de concentración de sales solubles, concentración de sodio con respecto a otros iones, la concentración de boro y otros elementos que pueden ser tóxicos, los contenidos de sólidos en suspensión, pH, dureza y conductividad eléctrica (Agrosoillab, 2016).

Dentro de los métodos más usados por Agrosoillab para la determinación de cada uno de los parámetros se encuentran los siguientes:

- Potenciometría. Medición de un potencial en una celda electroquímica. Único método electroquímico en el que se mide directamente un potencial de equilibrio termodinámico y en el cual esencialmente no fluye corriente neta. El instrumental necesario para las medidas potenciométricas comprende un electrodo de referencia, un electrodo indicador y un dispositivo de medida de potencial (Brunatti y De Napoli, 2004).
- Conductimetría. La conducción de una corriente eléctrica a través de una solución de un electrolito involucra la migración de especies cargadas positivamente hacia el cátodo y especies cargadas negativamente hacia el ánodo. La conductancia de una solución, que es una medida del flujo de corriente que resulta de la aplicación de una fuerza eléctrica dada, depende directamente del número de partículas cargadas que contiene. Todos los iones contribuyen al proceso de conducción, pero la fracción de corriente transportada por cada especie está determinada por su concentración relativa y su movilidad inherente en el medio (Brunatti y De Napoli, 2004). Esta técnica es ampliamente difundida para las determinaciones de control de calidad pues resultan ser determinaciones sencillas, económicas y tienen una serie de aplicaciones. Un método práctico muy importante es la titulación conductimétrica, es decir, la determinación de la concentración de un electrolito en solución, sea este fuerte o débil, por medio de la medición de su conductividad durante la titulación (Martínez; Hernández y Ortiz, 2006).
- Volumetría. El análisis volumétrico se utiliza extensamente para la determinación precisa de cantidades de analito del orden de las milimoles. Asimismo, puede aplicarse a cantidades más pequeñas cuando se combina

con técnicas instrumentales para la detección del punto final, por ejemplo, espectrofotometría o potenciometría. Por otra parte, los métodos volumétricos suelen ser rápidos y en muchas ocasiones existe la posibilidad de automatización. Para llevar a cabo una volumetría se añade un volumen, medido con gran exactitud, de una disolución cuya concentración se conoce (reactivo valorante), de modo que se produzca una reacción cuantitativa con el analito que se ajuste exactamente a una ecuación definida (González, 2013).

- Colorimetría. Es una técnica que suministra información cualitativa y cuantitativa sobre sustancias en disolución. El colorímetro es un instrumento diseñado para dirigir un haz de luz paralela monocromática a través de una muestra líquida y medir la intensidad del haz luminoso emergente. La fracción de luz incidente absorbida por una solución a una longitud de onda está relacionada con el paso óptico y con la concentración de la especie absorbente (Corzo y Rodríguez, 2008). Estas dos relaciones están combinadas en la ley de Lambert-Beer (Ecuación 11).

$$I = I_0 e^{-kcl} \text{ (Ec. 11)}$$

Donde I es la intensidad de luz transmitida, I_0 es la intensidad de luz inicial, k es el coeficiente de absorción molar ($M^{-1}cm^{-1}$) y c la concentración de la especie absorbente (moles/L).

- Turbidimetría. Mide la disminución de la luz transmitida a través de una suspensión de partículas utilizando para ello un espectrofotómetro (detector en la misma dirección del haz de luz) y se suele utilizar para soluciones concentradas. La turbidimetría puede realizarse en espectrofotómetros de luz visible o ultra violeta. Cuando la concentración de partículas en suspensión se mide por turbidimetría, la suspensión se pone en una cubeta similar a un tubo de ensayo, que permite realizar las medidas de la energía incidentes y transmitidas. La fuente de radiación más frecuentemente usadas es la lámpara de wolframio, pero pueden utilizarse otras fuentes de radiación visible (Ucross, 2014).
- Método de Kjeldahl. Sirve para determinar el contenido de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas. Se basa en la digestión de la muestra en ácido sulfúrico concentrado a ebullición, con la adición de un catalizador. La muestra se digiere hasta disolución y oxidación de la misma. El nitrógeno contenido en la muestra se convierte en amonio sulfato. Añadiendo un exceso de solución de sodio hidróxido, el ion amonio es liberado en forma de amoníaco, destilado y recogido sobre una solución de ácido bórico o sobre una solución valorada de ácido sulfúrico. El amoníaco recogido es determinado con una solución valorada de ácido o se valora por retroceso con

solución de sodio hidróxido de concentración conocida, si se recogió sobre ácido sulfúrico. Los resultados se pueden expresar en proteína (%N x factor), % N o % NH₃ (Panreac y Laboaragón, 2015).

5.3.6 Índice de Escasez.

Según Rivera et al (2004), el índice de escasez representa la demanda de agua que ejercen en su conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible (neta).

En Colombia se sigue la resolución 865 del 2004 metodología expuesta por el IDEAM y adoptada por el Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, en ella se plantean diferentes metodologías para calcular tanto la oferta como la demanda hídrica de una cuenca. Dentro de las metodologías para el cálculo de la oferta se encuentra el balance hídrico, caudal medio puntual y la relación lluvia-escorrentía, además de incluir un factor de reducción por la calidad del agua y el caudal ecológico. Para el caso de la demanda hídrica se tienen en cuenta escenarios en donde se cuenta con información medida, donde se encuentra con información medida insuficiente y cuando no se cuenta con información. La ecuación 12 muestra el cálculo del índice de escasez propuesto por la Resolución 865 del 2004.

$$I_e = \frac{Dh}{Oh} * Fr * 100 \text{ (Ec.12)}$$

Donde I_e es el índice de escasez en porcentaje, Dh es la demanda hídrica en metros cúbicos, Oh es la oferta hídrica superficial neta en metros cúbicos y Fr es el factor de reducción por la calidad del agua y el caudal ecológico.

5.3.7 Geología característica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

La geomorfología estudia y pretende cuantificar determinados rasgos de la superficie terrestre. La cuenca actúa como un colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos, esta función se realiza con ciertas pérdidas cuya interrelación con los factores hidrológicos, el clima y configuración del terreno es muy compleja (Campos Aranda, 1992).

Según el Plan Básico de Ordenamiento territorial del municipio de Pamplona (PBOT), desde el punto de vista geológico estructural, el municipio de Pamplona se encuentra ubicado en el flanco norte del Macizo de Santander sobre la Cordillera Oriental y dentro del sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta a escala regional. Las formaciones geológicas que se encuentran dentro y alrededor de la zona de estudio son Formación Floresta (Df-Dfm), Formación Diamante (PCd), Formación Bocas (Jib), Formación Girón (Jg), Formación Tibu-Mercedes (Kitm), Formación Aguardiente

(Kia), Formación Capacho (Kic), Formación La Luna (Ksl), Formación Colón y Mito Juan, Formación Barco (Tpb) y Formación Los Cuervos (Tplc).

5.3.8 Análisis granulométrico.

La granulometría, de "gránulo" (pequeño grano), trata de los métodos de medición del tamaño de un grano y por extensión de una población de granos. Se entiende por tamaño, una dimensión característica del grano, en general una longitud. Para una partícula fuertemente irregular, es a veces difícil definir un tamaño equivalente que sea satisfactorio desde el punto de vista físico (Salager, 2007).

Una forma de medir tamaños de partícula es haciéndolas por mallas o tamices de distintas aperturas. La apertura también se denomina luz del tamiz. Todas las partículas que atraviesen el tamiz tendrán un tamaño menor que su luz. Utilizando una serie de tamices de aperturas decrecientes apilados se consigue fraccionar el sistema en muestras de distintos tamaños de grano. Lo que queda retenido en un tamiz tiene un tamaño de partícula comprendido entre la apertura de dicho tamiz y la del tamiz inmediatamente anterior. De este modo se acotan los intervalos de tamaño de grano (García, 2016).

La finalidad de un análisis granulométrico es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS. El ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o subbases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis (Grupo de Geotecnia, 2016).

Al realizar el proceso de tamizado, los tamices dividen el tipo de suelo de la muestra y gracias a esto se puede realizar una pequeña clasificación de las partículas de la muestra según su tamaño (Tabla 5).

Tabla 5. Numeración y abertura de tamices.

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm.)	Abertura real (mm.)	Tipo de suelo
3 "	80	76,12	} GRAVA
2 "	50	50,80	
1 1/2 "	40	38,10	
1 "	25	25,40	
3/4 "	20	19,05	
3/8 "	10	9,52	} ARENA GRUESA
Nº 4	5	4,76	
Nº 10	2	2,00	} ARENA MEDIA
Nº 20	0,90	0,84	
Nº 40	0,50	0,42	
Nº 60	0,30	0,25	} ARENA FINA
Nº 140	0,10	0,105	
Nº 200	0,08	0,074	

Fuente: Espinace R, (1979). Citado por: Grupo de Geotecnia (2016).

5.3.9 Paquete computacional para ambientes acuáticos MIKE.

MIKE es un software diseñado y comercializado por DHI (Instituto de Hidráulica de Dinamarca), especializado en resolver desafíos con respecto al agua como la seguridad alimentaria, Ciudades sostenibles, protección ambiental, distribución justa del recurso hídrico, entre otras. MIKE se divide en cuatro diferentes programas especializados o módulos encargados de resolver problemas específicos con respecto al agua (Imagen 10).

El módulo de recursos hídricos se centra en la planificación de los recursos hídricos, la hidráulica fluvial, el agua subterránea, las inundaciones, el transporte de sedimentos y la ecología. Este módulo se divide a su vez en: MIKE 11 para aplicaciones fluviales, MIKE FLOOD para inundaciones producidas por aguas superficiales, MIKE SHE para la hidrología en una cuenca y MIKE HYDRO para la planificación de los recursos hídricos. De igual manera existen módulos para aguas subterránea, Mike urban, entre otros.

Imagen 10. Productos de DHI.



Fuente: DHI, 2014.

5.3.10 Modelo Unidimensional MIKE 11.

MIKE 11 es un modelo unidimensional diseñado para la modelación de ríos el cual simula el flujo y el nivel del agua, la calidad del agua, el transporte de sedimentos en

los ríos, las planicies de inundación, canales de irrigación, reservorios de agua y otros cuerpos de aguas continentales (Patón, 2011).

MIKE 11 se basa en una serie de subdivisiones en donde su matriz es el Modelo Hidrodinámico (HD), el cual es la base para los demás modelos incluidos como advección-dispersión, Calidad del Agua, Transporte de Sedimentos no Cohesivos, Lluvia-Escorrentía, entre otros (Tabla 6).

Tabla 6. Estructura modular del sistema MIKE 11.

	MÓDULO	NIVEL
HD	Hidrodinámico	Núcleo del modelo
HIS	Sistema de información hidrológica	Requiere del HD
GIS	Sistema de información geográfica	Requiere del HD
NAM	Lluvia-Escorrentía	Puede ser un modelo autónomo o acoplarse al HD
FF	Pronostico de inundaciones	Modelo autónomo, utiliza los resultados de HD y NAM
UH	Hidrógrafa unitaria	Requiere del HD
UD	Drenaje Urbano	Requiere del HD
SO	Operación de estructuras	Requiere del HD
DB	Rotura de presas	Requiere del HD
AMC	Calibración automática del coeficiente de Manning	Requiere del HD
ST	Morfológico	Requiere del HD
GST	Sedimentos gradados	Requiere del ST
AD	Advección/Dispersión	Requiere del HD
ACS	Avanzado de sedimento cohesivos	Requiere del AD
WQ	Calidad del Agua	Requiere del AD
EU	Eutrofización	Requiere del AD
HM	-Metales pesados	Requiere del AD
QSS	Estado cuasi-permanente	Requiere del HD, AD, ST, WQ, EU y HM

Fuente: CVC y La Universidad del Valle, 2001.

Ademas, MIKE 11 utiliza las ecuaciones de conservación de masa y movimiento de Saint Venant y permite efectuar simulaciones con diferentes descripciones simplificadas del flujo mediante ondas cinemáticas, difusas o totalmente dinámicas (Kamel, 2008). Las ecuaciones de Saint Venant se basan en los siguientes supuestos (DHI – MIKE 11, 2009):

1. El agua es incompresible y homogénea (densidad constante).

2. La pendiente del fondo es pequeña, por lo cual el coseno del ángulo que forma con la horizontal puede considerarse igual a 1.
3. Las longitudes de onda son grandes comparadas con la profundidad del agua. Esto asegura que el flujo es paralelo en el fondo.
4. El flujo es subcrítico. Sin embargo, el flujo supercrítico también puede ser modelado en MIKE 11 empleando condiciones más restrictivas.

Las ecuaciones de Saint Venant describen el flujo unidimensional de la onda larga y superficie libre en régimen no permanente de la siguiente forma:

Ecuación de conservación de masa de agua (Ecuación 13)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{Ec. 13})$$

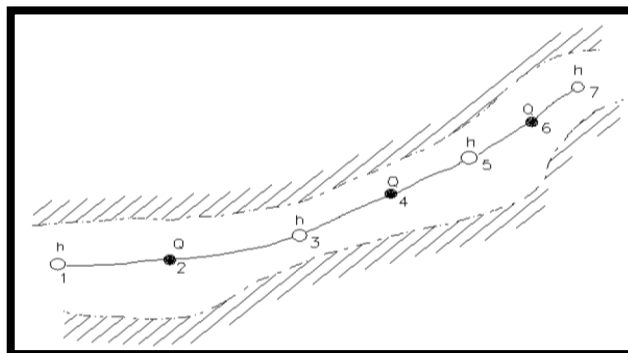
Ecuación de conservación de cantidad de movimiento (Ecuación 14)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{c^2 AR} = 0 \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , A es el área hidráulica en m^2 , q son los flujos laterales en m^3/s , h es la altura del nivel de agua con respecto al datum o nivel de referencia en metros, C es el coeficiente de Chezy, R es el radio hidráulico o radio de resistencia y α es el coeficiente de distribución del momentum.

Por otra parte, MIKE 11 utiliza el método de diferencias finitas desarrollado por Abbott y Ionescu (1967) para resolver las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. Se genera una malla computacional que alterna puntos de Q (caudales) ubicados entre dos puntos vecinos h (aguas arriba y aguas abajo) y en donde se tienen estructuras, mientras que los puntos h (láminas de agua) ubicados en las secciones transversales o a intervalos equidistantes entre secciones transversales tan grandes como la distancia máxima (dx_{max}) definida por el usuario (Imagen 11).

Imagen 11. Tramo de un cauce con la malla computacional.



Fuente: DHI (2009), Reference Theory MIKE 11.

De igual manera, MIKE 11 utiliza diferentes tipos de descripciones para la resistencia del lecho: el número de Chezy (C) y de Manning y Darcy-Weisbach. Para el coeficiente de Chezy ($m^{1/2}/s$), el término de resistencia de lecho en la ecuación de momentum se describe en la ecuación 15. El número de Manning ($m^{1/3}/s$), es equivalente al coeficiente de Strickler y su inverso es el coeficiente de Manning (n). El número de Manning corresponde a la ecuación 16. Para el caso de un factor de resistencia adicional dada la vegetación MIKE 11 utiliza el coeficiente de Darcy-Weisbach (λ), el cual se expresa mediante la ecuación 17 (DHI – MIKE 11, 2009).

$$\frac{gQ|Q|}{C^2AR} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\frac{gQ|Q|}{M^2AR^{4/3}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , A es el área hidráulica en m^2 , R es el radio hidráulico o Radio de resistencia y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2). Los valores para los números de resistencia, C , M o n , deben ser determinados a través de la calibración del modelo o basados en modelos ya calibrados con características topográficas similares.

Dentro de las condiciones de estabilidad del modelo que tiene MIKE 11 dependen principalmente de la relación entre el paso de tiempo (Time step) y el espaciado de la malla (grid spacing). No es posible dar una regla general para la selección de Δt y Δx que cubra todos los posibles escenarios. Con el fin de obtener una solución estable y precisa se deben cumplir las siguientes condiciones (CVC y La Universidad del Valle, 2001):

1. La resolución topográfica debe de ser lo suficientemente fina para que los niveles de agua y caudal no lineales sean adecuadamente resueltos. El máximo valor Δx se debe seleccionar sobre esta base.
2. El paso de tiempo Δt , debe de ser lo suficientemente corto para proporcionar una buena representación.
3. Si se utilizan estructuras puede ser necesario un paso de tiempo más corto.
4. La condición de Courant (Ecuación 18) se puede utilizar como una guía para seleccionar el paso de tiempo que también satisface las condiciones anteriores.

Se debe seleccionar un espaciamiento entre las secciones transversales tal que se satisfaga la condición de Courant y a su vez el tiempo total de simulación sea razonable. Como una guía general la separación entre las

secciones transversales debe disminuirse si los parámetros y características hidráulicas (la conductancia, principalmente) varían apreciablemente a lo largo de un tramo.

$$C_r = \frac{\Delta t(V + \sqrt{gy})}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde, V - velocidad (m/s), Δt - variación de tiempo (s), Δx - variación de la distancia (m), g - aceleración de la gravedad (m/s^2), y es la profundidad del flujo (m), C_r es el número de Courant.

5. La condición de velocidad dada por la ecuación 19 puede imponer algunas veces una limitación en el paso del tiempo Δt en el caso de que las secciones transversales varíen significativa y frecuentemente.

$$\frac{V\Delta t}{\Delta x} \leq 2 \quad (\text{Ec. 19})$$

El módulo de advección-dispersión de MIKE 11 describe el movimiento de las partículas conservativas y no conservativas dentro del agua. Según Sánchez (2012), la advección es el arrastre de un material o sustancia por el agua, en donde, si solo existiera ese proceso, dicha sustancia o material viajaría a la misma velocidad que el agua y su extensión ocupada sería constante; el proceso en el cual un material o sustancia disuelta en el agua se mueve de los puntos de mayor concentración hacia los de menor concentración se denomina difusión, y se produce a causa de la agitación continua de todas las moléculas del líquido (Ecuación 20):

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2q \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde C es la concentración de la sustancia (mg/L), D es el coeficiente de dispersión (m^2/s), A es el área de la sección transversal (m^2), C_2 es la concentración de la sustancia en la fuente o descarga (mg/l), q es el flujo lateral (m^3/s), x es la coordenada espacial (m) y t es la coordenada de tiempo (s).

Con respecto a la deposición de material suspendido, este ocurre cuando la velocidad media del flujo es lo suficientemente lenta para que las partículas y sedimentos floculen y permanezcan en el lecho sin ser suspendidas inmediatamente. Las partículas y los Floculos permanecerán en el lecho siempre y cuando el esfuerzo cortante del lecho es menor al esfuerzo cortante de deposición. La tasa de deposición está dada por la ecuación 21 (DHI – MIKE 11, 2009):

$$S = \frac{wC}{h_*} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right) \text{ Para } (\tau \leq \tau_{cd}) \quad (\text{Ec. 21})$$

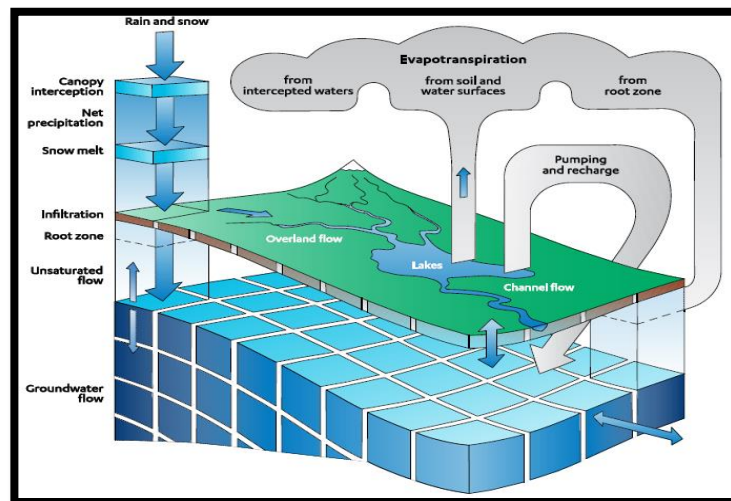
Donde S es el término de la ecuación de advección-dispersión, C es la concentración del sedimento suspendido (mg/L), w es la velocidad media de deposición de las partículas suspendidas (m/s), h_* es la profundidad promedio de cada partícula sedimentada (m), $\tau_{c,d}$ es el esfuerzo cortante crítico para la deposición o sedimentación (N/m^2), τ es el esfuerzo cortante del lecho (N/m^2).

5.3.11 Modelo hidrológico MIKE SHE.

El proyecto original de MIKE SHE surgió gracias a Freeze y Harlan (1969) quienes propusieron un esquema del ciclo hidrológico con sus diferentes flujos de procesos descritos y gobernados por ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones se usaron para representar los procesos físicos y son resueltas por el modelo mediante una discretización numérica aproximada en tiempo y espacio en donde se consiga una descripción de la cuenca con suficiente detalle (Butts et al, 2005).

MIKE SHE es un sistema de modelación para cuencas hidrográficas, el cual cuenta todas las características relevantes para modelar la mayoría de los procesos dentro del ciclo hidrológico como: la escorrentía, el agua subterránea, recargas hídricas y procesos de evapotranspiración. Además, puede modelar el flujo del agua, el transporte de sedimentos y la calidad del agua (Refsgaard y Storm, 1995). También tiene cuenta la evaporación del agua de los océanos, lagos, ríos, del suelo, el producido por las plantas y otros cuerpos de agua. El vapor de agua que es transportado a la atmosfera para luego caer a la tierra en forma de lluvia, granizo o nieve. La infiltración del agua subterránea y su descarga hacia los ríos y arroyos como flujo base. También la escorrentía directa a los arroyos y ríos la cual es finalmente depositada en los océanos (Imagen 12).

Imagen 12. Estructura básica del proceso del sistema de modelamiento hidrológico MIKE SHE.



Fuente: DHI (2009), MIKE SHE User Manual Volume 1.

Los datos de entrada en el modelo MIKE SHE dependerán del problema que se intente solucionar. Sin embargo, un modelo básico en MIKE SHE requiere los siguientes parámetros: Extensión del modelo, topografía y precipitación. Así como evapotranspiración, temperatura del aire (para el cálculo del derretimiento de nieve), radiación solar (para el cálculo del derretimiento de nieve), delimitación de la cuenca morfológica del río, uso y distribución del suelo, Geología del subsuelo, Especies o compuestos a ser simulados y su fuente.

Los principales componente y procesos dentro de MIKE SHE son:

- Evapotranspiración (ET): comprende la evaporación total del suelo y las superficies de agua, así como de la transpiración de las plantas por medio de las hojas. El cálculo para la evapotranspiración utiliza datos meteorológicos y de vegetación para predecir el total de evapotranspiración y la precipitación neta debida a la interceptación de las lluvias por el dosel, el drenaje de la cubierta de la superficie del suelo, la evaporación de la superficie del dosel, la evaporación desde la superficie del suelo, y la absorción de agua por las raíces de las plantas y su transpiración basada en la humedad del suelo en la zona radicular no saturada (Abril y Montalvo, 2014). Este modelo está basado en las ecuaciones empíricas de Kristensen and Jensen (1975).

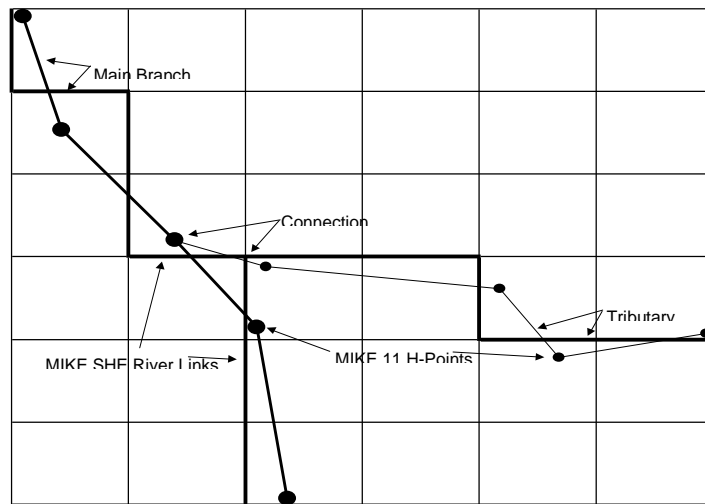
En este modelo, la evapotranspiración y humedad del suelo ubicada en la zona radicular se calcula a partir de la tasa de evapotranspiración de referencia, junto con la máxima profundidad radicular y en índice de área foliar. El modelo se basa en mediciones actuales y generalmente asume la temperatura de 0°C y por lo tanto, la precipitación no ocurre en forma de sólida (DHI – MIKE SHE, 2009). El primer paso de este método consiste en determinar la interceptación máxima de precipitación por el dosel de las hojas, tallos y ramas de las plantas. La capacidad de almacenamiento de la interceptación (I_{max}) depende del tipo de vegetación y de su etapa de desarrollo, que se caracteriza por el índice de área foliar (LAI) y viene dada por la ecuación 22, Donde C_{int} es el coeficiente de interceptación (Frana, 2012):

$$I_{max} = C_{int} * LAI \text{ (Ec. 22)}$$

- Canal de flujo: Los componentes de MIKE SHE se acoplan directamente a MIKE 11, este acoplamiento permite la simulación unidimensional del caudal de los ríos y niveles de agua utilizando las ecuaciones de Saint Venant de forma totalmente dinámica, la simulación de una amplia gama de estructuras de control hidráulico, como vertederos, puertas y alcantarillas, el modelamiento de zonas de inundación, mediante un proceso de mapeo de inundación simple que se basa en los niveles simulados de agua del río y el modelo digital del terreno y, el flujo dinámico de inundaciones desde el suelo hacia la red fluvial (Larsen et al, 2010; Liu et al, 2007).

El acoplamiento entre MIKE 11 y MIKE SHE se hace a través de enlaces en los ríos, estos enlaces se encuentran en los límites que separan las celdas de las mallas adyacentes. La red de enlace en el río es creada por la configuración del programa MIKE SHE basada en un subconjunto especificado por el usuario del modelo MIKE 11, llamado “*coupling reaches*”. Todo el sistema fluvial está incluido en el modelo hidráulico, pero MIKE SHE sólo intercambia agua con “*coupling reaches*”. La imagen 13 muestra parte de una malla del modelo MIKE SHE con los vínculos correspondientes a los enlaces en los ríos, los tramos de acoplamiento y los puntos H de MIKE 11 (Thompson et al, 2004).

Imagen 13. Tramos y puntos H de MIKE 11 en las celdas con enlaces en los ríos de MIKE SHE.



Fuente: DHI (2009), MIKE SHE User Manual Volume 2.

- **Flujo superficial:** El flujo superficial se simula a través de la topografía y puede ser usado para calcular planicies de inundación o escorrentía superficial. La ruta exacta de la escorrentía viene determinada por factores como la topografía del terreno, la fricción y las pérdidas producidas por la evaporación e infiltración a lo largo del recorrido.

El flujo de agua en la superficie del terreno se calcula mediante ondas de aproximación difusa de las ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones tienen una serie de componentes que describen procesos de flujo complejos, por tanto se utiliza una forma conocida como aproximación de onda difusiva (conservación de la masa), Ecuación 23, y momento, Ecuación 24^a y 24^b, mediante la cual se utiliza la ecuación de Manning/Strickler, Ecuación 25a y 25b (Abril y Montalvo, 2014).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = i \quad (\text{Ec. 23})$$

$$S_{fx} = S_{Ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{qu}{gh} \quad (\text{Ec. 24a})$$

$$S_{fy} = S_{Oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{qv}{gh} \quad (\text{Ec. 24a})$$

$$S_{fx} = \frac{u^2}{K_x^2 h^3} \quad (\text{Ec. 25a})$$

$$S_{fy} = \frac{v^2}{K_y^2 h^3} \quad (\text{Ec. 25b})$$

Donde S_f - fricción en las laderas en las direcciones x y y , S_o - fricción en la superficie del terreno, u - velocidad del flujo longitudinal (m/s), v - velocidad del flujo transversal (m/s), i - caudal de la fuente, h - profundidad de la lámina de agua (m) y k_x, k_y - los coeficientes de Strickler en las direcciones x y y .

- Flujo no saturado: Los cálculos para el flujo insaturado en cada malla de MIKE SHE requieren un tiempo de cálculo excesivo para la mayoría de aplicaciones a gran escala, además permite calcular el flujo insaturado en un subconjunto reducido de cuadrículas. La clasificación del subconjunto se realiza automáticamente por el programa de pre-procesamiento de acuerdo a los tipos de suelos, tipos de vegetación, zonas climáticas, y la profundidad de la capa freática (DHI – MIKE SHE, 2009).

MIKE SHE permite un flujo completamente tridimensional en un acuífero heterogéneo con condiciones de cambio entre un estado confinado y no confinado, mediante los coeficientes de almacenamiento específico y rendimiento específico, respectivamente. Las variaciones espaciales y temporales de la carga hidráulica se describen matemáticamente por la ecuación 26 de Boussinesq (Abril y Montalvo, 2014):

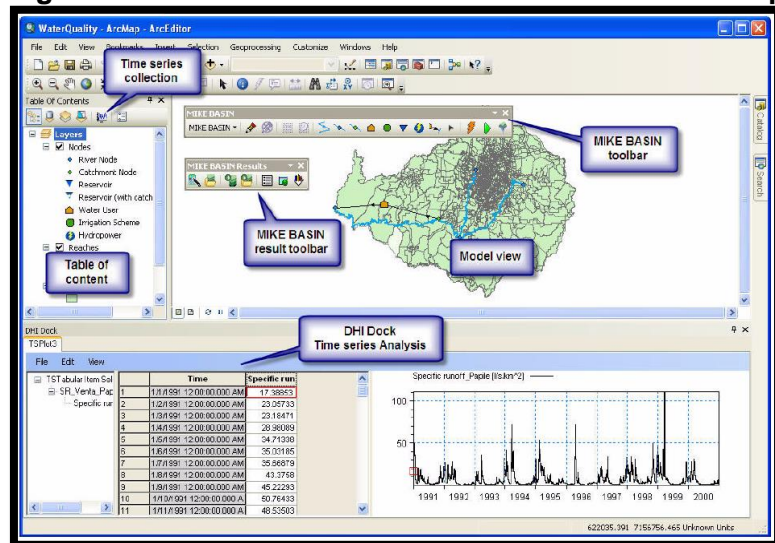
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} + Q_{sz} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde H es la altura de presión hidráulica (m), S_s es el almacenamiento específico (m^3/m^3), Q_{sz} son recargas de flujo puntuales (m^3/s) y k_{xx} , k_{yy} y k_{zz} Son las conductancias hidráulicas (m/s) en los ejes x, y, z , respectivamente.

5.3.12 Modelo MIKE BASIN.

MIKE BASIN es una herramienta de apoyo basada en mapas para la toma de decisiones con respecto a análisis hídricos, planificación y gestión de las cuencas hidrográficas. Permite hacer frente a la asignación del recurso hídrico, el uso en conjunto del agua, la operación de los embalses, o los problemas de calidad del agua, entre otros. MIKE BASIN cuenta con una extensión dentro de ArcGIS (Imagen 14). Las principales áreas de trabajo de MIKE BASIN son: modelados de escenarios de asignación de agua, operaciones de hidroeléctricas o reservorios de agua, modelamiento hidrológico, demanda y evaluación de irrigación, evaluación y modelación de carga de nutrientes y mantenimiento y gestión de series de tiempo (DHI, 2014).

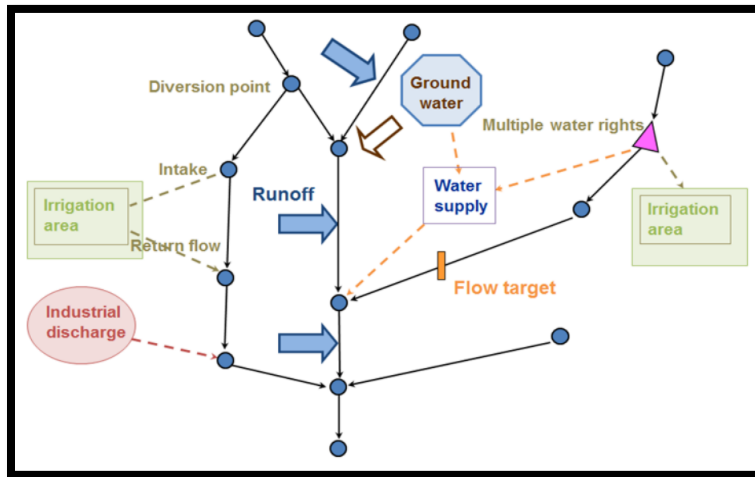
Imagen 14. Interfaz de usuario de MIKE BASIN en ArcMap.



Fuente: DHI (2012), MIKE BASIN User Manual.

En MIKE BASIN el modelo de la cuenca se construye de modo que los ríos y afluentes son representados por tramos y nodos. Además, se pueden insertar otros bloques de construcción en el modelo como nodos del uso de agua, nodos de irrigación, cuencas hidrológicas, centrales hidroeléctricas, canales y embalses (Zdrlewicz, 2013). Este modelo incluye procesos de lluvia-escorrentia, una red fluvial con entradas de captación en diferentes subcuencas, agua subterránea y uso industrial y agrícola del agua (Imagen 15), en donde cada usuario puede definir reglas de uso del agua en su modelación (Butts et al, 2013).

Imagen 15. Esquema sobre la utilización del recurso hídrico en MIKE BASIN.



Fuente: Butts et al (2013), Developing a regional methodology for climate adaptation in the Nile Basin.

Existen también nodos de usuarios del agua que representan las actividades de consumo de agua que se retiran del río o de un depósito. Estos pueden representar diferentes tipos de demandas.

Con respecto a los reservorios como embalses o lagos, en MIKE BASIN se pueden simular mediante tres sistemas: Depósitos, Depósitos con asignación y Lagos. El sistema de depósito se considera como un solo almacenamiento físico y todos los usuarios utilizan el mismo volumen de agua de almacenamiento. En el depósito de asignación se tiene también un almacenamiento físico, pero a cada usuario se ha asignado ciertos derechos de almacenamiento dentro de una zona de los niveles de agua, por lo que no todos los usuarios extraen el mismo volumen de agua. Los reservorios tipo lagos son depósitos específicos para los cuales no se aplican reglas de operación, el flujo de salida de un lago se puede restringir mediante un aliviadero (DHI, 2006).

El submodelo de escorrentía ayuda a calcular la fracción de la precipitación depositada en la zona en forma de escorrentía superficial, es decir, sirve para especificar cómo y cuándo una determinada zona se dispone para regadío. El submodelo de cultivos ayuda al cálculo de la evapotranspiración del cultivo y la evaporación del suelo para los cultivos que utilizan el contenido de humedad del suelo y la evapotranspiración de referencia con el modelo de coeficiente dual del cultivo. El coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) es la relación de la evapotranspiración del cultivo sobre la evapotranspiración de referencia (ET_c/ET_o) se asume como constante en las etapas iniciales y medias y considerado a seguir una variación lineal entre las etapas. La profundidad de las raíces (R) determina la profundidad de la que el cultivo puede extraer el agua y se supone que alcanza la profundidad máxima (R) al comienzo de

la etapa intermedia (Jaiswal et al, 2014). La variación entre la profundidad inicial y la profundidad máxima se determina por la ecuación 27. :

$$R = \frac{(K_{cb} - K_{cb,ini})}{(K_{cb,mid} - K_{cb,ini})} (R_{max} - R_{min}) + R_{min} \text{ (Ec. 27)}$$

Donde $K_{cb,ini}$ - coeficiente basal inicial, R_{min} y R_{max} - profundidad mínima y máxima de las raíces, respectivamente y $K_{cb,mid}$ - coeficiente basal del cultivo en la etapa media.

El submodelo de evapotranspiración de referencia (ET) es responsable de proporcionar al submodelo de cultivos la evapotranspiración de referencia en cada paso de tiempo de la simulación. Las tasas de evapotranspiración o bien pueden ser calculados en base a la entrada del Submodelo climático, o proporcionados directamente como series de tiempo. El modelo de ET se basa en la ecuación de Penman-Monteith la cual se representa por la ecuación 28.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \text{ (Ec. 28).}$$

Donde ET_0 - evapotranspiración de referencia (mm/día), R_n - radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²día), G - flujo de energía en forma de calor del suelo (MJ/m²día), T - temperatura del aire a 2 metros de la superficie del suelo (°C), u_2 - velocidad del viento a 2 metros de la superficie del suelo (m/s), e_s - presión de vapor de saturación (KPa), e_a - presión de vapor actual (KPa), $e_s - e_a$ - déficit de vapor de saturación (KPa), Δ - pendiente de la curva de presión de vapor (KPa/°C) y γ - constante Psicométrica (KPa/°C).

6. METODOLOGÍA

6.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Para la caracterización física y morfométrica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo, primero se digitalizó en ArcGIS versión 10.2.2 el mapa 110-II-A a escala 1:25000 de la zona de estudio aportado por Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) utilizando el sistema de coordenadas MAGNA Colombia Bogotá. Se obtuvieron las curvas de nivel con las cuales se creó el modelo de elevación digital del terreno (DEM). Posteriormente, se generó el polígono de la microcuenca usando las herramientas disponibles en ArcToolbox en la opción Spatial Analyst Tools – Hydrology. Además, se corroboró el DEM creado comparándolo con dos DEM obtenidos de diferente forma, el primero mediante el uso en conjunto de Google Earth-GlobalMapper-AutoCad y el segundo a partir de la página web: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>. Por último, se hallan los parámetros físico y morfométricos mediante el uso en conjunto de ArcGIS y Excel.

Para la elaboración de la curva hipsométrica se realizó el siguiente procedimiento: Mediante la herramienta reclassify, ubicada en ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Reclass. Se clasificó el DEM en formato Raster de la microcuenca Q. El Bobo en 20 intervalos usando el método de Equal Interval. Posteriormente, en Spatial Analyst Tools se seleccionó la opción Zonal y luego la herramienta Zonal Statistics as Table con la cual se obtuvo la información del área entre curvas de nivel de la microcuenca, esta información se copió a Excel y se graficó la curva hipsométrica.

El procedimiento usado para hallar el perfil del cauce principal mediante ArcGIS fue el siguiente: se seleccionó la opción Interpolate Shape ubicada en ArcToolbox – 3D Analyst Tools – Functional Surface, con la cual se interpoló el cauce principal. Se seleccionó la opción Profile Graph ubicada en Toolbars – 3D Analyst. Finalmente, se exportaron los datos del perfil del cauce principal a Excel para generar su gráfica correspondiente donde el eje de las abscisas corresponde a la longitud del río y las ordenadas a la altura sobre el nivel del mar.

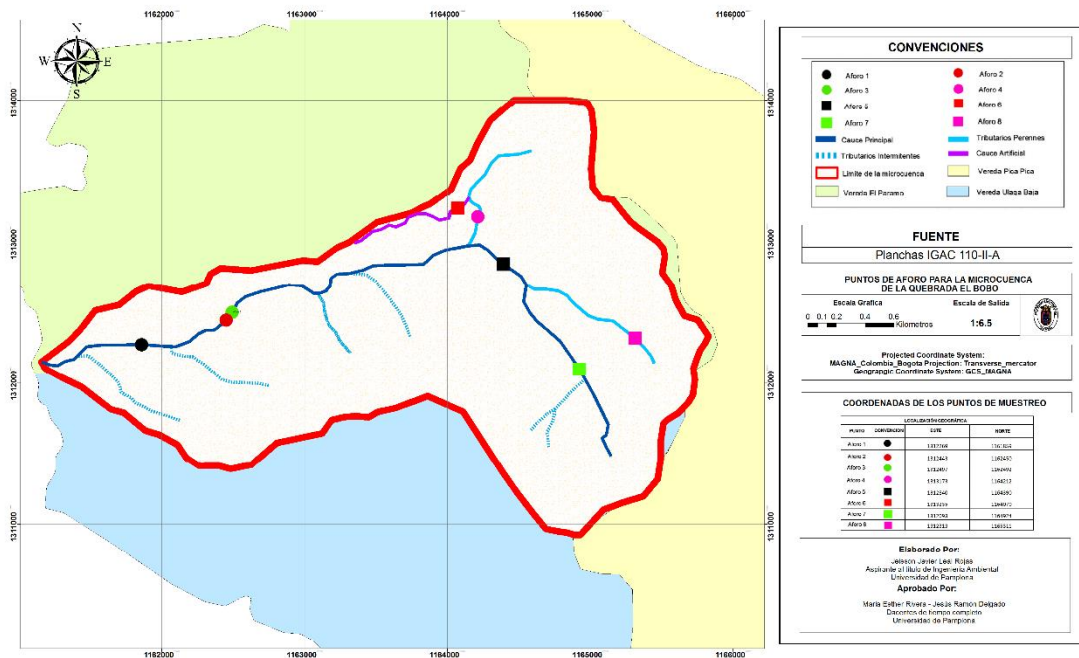
La pendiente media de la microcuenca se obtuvo de la siguiente forma: Por medio de la opción Slope ubicada en ArcToolbox - Spatial Analyst Tools – Surface se obtuvieron los rangos de pendientes en toda la microcuenca, con los que además se generó el mapa de pendientes utilizando la clasificación de la Tabla 2. Seguidamente se interpoló el rango de pendientes obtenido usando la opción Interpolate Shape y finalmente se utiliza la herramienta Zonal Statistics as Table en donde se determinó la pendiente media de la microcuenca. Una vez obtenidos los datos anteriormente mencionados, se determinaron los siguientes parámetros morfométricos siguiendo la metodología expuesta en el marco teórico sección 5.3.1: la altura media, la altitud media, el coeficiente de masividad, el coeficiente orográfico, la orientación de la

microcuenca, la superficie umbral de escurrimiento, la densidad de drenaje, la sinuosidad del cauce principal y la pendiente del cauce principal

6.2 MONITOREO DE CAUDALES Y LÁMINA DE AGUA, SECCIONES TRANSVERSALES, IMPUTACIÓN DE DATOS FALTANTES Y CURVA DE DURACION DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Monitoreo de caudales y lámina de agua. Se seleccionaron los puntos de aforo teniendo en cuenta las recomendaciones plateadas por Bustamante (2006) y la accesibilidad al lugar (Imagen 16). Se midió la lámina de agua mediante el uso de reglas de diferente longitud y el caudal mediante el método volumétrico en cada punto de aforo durante un periodo de 6 meses, de Marzo a Julio y Noviembre del 2015. Para los puntos de aforo 1, 5 y 8 se realizaron mediciones diarias, mientras que para los demás puntos de aforo se realizaron mediciones semanales, esto teniendo en cuenta la accesibilidad a cada punto de aforo. Posteriormente las mediciones se digitalizaron en Excel.

Imagen 16. Puntos de aforo de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Los resultados obtenidos sobre la Imputación de datos faltantes se tuvo en cuenta los datos de la serie mensual multianual de precipitación de la estación meteorológica ISER PAMPLONA 1973-2015 suministrados por IDEAM. Se realizó una imputación de datos faltantes utilizando Solas for missing data analysis (SOLAS) Versión 5.0 para

los datos de precipitación mensual multianual, caudal y lámina de agua, realizando los siguientes pasos:

Inicialmente se accedió al menú, Analyze y multiple Imputation en donde se seleccionó un método de imputación múltiple a usar. Posteriormente se seleccionaron las variables a imputar correspondientes a los meses de Febrero, Marzo, y Noviembre, los demás meses se seleccionaron como covariables fijas. Se seleccionó 5 como el número de imputaciones a realizar. Este procedimiento se realizó para todas las metodologías de imputación múltiple. Después, se realizaron las imputaciones simples, para ello, se accedió a Analyze, Single Imputation. Para el caso del método Group Means se seleccionaron los meses de Febrero, Marzo, y Noviembre como variables a imputar. En la metodología Hot Deck además de seleccionar los meses de Febrero, Marzo, y Noviembre como variables a imputar, se seleccionaron los meses de Enero, abril, Octubre y Diciembre como variables de clasificación dada su proximidad con los meses de datos faltantes y se seleccionó una imputación general al azar. Para finalizar, en la metodología Predictive Mean se seleccionaron las variables a imputar correspondientes a los meses de Febrero, Marzo y Noviembre, los demás meses se asignaron como covariables.

Para las imputaciones de caudal y lámina de agua se realizó el siguiente procedimiento:

- Imputaciones múltiples. Para la imputación de datos faltantes del caudal de cada mes, se seleccionaron los datos de lámina de agua correspondientes a dicho mes y, dado el caso de que se tuviesen datos faltantes en la lámina de agua se seleccionó una imputación Hot Deck para las covariables faltantes. De igual forma se imputaron los datos de lámina de agua. En los casos en donde una de las cinco imputaciones realizadas resultara negativa se excluyó dicho valor.
- Imputaciones Simples. Dada la cantidad de datos faltantes (36%), las metodologías de imputación Simple no se utilizaron.

Finalmente, se obtuvo un registro completo de los datos de la serie mensual multianual de precipitación, de caudal y de lámina de agua y se aplicó un análisis estadístico descriptivo, pruebas de bondad de ajuste Chi-Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, distribución de probabilidad y análisis de frecuencia.

Para la obtención de la Curva de duración de caudales se seleccionaron 3 puntos de aforo (Aforo 1, 5 y 8; Imagen 16) ubicados en la zona baja, media y alta de la microcuenca para la elaboración de las curvas de duración y finalmente, se calcularon los caudales medios mensuales, el caudal máximo y mínimo para cada punto de aforo.

6.3 CURVAS IDF, HIETOGRAMA Y HIDRÓGRAMA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Mediante la función de distribución de probabilidad de valor extremo de Gumbel y la precipitación máxima probable en 24 horas se elaboraron las curvas IDF de la microcuenca de la Quebrada el Bobo realizando el siguiente procedimiento:

Se realizaron las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrado para el registro de precipitación mensual multianual de la estación meteorológica ISER PAMPLONA con un registro de 42 años (1973- 2015). Luego, se ubicó la precipitación máxima mensual multianual para cada año del registro, posteriormente, se obtuvo el análisis descriptivo de los serie histórica de los datos y por último, la probabilidad de ocurrencia para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años; se halló la precipitación máxima (mm) y la intensidad de la lluvia (mm/h) para tiempos de duración de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, y 24 horas teniendo en cuenta los coeficientes de las duraciones establecidas por Campos (1978).

Con base en los parámetros anteriores y la ecuación para el cálculo de intensidades máximas de Bernand, se realizó un cambio de variable para la ecuación 5 ($d = KT^m$) y posteriormente regresiones potenciales para cada periodo de retorno y los términos de constante de regresión (d) obteniendo los valores de K , m y n . Finalmente, se graficaron las Curvas IDF teniendo en cuenta la ecuación determinada anteriormente, las duraciones y los periodos de retorno seleccionados.

Para la obtención hidrógramas se hallaron los parámetros y se graficó el hidrógrama unitario sintético de Snyder, el hidrógrama triangular del "U.S Bureau reclamation" y el hidrógrama triangular de Témez utilizando las ecuaciones 8a, 8b, 8c, 8d, 9a, 9b, 9c, 10a, 10b, 10c y 10d mencionada en el marco teórico

Hietograma, se aplicó en método de bloques alternos por medio de la ecuación característica de las curvas IDF de la microcuenca se halló la intensidad de precipitación para tiempos de duración de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 minutos y periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años (RAS, 2000). Después se halló la precipitación acumulada, la precipitación diferida y la intensidad parcial con una duración de tormenta de una hora, esto último teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los tiempos de concentración y los hidrógramas. Se reordenaron los valores de precipitación de forma que la precipitación e intensidades máximas queden ubicadas en el centro. Posteriormente, graficaron los hietogramas de precipitación y la distribución de intensidades para los diferentes periodos de retorno.

6.4 RECOPIACION DE ANALISIS FISICOQUIMICOS Y MICROBIOLOGICOS DEL AGUA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Se recopiló la información de los análisis químicos realizados por el laboratorio Agrosoilab para la microcuenca de la Quebrada El Bobo, correspondientes a cinco puntos de muestreo. Además, se recolectaron también análisis de Coliformes totales y *Escherichia Coli* llevados a cabo por Empopamplona, realizados en los mismos puntos de muestreo seleccionados por el laboratorio Agrosoilad. Finalmente, los resultados se digitalizaron en Excel y se realizaron sus respectivos análisis.

6.5 INDICE DE ESCASEZ DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Se calculó el índice de escasez con base en la resolución 865 del 2004. Para la oferta hídrica se utilizó el caudal medio puntual; el factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica se calculó siguiendo la tabla propuesta por Costa et al (2005). Tanto en la oferta como en la demanda se usaron valores promedio. Los datos utilizados corresponden al periodo de medición de caudales (periodo de Estiaje). Este proceso se realizó para los puntos de aforo 1, 5 y 8.

6.6 GEOLOGÍA CARACTERÍSTICA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Se realizaron salidas de campo en donde se constató la veracidad de los mapas geológicos de la zona de estudio, se realizó una descripción y se analizó la litología de cada zona de la microcuenca y determino a que unidad litológica pertenecía. Posteriormente se elaboró un mapa en ArcGIS teniendo en cuenta la litología y las zonas de depósitos de la microcuenca.

6.7 GRANULOMETRIA DE LA RED FLUVIAL DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO

Se tomaron 7 muestras de la red fluvial de la microcuenca siguiendo la metodología para un muestreo superficial planteada por García y Martín (2001). Posteriormente las muestras fueron secadas y tamizadas con la serie de tamices de ensayo estándar Americano ASTM E-11 NTC 32 2002 números 4, 8, 16, 20, 30, 50, 60, 80, 100 y 200. Finalmente, se graficaron las curvas granulométricas para cada muestra utilizando una escala Log-normal y se hallaron los diámetros característicos D_{10} , D_{50} y D_{90} .

6.8 MODELO UNIDIMENSIONAL MIKE 11

El modelo se desarrolló por medio de los siguientes pasos:

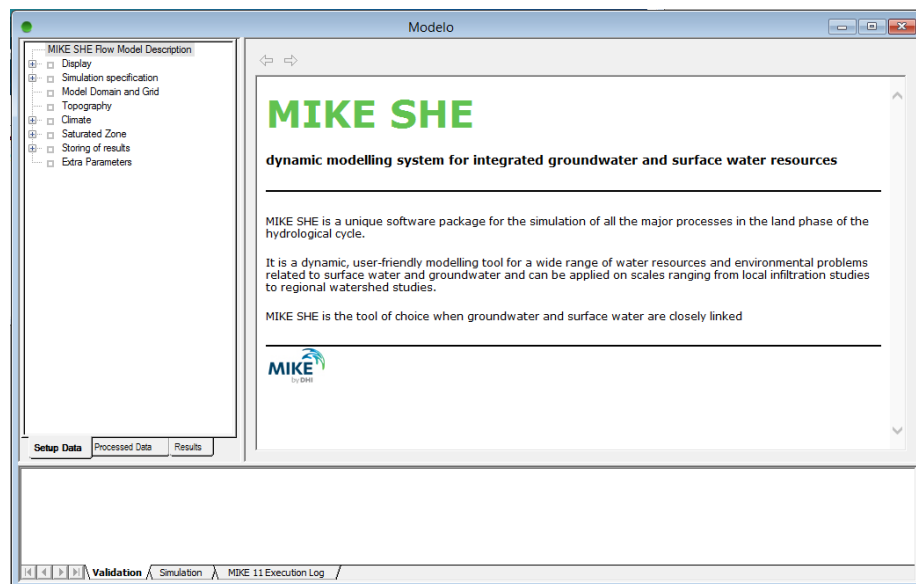
1. Se ingresó al River Networking y se seleccionó el área de protección del mapa.
2. Se digitalizaron los puntos que representan la red fluvial y luego se unieron mediante la herramienta Define Branch.
3. Se importó el archivo formato Shape y una imagen satelital de la microcuenca.
4. Se accedió al editor Cross Sections en donde se ingresó las secciones transversales de la red fluvial tomadas en campo.
5. Se añadió las series de tiempo de Caudal y lámina de agua medidas a lo largo de la red fluvial correspondientes a los meses de toma de datos.
6. Se agregó el módulo Hidrodinámico (HD) dentro del modelo.
7. El modelo se introdujo dentro del módulo simulation para su posterior simulación.

6.9 MODELO HIDROLOGICO MIKE SHE.

El modelo de se llevó acabo por medio del siguiente procedimiento:

1. Se ejecutó el modelo MIKE SHE con cada una de las componentes disponibles dentro del mismo (Imagen 17)

Imagen 17. Modelo Hidrológico MIKE SHE.



Fuente: Leal J, 2016.

2. Se añadió la microcuenca en formato shape, su imagen satelital y su red de drenaje obtenida en la simulación de MIKE 11 dentro de la opción Display de MIKE SHE y se seleccionó el periodo de modelación correspondientes a las series de tiempo de Caudales ingresados dentro de MIKE 11.
3. Mediante el formato shape de la microcuenca se definieron los límites del modelo, en la opción Model Domain and Grid.
4. Se creó un Modelo de Elevación Digital (DEM) tipo Vectorial mediante un DEM tipo Raster utilizando la herramienta Extract values to Points de ArcGIS.
5. El DEM tipo Vectorial se introdujo como la topografía dentro de MIKE SHE y se le aplicó un proceso de interpolación bilinear.
6. Se añadieron datos promedios diarios mensuales de Precipitación, Evapotranspiración y Temperatura dentro del componente climático.
7. Se levantó un mapa con la información de cobertura vegetal de la microcuenca según las pautas establecidas por el documento número 56 de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), teniendo en cuenta la distribución espacial de las diferentes especies de plantas, los cultivos dentro de la microcuenca, las zonas de pastizales, las zonas arborizadas y las zonas sin intervención antrópica. La recolección de las muestras siguió el procedimiento planteado por Cabezas et al (2009) para la determinación del índice de área foliar (IAF). Se tuvo en cuenta la información del IAF, la profundidad de las Raíces y los Coeficientes únicos promedios de los cultivos según su etapa (Kc) citados por FAO 56 (2006), Almorox (2007), Donald y George (2007), Warnock et al (2006), Calvo et al (2005) y Barrera et al (2010). Seguidamente, el mapa fue incorporado al módulo Land Use de MIKE SHE con los datos de la vegetación.
8. Los promedios de profundidades de raíces, índices de área foliar, demanda de irrigación y déficit de humedad para cada tipo de cultivo fueron tomados en campo y luego ingresados en el módulo Land Use de MIKE SHE.
9. Para el módulo de Zona Insaturada se contó con tres metodologías, la primera basada en las ecuaciones de Richards, la segunda basada en el flujo gravitacional y la tercera basada en un balance hídrico (Yan y Smith, 1994) y denominada Método Two Layer UZ. Se seleccionó el Método Two Layer UZ el cual trabaja en acople con las ecuaciones de evapotranspiración postuladas por Kristensen y Jensen (1975) y por ende más robusta en comparación a la metodología basada en el flujo gravitacional. Para el caso de las ecuaciones de Richards se necesitaban realizar estudios mucho más afondo (perforaciones superficiales, balance de masa del flujo subsuperficial, gradientes de humedad, direcciones de los flujos, alturas piezométricas, entre otras) por lo que no se pudo optar por esta metodología.
10. Se determinó el punto de saturación del suelo (PS), la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchites (PM) para los suelos de la microcuenca. Se llevó a cabo la metodología Planteada por García et al (2012) para la determinación del PS y la CC, seleccionándose 7 diferentes puntos de muestreo dentro de la microcuenca. El PM se calculó con la ecuación planteada por Silva et al (1998).

Posteriormente, los resultados obtenidos se agregaron al modelo MIKE SHE en formato .dfs2 (formato propio del software dentro del módulo de Zona Insaturada).

11. Para el caso del módulo de Zona Saturada de MIKE SHE se seleccionaron los parámetros por defecto del modelo dado la falta de información geológica, geotécnica, el tiempo para la realización de dichos estudios y los costos de los mismos.

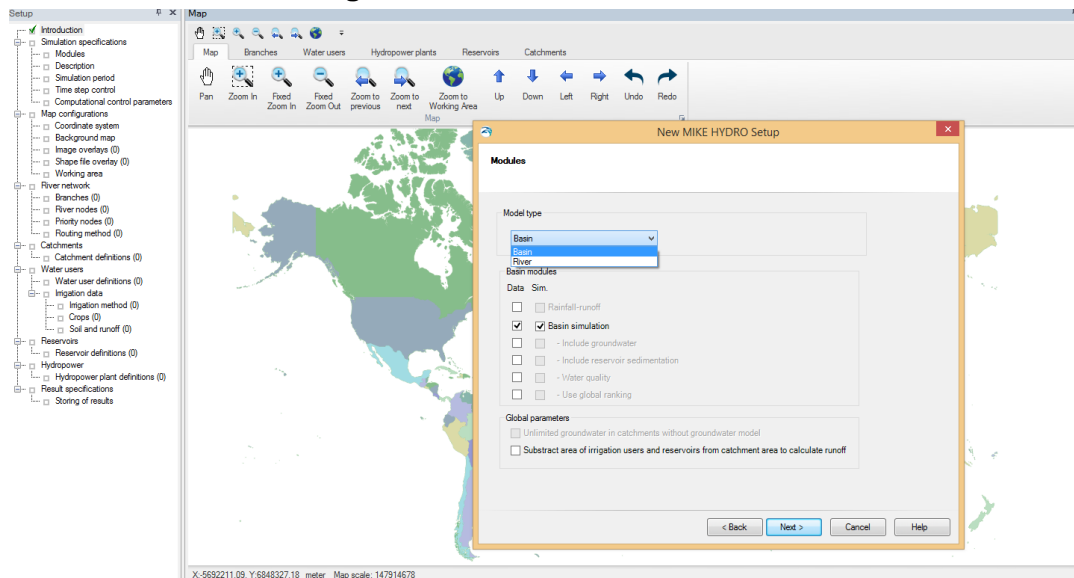
12. Finalmente, se realizó un reprocesamiento y la simulación de los datos introducidos dentro de MIKE SHE.

6.10 MODELO MIKE BASIN

El procedimiento llevado a cabo para la elaboración del modelo fue el siguiente:

1. Se ingresó al archivo con extensión .mhydro y se abrió el modelo MIKE BASIN seleccionándose Basin como el tipo de modelación (imagen 18).

Imagen 18. Pantalla de inicio de MIKE BASIN.



Fuente: DHI elaborado por Leal J, 2016.

2. Se configuraron las especificaciones de simulación y las configuraciones del mapa con respecto a las características e información de la zona de estudio, agregando sus coordenadas, shapes, DEM y periodo de modelamiento correspondiente.
3. Se agregó la red hídrica al modelo MIKE BASIN en la opción River Network
4. Se dividió de la microcuenca en diferentes secciones teniendo como base los puntos de confluencia de la red fluvial.

5. Se realizó la distribución hídrica teniendo en cuenta los cultivos y los usuarios del recurso hídrico de la microcuenca mediante el módulo Water users de MIKE BASIN.
6. La microcuenca no cuenta con centrales hidroeléctricas ni con reservorios por lo que estos no fueron incluidos en el modelo.
7. Se realizaron los respectivos análisis.

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

Mediante la metodología empleada en la sección 5.3.1 del Marco Teórico se obtuvieron las características morfométricas básicas y las características de la red de drenaje de la microcuenca de la Quebrada El Bobo (Tablas 7 y 8).

Tabla 7. Características Morfométricas de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

PARAMETRO	RESULTADO	SÍMBOLO	UNIDAD
Área	6.90	A	Km ²
Perímetro	13.08	P	km
Longitud axial	4.64	La	km
Longitud del cauce principal	5.30	Lp	km
Ancho máximo de la cuenca	3.1	Anmax	km
Área de la vertiente mayor	0.835	AVmax	Km ²
Área de la vertiente menor	0.31	AVmin	Km ²
superficie del rectángulo	14.384	S	Km ²
Ancho promedio	0.670833122	Anpro	Km ²
Factor forma	0.144576104	Ff	---
Coeficiente compacidad (kc)	1.402978676	Kc	---
Índice de alargamiento (Ia)	1.496774194	Ia	---
Índice de homogeneidad (Ih)	0.48086571	Ih	---
Índice asimétrico (Ad)	2.693548387	Ad	---
Coeficiente de Masividad	356.0160	Cm	---
Coeficiente Orográfico	874557.0778	Co	---
Orientación de la Microcuenca	Este-Oeste	O	---
Volumen de la Microcuenca	16949.92245	V	Km ³
Altura Media	2456.511	Am	m

Fuente: Leal J, 2016.

Tabla 8. Características Morfométricas de la Red de Drenaje.

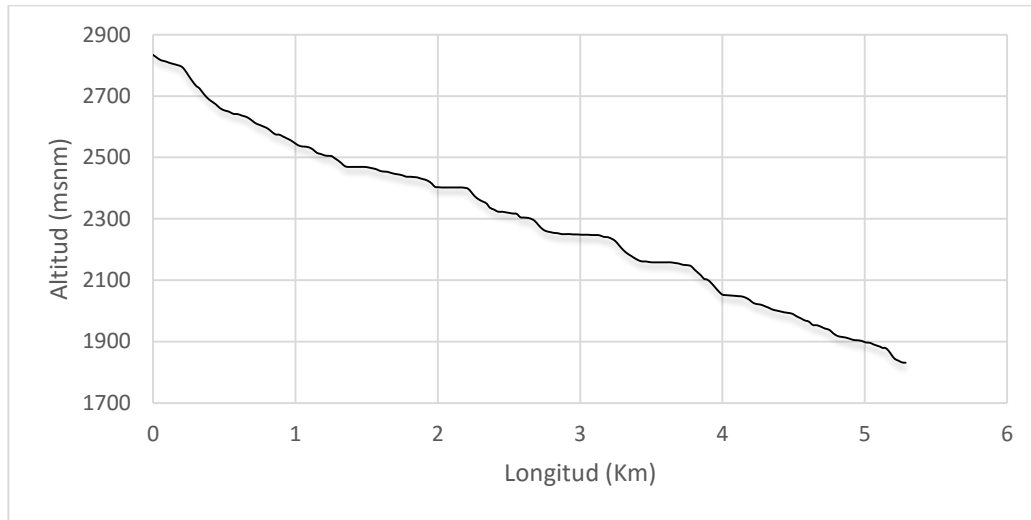
PARAMETRO	RESULTADO	SÍMBOLO	UNIDAD
Frecuencia de talwegs (Fx)			
Primer orden	1.3043	Fx1	km/km ²
Segundo orden	0.1449	Fx2	km/km ²
Promedio de frecuencia de talwegs	0.7246	Fxpro	
Sinuosidad del cauce principal	1.06639839	Sn	---
Superficie Umbral de Escurrimiento	2.626785107	A _o	km ²
Orden de ríos			
Longitud de Talwegs de Primer orden	6.023	T1	km
Longitud de Talwegs de segundo orden	4.69	T2	km
Total	10.713	Tt	km
Ley de Densidad de Drenaje	1.55261	Dd	Km/km ²
Ley de longitud media de los ríos			
Primer Orden	0.6692	Lm1	km
Segundo Orden	4.69	Lm2	km
Relación de longitud 2 Vs 1	4.7	rL	---
Ley de Horton Numero de Ríos			
Relación de confluencia 1 VS 2	3.0	Rb	---

Fuente: Leal J, 2016.

De la tabla 7 y 8 se infiere que la microcuenca es alargada y presentó una forma oval oblonga indicando baja tendencia a las crecidas. Además, el coeficiente de masividad evidencio que la microcuenca es montañosa y pequeña, corroborándose con el coeficiente orográfico, indicando el potencial de erosión de la cuenca. De acuerdo a Henao (1998). La densidad de drenaje es de 1.55, la cual indica posibles materiales geológicos disgregables, suelos relativamente impermeables y leve cobertura vegetal, que a su vez indica también el potencial erosivo de la microcuenca. La red de drenaje reveló una cuenca poco jerarquizada y con un patrón de drenaje de tipo dendrítico. Los resultados indicaron una recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca.

En la Imagen 19 se observa el perfil longitudinal del cauce principal junto con una pendiente elevada a lo largo del cauce (pendiente media del 43%), la cual corrobora el potencial erosivo de la microcuenca y su relieve montañoso.

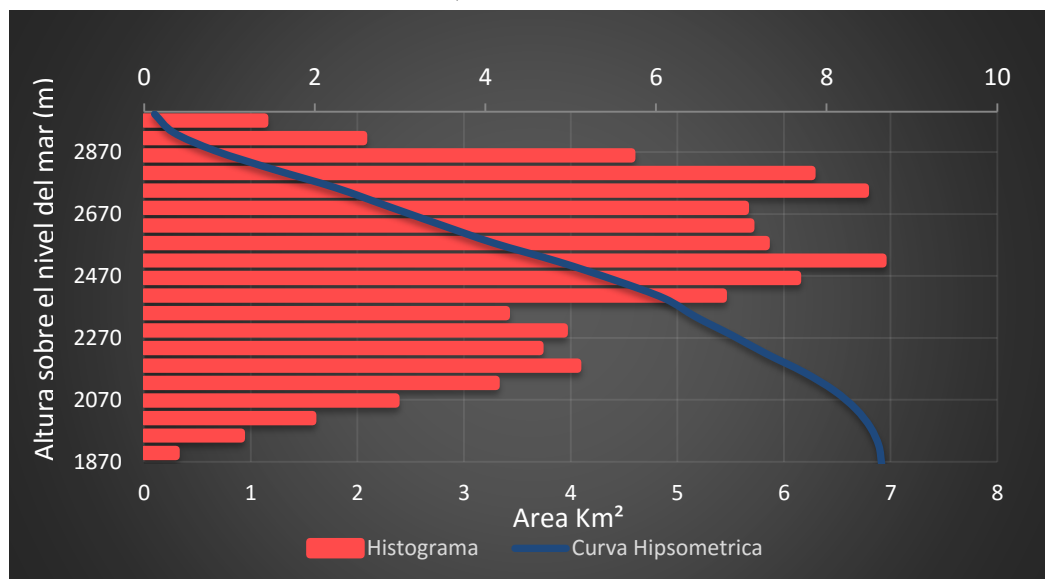
Imagen 19. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuenca de la Quebrada EL Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Teniendo en cuenta la curva hipsométrica para la microcuenca de la Quebrada El Bobo (Imagen 20) se infiere que la microcuenca se encuentra en una fase de desequilibrio (edad joven) en donde los procesos erosivos inciden en un mayor grado a comparación de los procesos sedimentológicos, esto reafirma los resultados obtenidos de las demás características morfométricas mostrando una microcuenca montañosa muy propensa a la erosión. Parámetros como la curva hipsométrica, la pendiente, la densidad de drenaje y los coeficientes de masividad y orográficos revelan una alta capacidad erosiva y una tendencia a las crecidas en la microcuenca.

Imagen 20. Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes para la Microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Los resultados de los tiempos de concentración (t_c) se aprecian en la tabla 8. Aunque la ecuación de California Culverts Practice fue desarrollada a partir de la ecuación de Kirpich y es utilizada para pequeñas cuencas montañosas como lo es la zona de estudio (Chow et al, 1994), Teméz (2003) teniendo en cuenta que dichas ecuaciones se utilizan para cuencas urbanas, no rurales. Vélez y Botero (2010) recomiendan la utilización de diferentes ecuaciones de tiempo de concentración para obtener una mejor aproximación. En este caso, se escogió como tiempo de concentración el promedio (48.41 minutos) de las metodologías propuestas en la tabla 3 (ver apartado 5.3.1 del Marco Teórico). Para el caso de la ecuación propuesta por Venturas-Heras no se cumplió la condición de alejamiento medio (a) por lo cual esta ecuación no se utilizó.

Tabla 9. Tiempos de concentración según varios autores.

Autor	Tiempo de concentración minutos (t_c)
Kirpich	20.31
California Culvert Practice	26.05
Passini	32.61
Ventura-Heras	No aplica
Giandotti	28.82
Clark	80.87
Témez	74.88
Bransby-Williams	75.34

Fuente: Leal J, 2016.

7.2 MONITOREO DE CAUDALES Y LAMINA DE AGUA, SECCIONES TRANSVERSALES, IMPUTACION DE DATOS FALTANTES Y CURVA DE DURACION DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL BOBO.

7.2.1 Imputación de datos faltantes.

Los resultados de las imputaciones de los datos faltantes de precipitación (mm) de la serie mensual multianual de precipitación (1973-2015) de la estación ISER PAMPLONA se observan en la tabla 10. En la tabla 10 se presenta un valor promedio de las 5 imputaciones realizadas para cada una de las imputaciones múltiples.

Tabla 10. Imputaciones simples y múltiples para los datos faltantes de precipitación.

Año - Mes	Group means	Hot Deck	Predicted mean imputation	Predictive Model Based In MI	Propensity Score Method	Predictive mean matching method	Mahalanobis Method	Combo *
1984 - FEBRERO	12.17	6.00	10.19	8.60	9.22	7.67	8.29	8.97
1976 - MARZO	19.82	22.40	30.21	26.15	40.64	23.06	24.6	17.28
1987 - MARZO	19.82	22.40	23.33	23.80	22.8	38.84	28.42	26.08
1995 - NOVIEMBRE	25.51	18.00	33.09	28.10	26.83	20.53	20.11	34.21

* El método Propensity Score/Predictive Mean/Mahalanobis Distance Combination Method se abrevio como Combo.

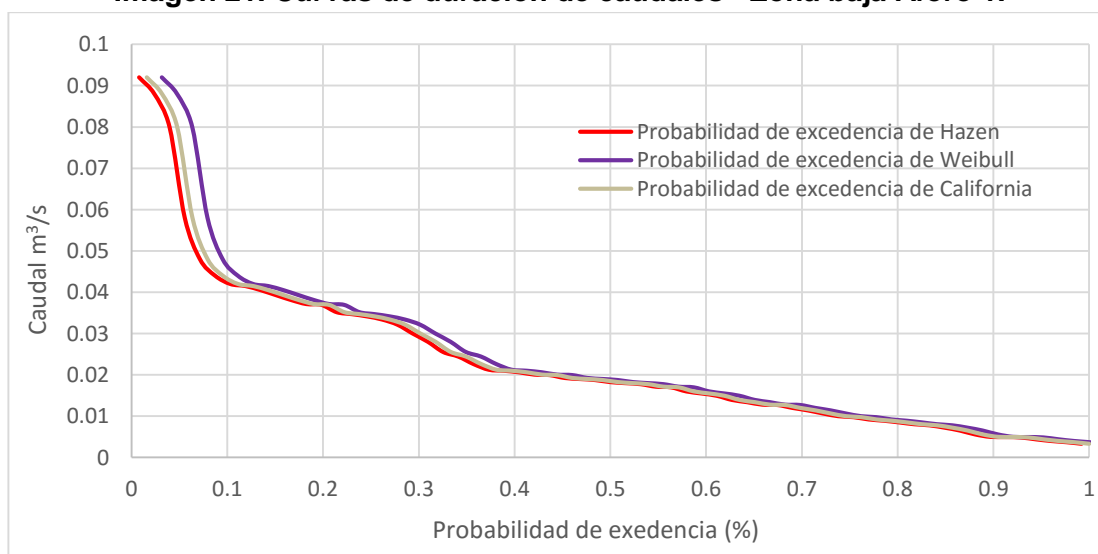
Fuente: Leal J, 2016.

De igual manera, se obtuvieron los datos faltantes de caudal y lámina de agua para todos los puntos de aforo durante los meses de Marzo a Julio del 2015, se promediaron los valores arrojados por las imputaciones múltiples para los caudales y lámina de agua. Finalmente, para obtener el registro completo de precipitación mensual multianual, de caudal y lámina de agua, se imputo el dato faltante como el valor promedio obtenido de todas las metodologías de imputación utilizadas.

7.2.2 Curva de Duración de Caudales de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

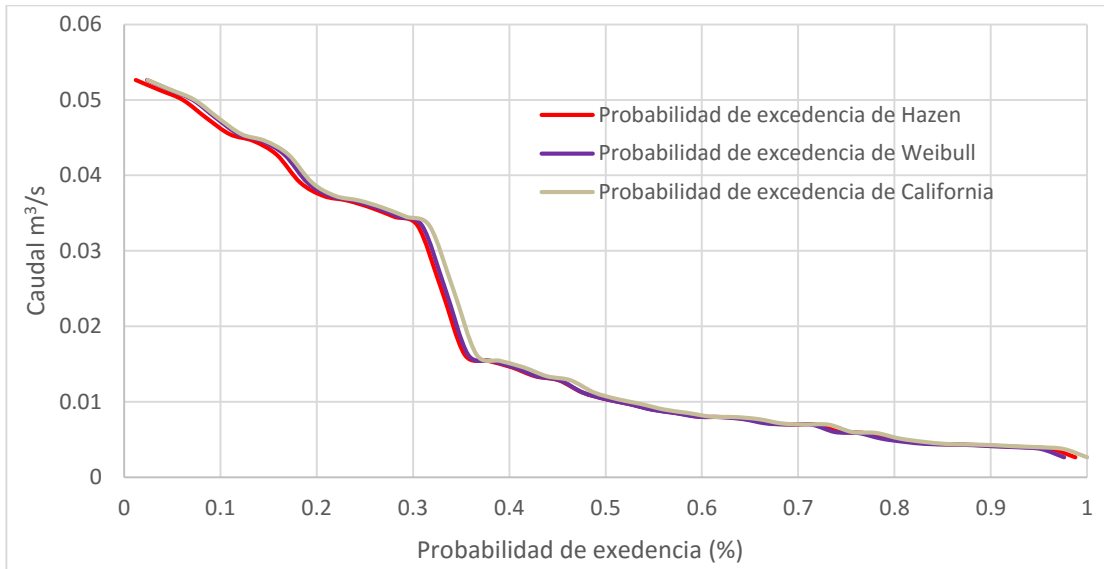
Las curvas de duración obtenidas para el punto de aforo 1, 5 y 8 mediante las probabilidades de excedencia de Hazen, Weibull y California (Tabla 4, Apartado 5.3.3 del Marco Teórico) para las zonas baja, media y alta de la microcuenca se muestran en las imágenes 21, 22 y 23. Las curvas de duración no presentan diferencias en la zona baja, media y alta de la microcuenca al momento de utilizar cualquiera de las tres probabilidades de excedencia.

Imagen 21. Curvas de duración de caudales - Zona baja Aforo 1.



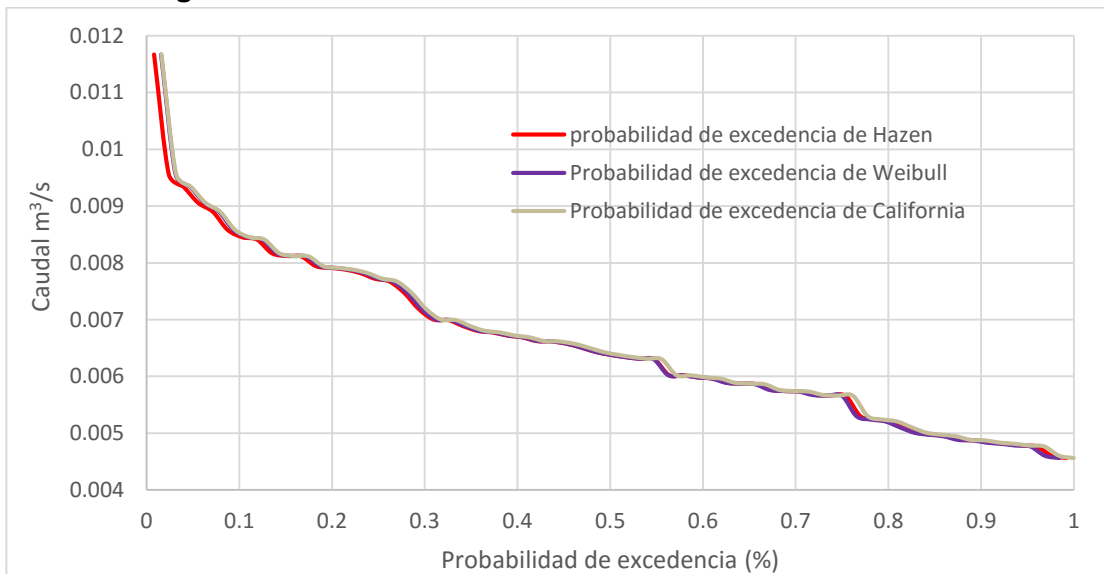
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 22. Curva de duración de caudales - Zona media Aforo 5.



Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 23. Curva de duración de caudales - Zona alta Aforo 8.



Fuente: Leal J, 2016.

Se observó que la pendiente empinada de las curvas de duración correspondientes al aforo 8 indican en su mayoría un aporte de escurrimiento directo, mientras que las pendientes del punto de aforo 1 y 5 revelaron almacenamiento superficial, lo cual es corroborado por el índice asimétrico de la microcuenca.

En general, se presentó una alta variación de las probabilidades de excedencia con respecto a los caudales medidos en la zona alta de la microcuenca, es decir, para la zona alta de la microcuenca variaciones pequeñas de caudales cambian significativamente la probabilidad de excedencia a diferencia de las zonas media y baja de la microcuenca.

Los caudales igualados o superados el 85% (Q85), 90% (Q90) y 95% (Q95) correspondientes a la zona baja, media y alta de la microcuenca son respectivamente 8, 5.5 y 4.8 L/s para el aforo 1; 5, 4.3 y 3.8 para el aforo 5 y 5, 4.88 y 4.7 para el aforo 8, estos reafirman la alta variación de la probabilidad de excedencia para el aforo 8 (zona alta) con respecto a los aforos 1 y 5 (zona baja y media, respectivamente).

Con respecto al promedio más o menos desviación estándar ($\bar{x} \pm S$), caudal máximo (Q_{Max}) y mínimo (Q_{min}) aplicado al caudal de los puntos de aforo (análisis estadístico descriptivo), se observó una alta variación en los caudales para los puntos de aforo 1, 2, 3 y 5 (puntos de aforo más cercanos de la desembocadura), mientras que para los puntos de aforo 4, 6, 7 y 8 (puntos de aforo más alejados de la desembocadura) la variación es menos notoria (Tabla 11).

Los Caudales Ecológicos obtenidos mediante el caudal promedio mensual fueron 4.7, 3.0 y 1.7 L/s para el Aforo 1, 5 y 8, respectivamente.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos básicos para cada punto de aforo.

Puntos de aforo	$\bar{x} \pm S$	Q_{Max}	Q_{min}
Aforo 1	18.76 \pm 14.89	92.00	3.33
Aforo 2	33.40 \pm 12.64	60.00	25.00
Aforo 3	49.76 \pm 9.77	73.00	43.00
Aforo 4	3.27 \pm 4.74	18.20	0.43
Aforo 5	11.87 \pm 11.88	52.63	2.65
Aforo 6	8.76 \pm 6.62	30.30	4.00
Aforo 7	1.29 \pm 0.44	2.50	0.71
Aforo 8	6.90 \pm 1.58	11.67	4.56

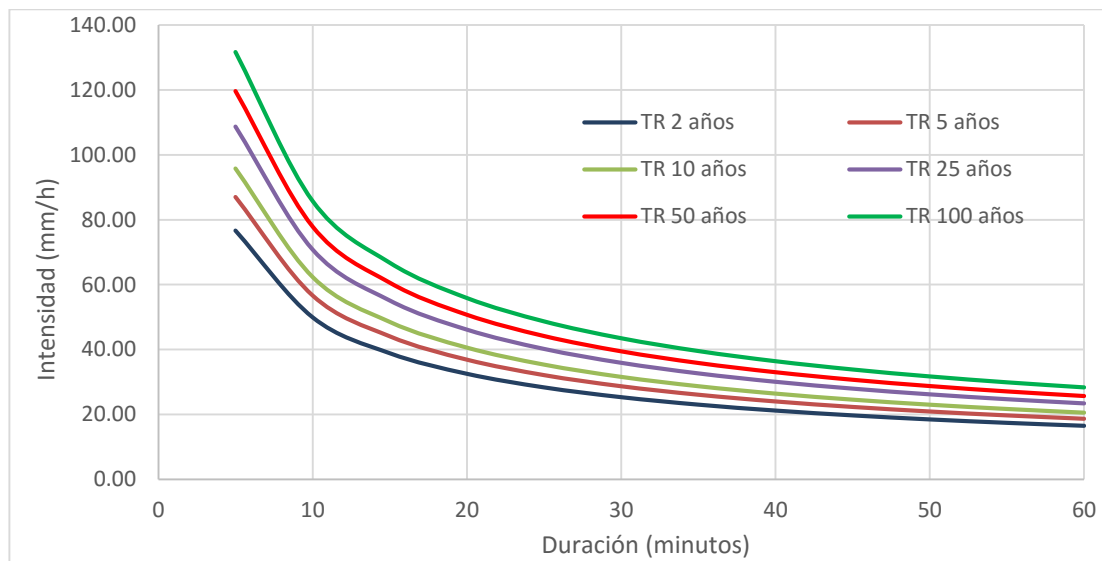
Fuente: Leal J, 2016.

Todos los resultados obtenidos muestran que la capacidad de almacenamiento de la microcuenca aumenta a medida que se desciende a través de la red fluvial, alcanzando su máximo en la desembocadura y por tanto, también aumenta la variación de los caudales, lo cual concuerda con lo expuesto por Gómez (1999).

7.3 Curvas IDF de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Se obtuvo el coeficiente de regresión n mediante la primera regresión potencial para cada periodo de retorno, cuyo valor promedio fue - 0.6188 y los parámetros K y m de 188.612 y 0.1383 mediante una segunda regresión potencial, Finalmente, se graficaron las curvas IDF para periodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50, 100 años (Imagen 24).

Imagen 24. Curvas IDF de la Estación ISER PAMPLONA para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



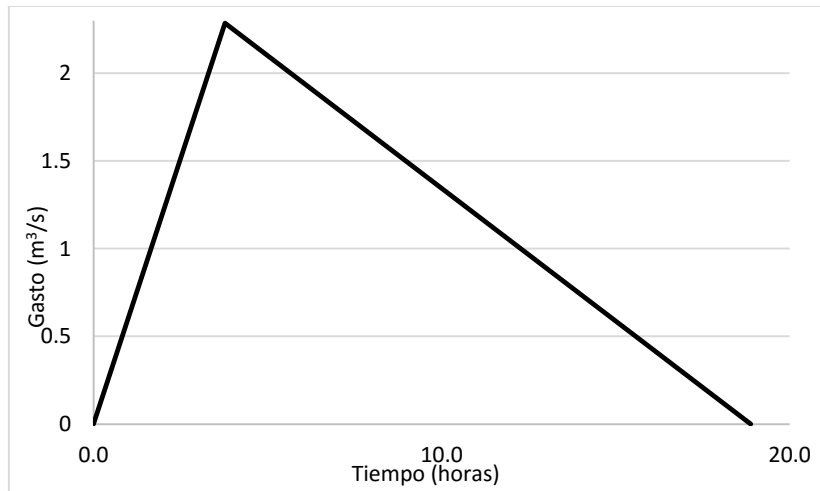
Fuente: Leal J, 2016.

A medida que disminuye la duración de la tormenta aumenta la intensidad de la precipitación, este comportamiento se observa para todos los periodos de retorno en donde su máxima intensidad a los 5 minutos varía entre 76.67mm/h para un periodo de retorno de 2 años y 131.72mm/h para un periodo de retorno de 100 años, respectivamente. Para el caso de una duración de tormenta de una hora las variaciones de intensidad de precipitación varían entre 16.47mm/h para un periodo de retorno de 2 años y 28.30mm/h para un periodo de retorno de 100 años, lo cual concuerda con el comportamiento típico de una tormenta descrito por Chow et al, (1994), Aparicio (1992), Castillo et al (2011) y Gómez (2007).

7.4 Hidrógrama de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

En el Hidrógrama Unitario Sintético de Snyder (Imagen 25) obtenido se aprecia que el gasto máximo producido fue de $2.28 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un tiempo pico de 3.7 horas y un tiempo base de 18.8 horas.

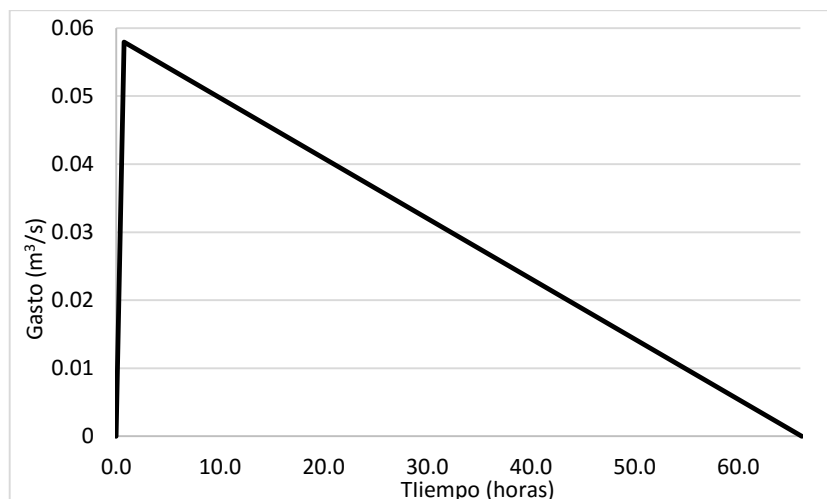
Imagen 25. Hidrógrama Unitario Sintético de Snyder para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

En la imagen 26 se observa el Hidrógrama triangular del "U.S Bureau of Reclamation", del cual se establece que el gasto máximo es de $0.050 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un tiempo pico de 30.5 minutos y un tiempo base fue de 65.46 horas con un tiempo de concentración promedio de 48.41 minutos.

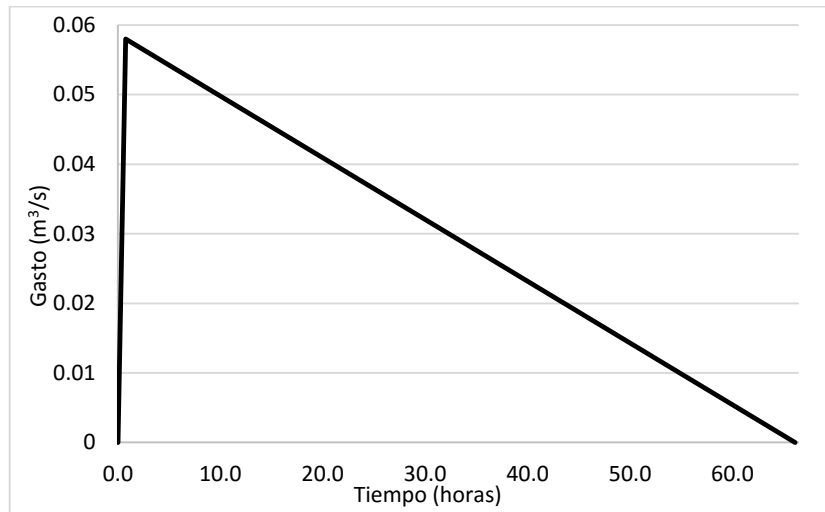
Imagen 26. Hidrógrama Triangular del U.S Bureau of Reclamation para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Para el Hidrógrama triangular de Témez (Imagen 27) el gasto máximo producido por el Hidrógrama Triangular de Témez fue de 0.058 m³/s correspondiente a un tiempo pico de 45.5 minutos y un tiempo base aproximado de 66.1 horas.

Imagen 27. Hidrógrama triangular de Témez para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



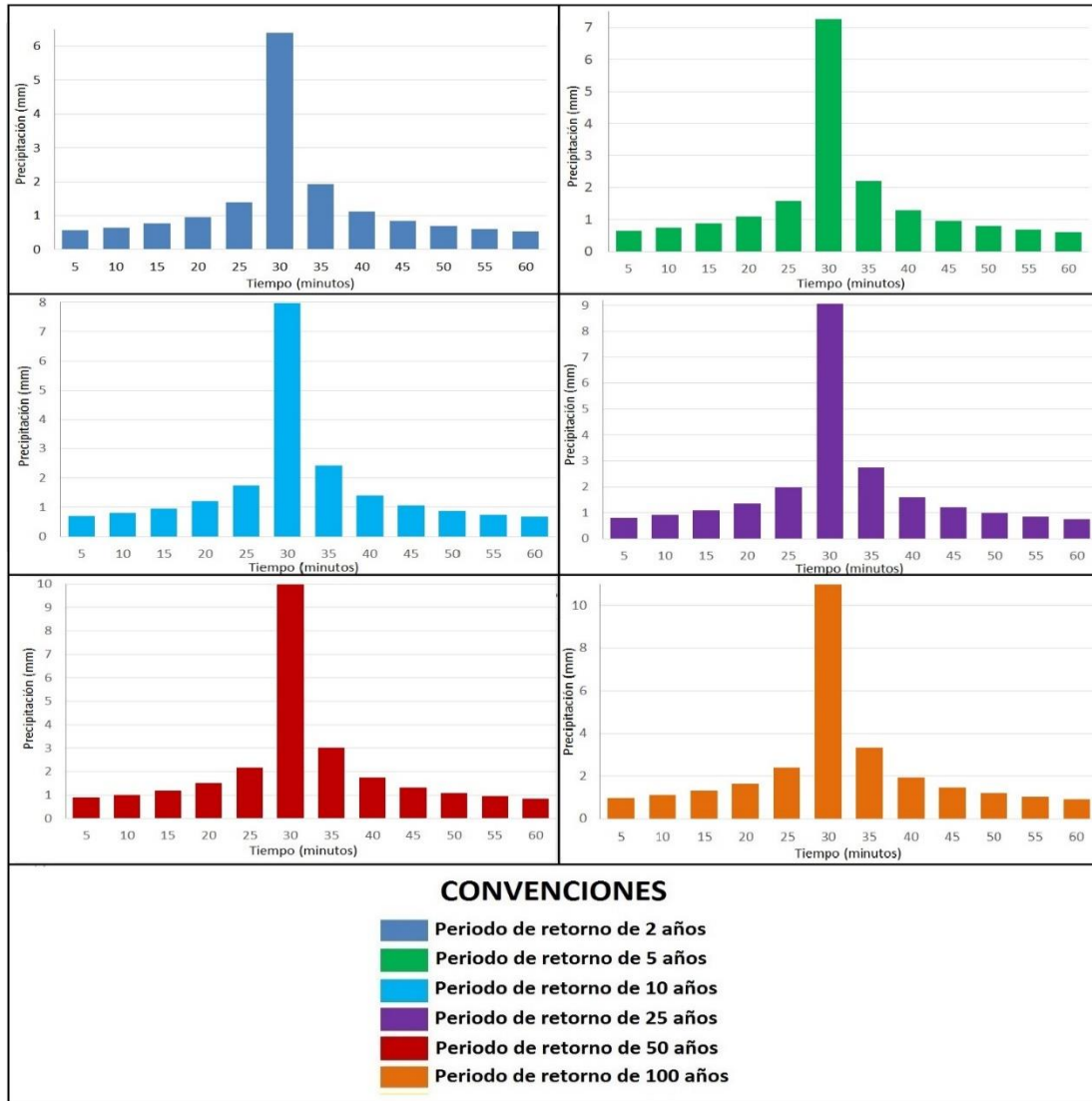
Fuente: Leal J, 2016.

De acuerdo a Puyol y Villa (2006), el tiempo de concentración (t_c) siempre es mayor al tiempo pico (t_p), demostrando que existe una sobreestimación generada por el Hidrógrama Unitario sintético de Snyder, en la presente investigación se obtuvo un $t_c = 48.41$ minutos y $t_p = 3.7$ horas. Para el caso del Hidrógrama Triangular del U.S Bureau of Reclamation y el Hidrógrama Triangular de Témez no se presenta dicha sobreestimación. Además, los registros de caudal en el punto de aforo más cercano a la desembocadura de la microcuenca muestran una sobre estimación del gasto máximo para el Hidrógrama Unitario sintético de Snyder y reafirman la validez del Hidrógrama Triangular del U.S Bureau of Reclamation y el Hidrógrama Triangular de Témez para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

7.5 Hietograma de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Con base en el tiempo de concentración promedio se estimó que el tiempo de duración de tormenta es de 1 hora para los hietogramas con los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50, 100 y 500 años (Imagen 28).

Imagen 28. Hietogramas con diferentes periodos de retorno para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



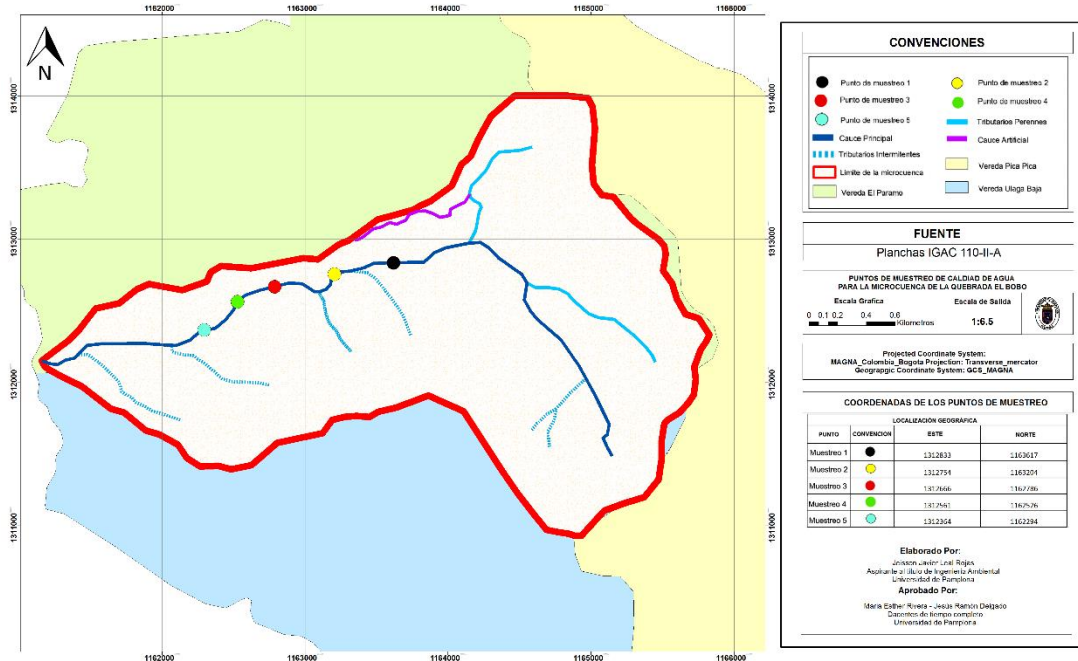
Fuente: Leal J, 2016.

Los hietogramas muestran un aumento de precipitación a medida que el periodo de retorno aumenta. Todos los hietogramas alcanzan su máximo de precipitación al cabo de 30 minutos con una variación máxima de precipitación entre 6.4 mm para un periodo de retorno de 2 años y 10.98mm para un periodo de retorno de 100 años. Esto concuerda con el comportamiento típico de una tormenta descrito por Chow et al, (1994), Aparicio (1992), Castillo et al (2011) y Gómez (2007).

7.6 Recopilación de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

En la Imagen 29 se muestran los 5 puntos de toma de muestra para los análisis químicos del agua de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Imagen 29. Puntos de muestreo de calidad del agua para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los puntos de muestreo realizados por Agrosoillab y Empopamplona. Para ello, se compararon los resultados obtenidos con los parámetros máximos permisibles dentro del decreto 1594 del 1984, la directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable y los estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). No se encontró ningún parámetro químico o físico que esté por encima del valor máximo permisible tanto para el decreto 1594 del 1984, como para las directrices de la OMS y el Reglamento de la EPA, todos estos parámetros se encuentran por debajo o en un rango óptimo. Para el caso de los parámetros microbiológicos se observó todo lo contrario, los parámetros exceden el nivel máximo permisible para el decreto 1594 del 1984, como para las directrices de la OMS y el Reglamento de la EPA las cuales exigen la ausencia de parámetros microbiológicos.

Tabla 12. Análisis de la calidad del agua para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Análisis realizado por laboratorio AGROSOILLAB							
Parametro Evaluado	Punto de muestra 1	Punto de muestra 2	Punto de muestra 3	Punto de muestra 4	Punto de muestra 5	Unidad	Metodología analítica de detección
pH	7.5	7.29	8.18	7.96	7.43	-	Potenciometría - Método interno ME-AGU-003
Conductividad electrica	0.05	0.04	0.25	0.03	0.21	ds/m	Conductivimetría-Método interno ME-AGU-003
Carbonatos	No Detectable	No Detectable	No Detectable	No Detectable	No Detectable	meq CO ₂ /L	Volumetría - Método interno ME-AGU-004
Bicarbonatos	0.26	0.26	1.73	0.02	0.48	meq HCO ₃ /L	Volumetría - Método interno ME-AGU-004
Cloruros	0.22	0.4	0.58	0.12	0.36	meq Cl/L	Volumetría - Método interno ME-AGU-005
Dureza	0.7	0.8	3.2	0.6	2.4	meq CaCO ₃ /L	Volumetría - Método interno ME-AGU-005
Boro	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	ppm	Colorimetría - Método interno ME-AGU-009
Azufre (SO ₄ [*])	0.02	0.2	0.0192	0.02	0.02	ppm	Turbidimetría - Método interno ME-AGU-002
Nitratos (N)	No Detectable	No Detectable	No Detectable	No Detectable	No Detectable	ppm	Cualitativa (Colorimetrías) - Cuantitativa (Kjeldahl) - Método interno ME-AGU-001
Solidos Suspendidos Totales	4.67	22.67	5.33	3.33	4	ppm	Filtración y secado - Metodo interno ME-AGU-009
Bases							
Calcio (Ca)	3.84	3.94	3.56	0.29	6.68	ppm	Fotometría de llama - Norma tecnica NTC 1369
Magnesio(Mg)	2.37	2.45	5.78	2	3.58	ppm	
Sodio(Na)	1.42	2.37	6.51	1.42	4.06	ppm	
Potasio(K)	0.91	0.52	0.75	0.34	0.56	ppm	
Otros Elementos							
Hierro(Fe)	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	ppm	Fotometría de llama - Norma tecnica NTC 1369
Cobre(Cu)	0.01	0.01	0.02	0.1	0.03	ppm	
Manganeso(mn)	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	ppm	
Zinc(Zn)	0.04	0.04	0.08	0.09	0.1	ppm	
RAS (Relación de absorcion de sodio)	0.14	0.23	0.27	0.53	0.31	-	No se especifica
CRS (Carbonato de Sodio Residual)	0	0	0	0	0	meq/L	No se especifica
Análisis Realizado por EMPOPAMPLONA							Valor Máximo Aceptable Agua potable Res. 2115/2007
Coliformes Totales	304	2580	68	109	2830	UFC/100cm ³	0
Escherichia Coli	3	136	2	9	55	UFC/100cm ³	0

Fuente: Leal J, 2016.

7.7 Índice de Escasez de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

En la tabla 13 se muestran los índices de escasez para los puntos de aforo 1, 5 y 8. Según la resolución 865 del 2004 y la OMM (1997), los índices de escasez revelaron una sobre utilización del recurso hídrico en todos los puntos de aforo para la oferta neta en el periodo de estiaje.

Tabla 13. Índices de Escasez para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

UBICAIÓN	ÍNDICE DE ESCASEZ
Zona baja – Aforo 1	77.4
Zona media – Aforo 5	58.29
Zona alta – Aforo 8	73.4

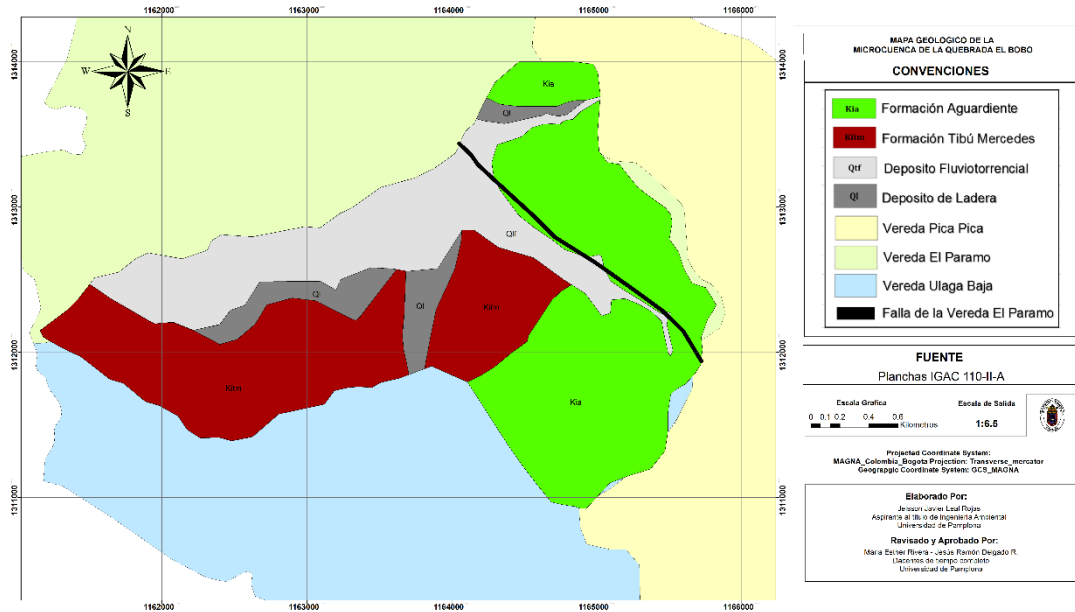
Fuente: Leal J, 2016.

Según el IDEAM (2008), un índice de escasez mayor al 40% genera una fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para intervenir y controlar la oferta y la demanda (caracterizado con el color rojo). Es insuficiente la oferta hídrica para atender la alta demanda de agua por los sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requieren fuertes inversiones económicas para mejorar la eficiencia en la utilización del agua en los sectores productivos y en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

7.8 Geología característica de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

En la imagen 30 se observa el mapa geológico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Imagen 30. Mapa Geológico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

La microcuenca presenta cuatro unidades litológicas, la formación Aguardiente (Kia), la formación Tibú Mercedes (kitm), depósitos de Ladera (Ql) y un depósito Fluviotorrencial (Qtf).

La falla de desplazamiento de la Vereda El Páramo (Imagen 30) separa rocas del cretácico con los depósitos. Además, genera una litología brechada y caótica y a su vez explica la aparición de los diferentes cauces de la quebrada. Por lo general, en las zonas de falla existen ablandamientos de la roca por donde puede aflorar el agua, lo cual reafirma la existencia de una zona de recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca.

La formación Tibú Mercedes (Kitm), ubicada en la zona sur de la microcuenca presenta areniscas de grano grueso, calizas de color gris y pequeñas intercalaciones lodolitas arenosas y areniscas de grano fino (Imagen 31).

Imagen 31. Formación Tibú Mercedes (Kitm) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

La formación Aguardiente (Kia), ubicada en la zona este de la microcuenca en la que predomina arenisca de grano grueso a medio de color gris, crema y amarillo claro de composición cuarzosa con intercalaciones de lodolitas grises en capas delgadas (Imagen 32).

Imagen 32. Formación Aguardiente (Kia) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

El depósito Fluvio-torrencial (Qtf), ubicado en la zona norte de la microcuenca se encuentra disectado por el cauce principal y presentan bloque inmerso en una matriz que es variable en granulometría, localmente areno-gravosa y areno-arcillosa (Imagen 33).

Imagen 33. Depósito Fluviotorrencial (Qtf) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

El depósito de Ladera (Ql), distribuido entre la zona sur, norte y central de la microcuenca está constituido por gravas y bloques en una matriz areno-arcillosa de materiales de diversos tamaños (Imagen 34).

Imagen 34. Depósito de Ladera (Ql) presente en la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

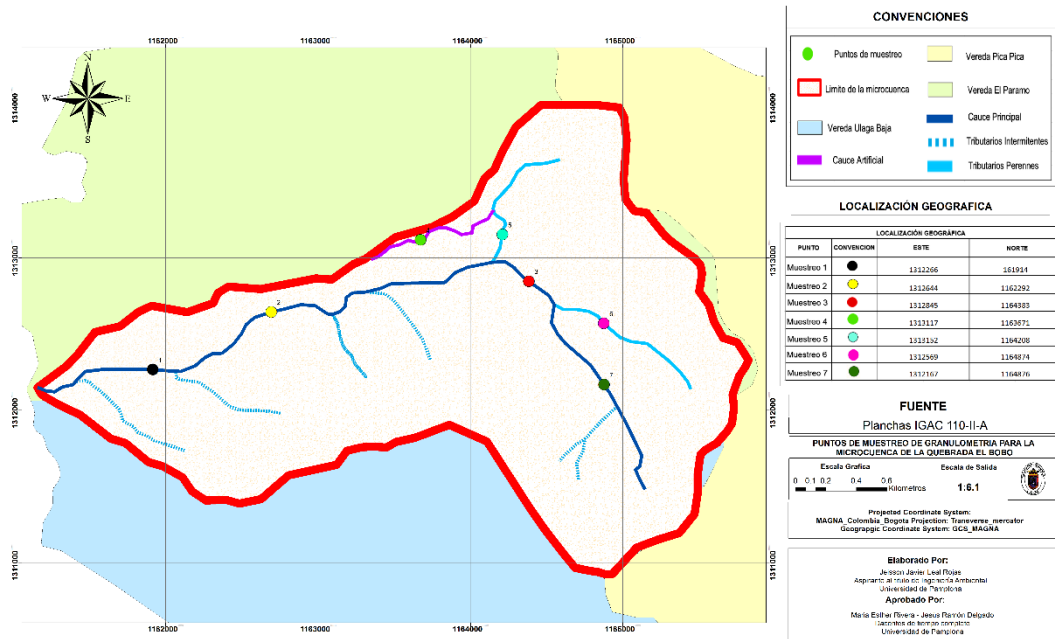


Fuente: Leal J, 2016.

7.9 Granulometría de la red fluvial de la microcuenca.

La imagen 35 muestra los puntos de muestreo de granulometría a través de la red fluvial de la microcuenca.

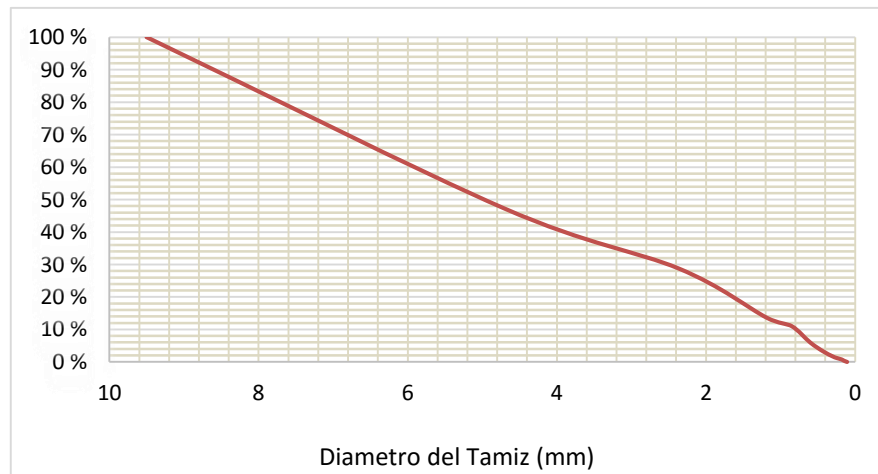
Imagen 35. Puntos de muestreo de granulometría para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

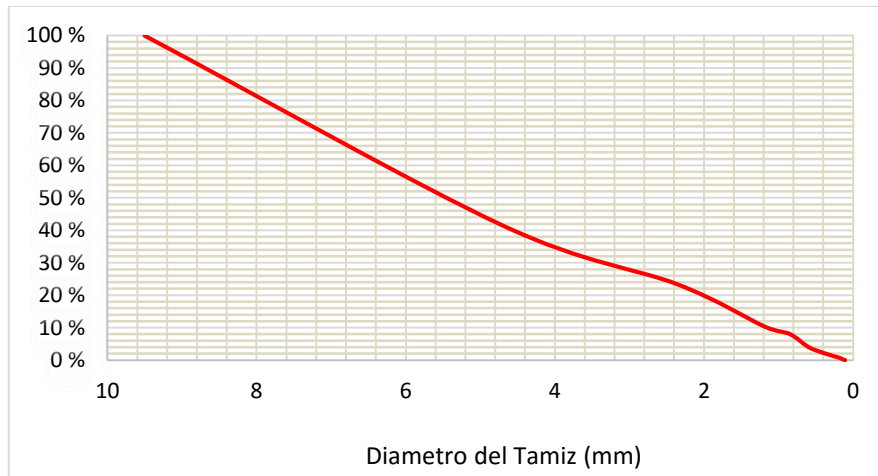
Las curvas granulométricas obtenidas para cada tramo de la red fluvial se muestran en las imágenes de la 36 a la 42.

Imagen 36. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 1 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



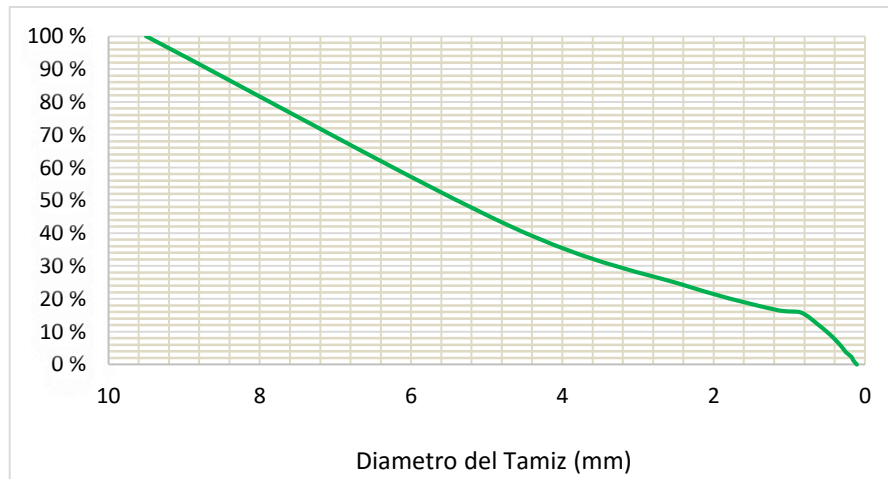
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 37. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 2 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



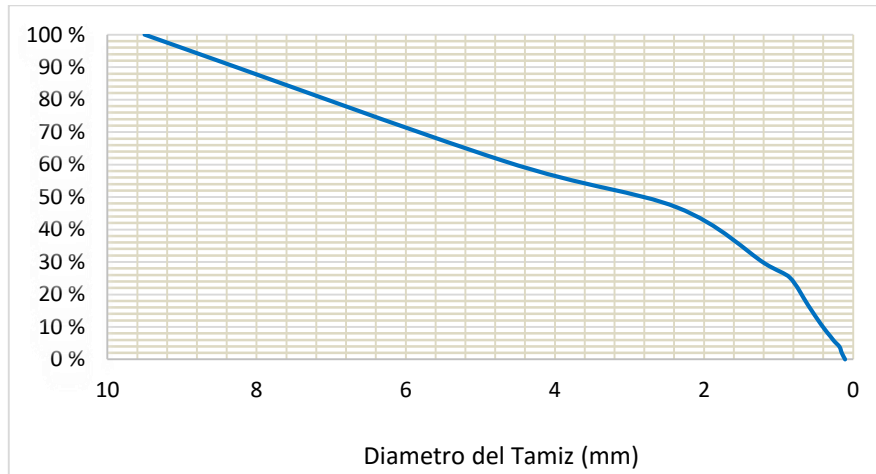
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 38. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 3 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



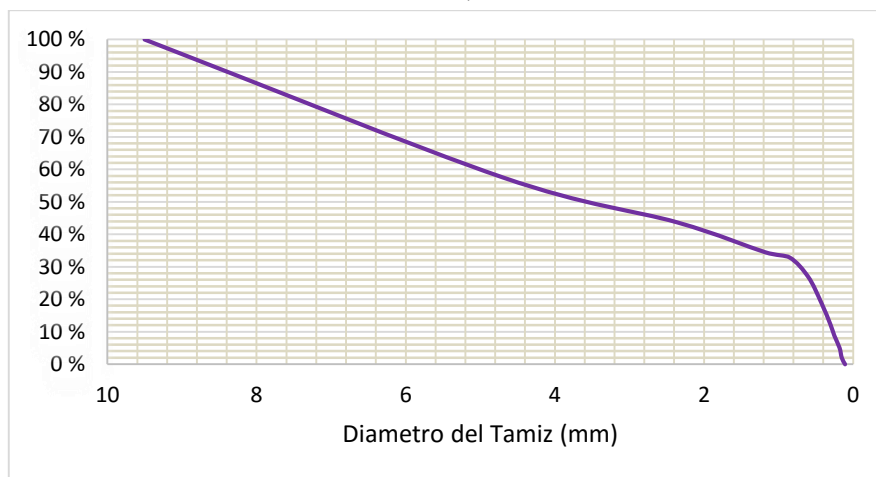
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 39. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 4 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



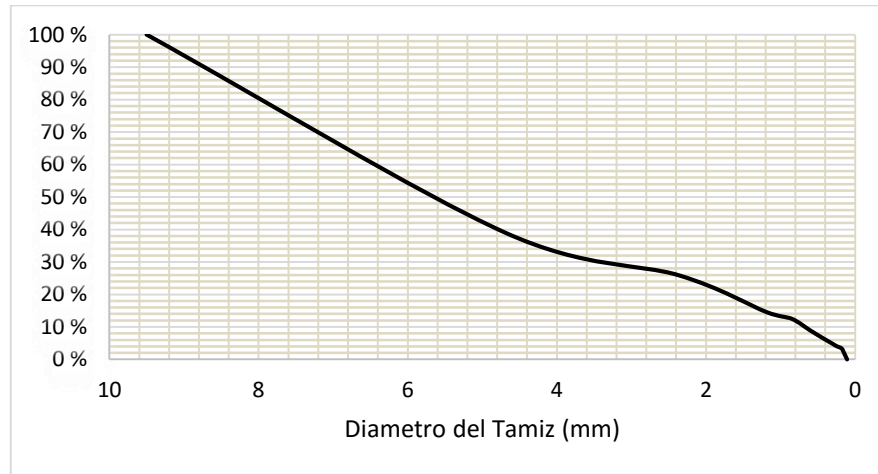
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 40. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 5 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



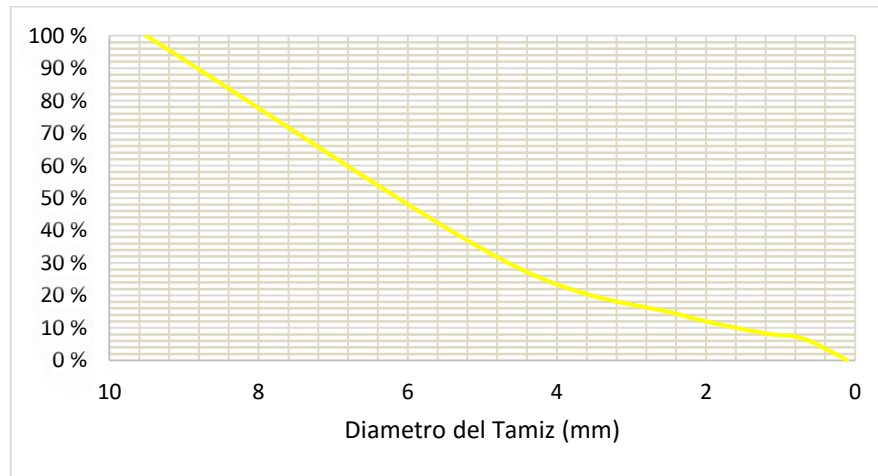
Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 41. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 6 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Imagen 42. Curva Granulométrica para el punto de muestreo 7 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

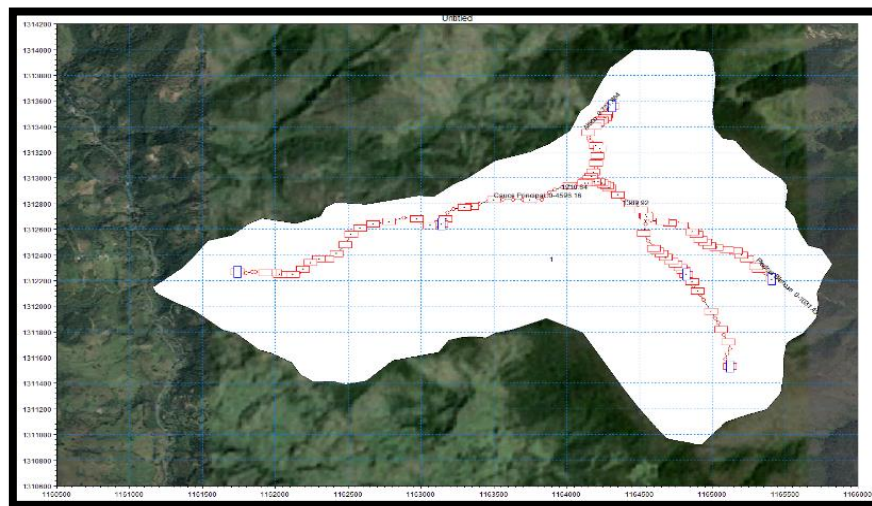
Los diámetros característicos D_{10} , D_{50} y D_{90} fueron 0.8mm, 5mm y 9mm para el puto de muestreo 1; 1.2mm, 5.4mm y 8.8mm para el puto de muestreo 2; 0.8mm, 5.4mm y 8.8mm para el puto de muestreo 3; 0.2mm, 2.8mm y 8.3mm para el puto de muestreo 4; 0.12mm, 3.6mm y 8.2mm para el puto de muestreo 5; 0.7mm, 5.6mm y 8.8mm para el puto de muestreo 6; 1.6mm, 6.2mm y 8.8mm para el puto de muestreo 7, respectivamente. Todas las curvas granulométricas presentaron una granulometría continua a excepción de la curva granulométrica del punto de muestreo número 3, el cual presenta una granulometría discontinua alrededor del diámetro de 1mm. Los resultados mostraron que, en general, la red fluvial presenta un cauce de lecho rocoso. De igual manera, presentan un sistema granular disperso con excesos de arena gruesa y una granulometría continua, indicando que el lecho de la red fluvial

está constituido en su mayoría por partículas granulares. Según Martín (2002), los ríos aluviales discurren sobre materiales granulares transportados por el propio río, como en el caso de la red fluvial de la microcuenca de la Quebrada El Bobo. Cabe destacar que los resultados muestran la proporción para el 40-50% de la granulometría total de la red fluvial, el material restante llegaba hasta un máximo de diámetros de alrededor de un metro por lo que no se contaban ni con medios para transportarlo, ni con equipos para su medición.

7.10 Modelo Unidimensional MIKE 11.

En la Imagen 43 se muestra el modelo MIKE 11 de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Imagen 43. Microcuenca de la Quebrada El Bobo en MIKE 11.



Fuente: Leal J, 2016.

Para la modelación de la microcuenca de la Quebrada El Bobo se seleccionó el punto de aforo 6 (K 0 + 959) como frontera superior y el punto de aforo 1 (K 4 + 240) como frontera inferior. Las fronteras internas corresponden a los cauces tributarios, el cauce artificial representado como una descarga puntual negativa y el aporte de agua subterránea representado como una descarga puntual positiva. Se seleccionaron 57 secciones transversales de las 90 levantadas para el modelo teniendo en cuenta la representatividad de las características geométricas del cauce y la variación de la conductancia a lo largo del cauce (CVC y Universidad del Valle, 2007). Los valores de espaciamiento máximo (Δx) fueron de 100m para el cauce principal y 80m para los tributarios y se seleccionó un intervalo de tiempo (Δt) de 1 minuto, garantizando la estabilidad numérica del modelo mediante el cumplimiento de la condición de Courant. El espaciamiento medio entre secciones transversales fue de 105, 100 y 66m para el Cauce Principal, el Tributario Piedras Blancas y el Tributario Portachuelo, respectivamente. Para la calibración del modelo se ajustaron los coeficientes de rugosidad de Manning de la ribera izquierda (zona 1) y ribera derecha (zona 2) con

respecto a la dirección del flujo y el cauce del río (zona 3) de todas las secciones transversales de la red fluvial (Tabla 14).

Tabla 14. Coeficientes de Rugosidad de Manning de las secciones transversales.

Ubicación		Rugosidad de Manning		
Nombre del Cauce	Chainage de inicio [m]	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Cauce Principal	959	0.05	0.05	0.045
Cauce Principal	1442	0.04	0.04	0.038
Tributario Piedras Blancas	144	0.075	0.063	0.058
Tributario Piedras Blancas	519	0.042	0.042	0.04
Tributario Portachuelo	370	0.05	0.047	0.038
Tributario Portachuelo	544	0.08	0.078	0.06
Tributario Portachuelo	904	0.05	0.05	0.04

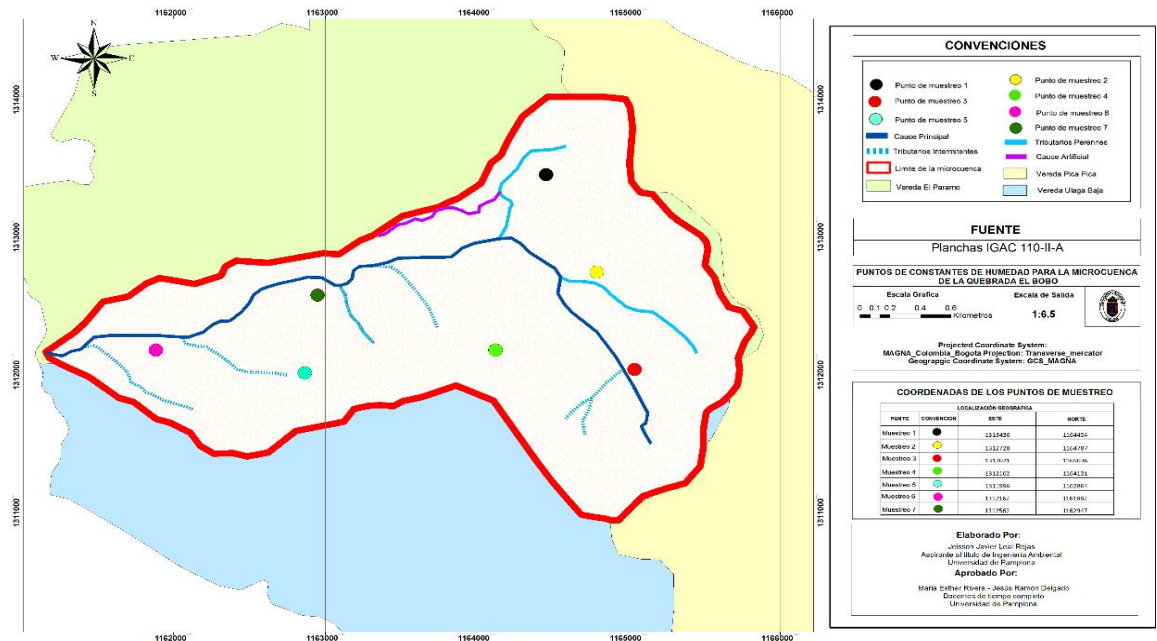
Fuente: Leal J, 2016.

En general, se observa una menor resistencia al paso del fluido dentro del cauce a diferencia de las riberas. Según Woodward y Posey (1958), los valores de rugosidad muestran que la red fluvial posee corrientes en terrenos rocosos de montaña, lo cual concuerda con la ubicación y caracterización de la microcuenca en estudio. El modelo mostro un desbordamiento para los meses de Junio y Diciembre en la zona alta de las microcuenca entre los chainage 412m y 738m del Tributario Portachuelo y entre los chainage 144m y 527m del Tributario Piedras Blancas. Además, se presentó un desbordamiento en la zona media del cauce principal entre los chainage 2671m y 3128m, esto debido a que estos meses correspondieron a épocas lluviosas y a la morfología de las secciones transversales.

7.11 Modelo Hidrológico MIKE SHE

En la Imagen 44 se observan los puntos de muestreo de Constantes de Humedad para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Imagen 44. Puntos de muestreo de Constantes de Humedad para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Los resultados obtenidos de los puntos de muestreo del suelo en la microcuenca para la determinación del punto de saturación del suelo (PS), la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchites (PM) se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Constantes de Humedad de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Numero de muestra	Muestra de suelo NO saturada			Muestra de suelo saturada			PM (%)
	Peso humedo de la muestra (g)	Peso seco de la muestra (g)	CC (%)	Peso humedo de la muestra (g)	Peso seco de la muestra (g)	PS (%)	
1	44.75	37.58	19.08	42.37	29.37	44.26	9.12
2	39.2	33.22	18.00	40.08	28.95	38.45	8.32
3	40.05	36.4	10.03	40.24	29.87	34.72	2.42
4	50.67	45.87	10.46	46.32	35.25	31.40	2.74
5	54.01	46.81	15.38	45.83	33.54	36.64	6.38
6	19.55	15.75	24.13	20.61	13.36	54.27	12.85
7	41.09	33.27	23.50	38.52	25.27	52.43	12.39

Fuente: Leal J, 2016.

Según el formato de Propiedades Físicas de Funprover (2016), los suelos arenosos presentan CC entre 5 a 16%; los migajones de 15 a 30%; los migajones arcillosos de 25 a 35% y los arcillosos de 30 a 70 %, lo cual indica que la microcuenca posee un rango de suelos entre arenosos y areno-limosos con bajos porcentajes de arcilla.

Según INAB (2003), las características del suelo que influyen en una recarga hídrica son la textura, la densidad aparente, el grado de saturación (contenido de humedad) y la capacidad de infiltración. Los suelos permeables (arenosos) poseen un grado de infiltración mucho mayor que los suelos arcillosos, por lo cual las constantes de humedad tienen a ser menores a comparación de los suelos impermeables (arcillosos) y compactados. En general, las constantes de humedad obtenidas en la zona baja y media de la microcuenca son mayores con respecto a la zona alta, indicando un mayor grado de infiltración en la zona alta de la microcuenca y reafirman la existencia de una zona de recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca obtenida mediante las características morfométricas de la microcuenca, las Curvas de Duración y los Registros de Caudales.

Con respecto a la información de la cobertura vegetal (Cultivos, pastizales y zonas boscosas), en la Tabla 16 se observan las características principales para cada tipo de Vegetación.

Tabla 16. Características principales de los tipos de vegetación de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

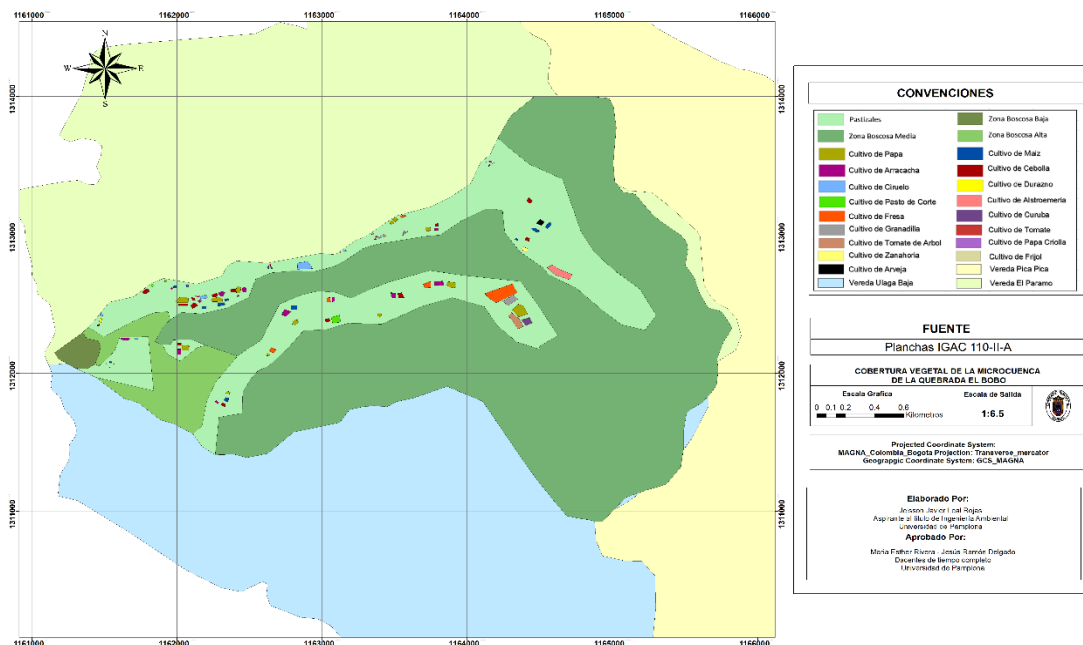
Tipo de Vegetación	IAF	Profundidad de Raíz (mm)	Kc Inico	Kc Medio	Kc Final	Tiempo de Crecimiento (Días)	Tiempo de Desarrollo (Días)	Tiempo de Madurez (Días)	Tiempo de vejez (Días)	Demanda de Agua para Riego (mm/h)
Grass	1.2	500	0.85	0.9	0.92	10	20	-	-	-
High Forest	2.85	5000	0.85	1	0.95	-	-	1460	-	-
Medium Forest	2.4	4500	0.8	0.95	0.9	-	-	1460	-	-
Low Forest	2.1	4200	0.8	0.9	0.9	-	-	1460	-	-
Papa	1.15	500	-	1.15	0.75	25	30	30	30	0.13
Maíz	0.98	700	-	1.15	1.05	30	50	55	40	0.14
Arracacha	1.2	500	1.05	1	0.6	30	210	40	20	0.11
Cebolla	0.66	460	-	1	1	15	25	120	20	0.11
Ciruelo	1.35	1000	0.55	0.9	0.65	-	1095	-	-	0.17
Durazno	1.5	1300	0.55	0.9	0.65	-	1095	-	-	0.18
Pasto de Corte	1.3	500	0.4	1	0.85	20	80	30	10	0.07
Alstroemelia	1.15	300	0.55	1	0.7	20	50	30	-	0.16
Fresa	1.4	300	0.4	0.85	0.75	20	280	70	35	0.14
Curuba	0.85	400	0.4	1	0.75	60	250	80	30	0.06
Granadilla	0.65	450	0.5	1.05	0.8	35	240	100	40	0.05
Tomate de Arbol	1.24	1300	0.5	1.15	0.7	-	1095	-	-	0.14
Tomate	1.3	300	-	1.15	0.8	25	30	50	20	0.11
Zanahoria	1.06	150	-	1.05	0.95	20	70	20	10	0.08
Papa Criolla	1.1	400	-	1.1	0.8	25	30	30	30	0.11
Arveja	0.75	150	0.5	1.15	1.1	18	25	30	15	0.08
Frijol	0.68	150	0.5	1.05	0.9	18	25	30	15	0.08

Fuente: Leal J, 2016.

Para el caso de los pastizales y zonas boscosas no se registra demanda de agua para riego a diferencia de los cultivos. Cada resultado representa el promedio de los datos obtenidos. Los datos faltantes no fueron necesarios para la simulación del modelo dado las etapas de crecimiento en la que se encontraban los cultivos, los pastizales y las zonas boscosas, para estos datos no fue posible tomar medición en campo, bibliografía, laboratorio o mediante algún otro medio disponible.

Los datos obtenidos de la tabla anterior se agregaron al mapa de vegetación teniendo en cuenta la posición y distribución de los cultivos dentro de la microcuenca (Imagen 45).

Imagen 45. Cobertura Vegetal de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



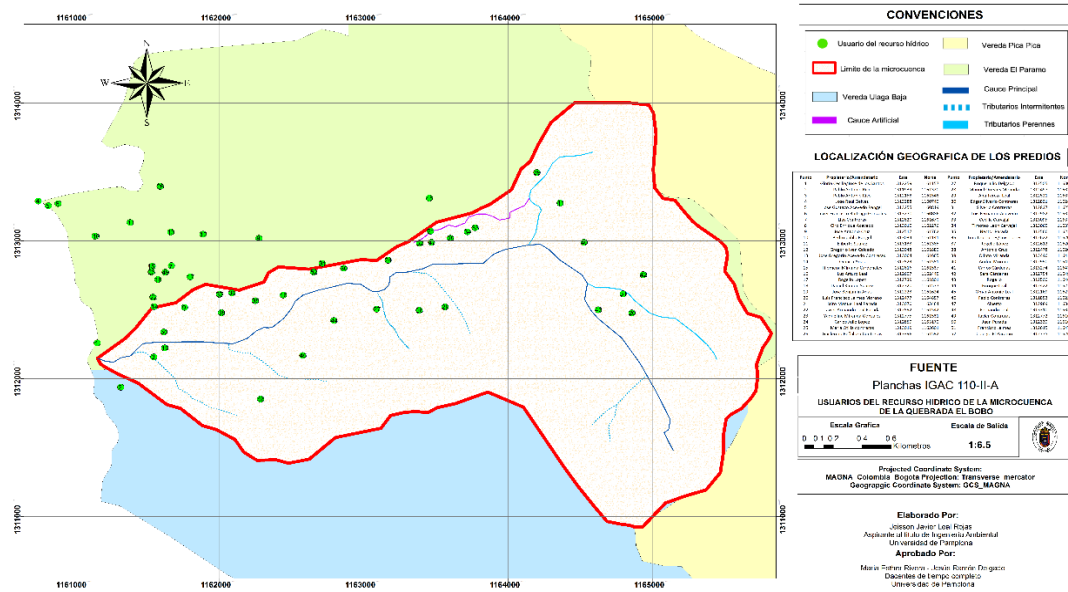
Fuente: Leal J, 2016.

La modelación de la microcuenca no presento zonas de inundación (diferentes a las zonas de desbordamiento apreciables en la modelación de MIKE 11) debido a las características propias de la microcuenca, en especial la elevada pendiente del cauce principal, lo cual contrasta con el análisis realizado por Cardini (2014) llevado a cabo en la Cuenca del Rio Areco (Argentina), en donde los procesos sedimentológicos sobrepasan a los erosivos pero es caso contrario para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

7.12 Modelo MIKE BASIN

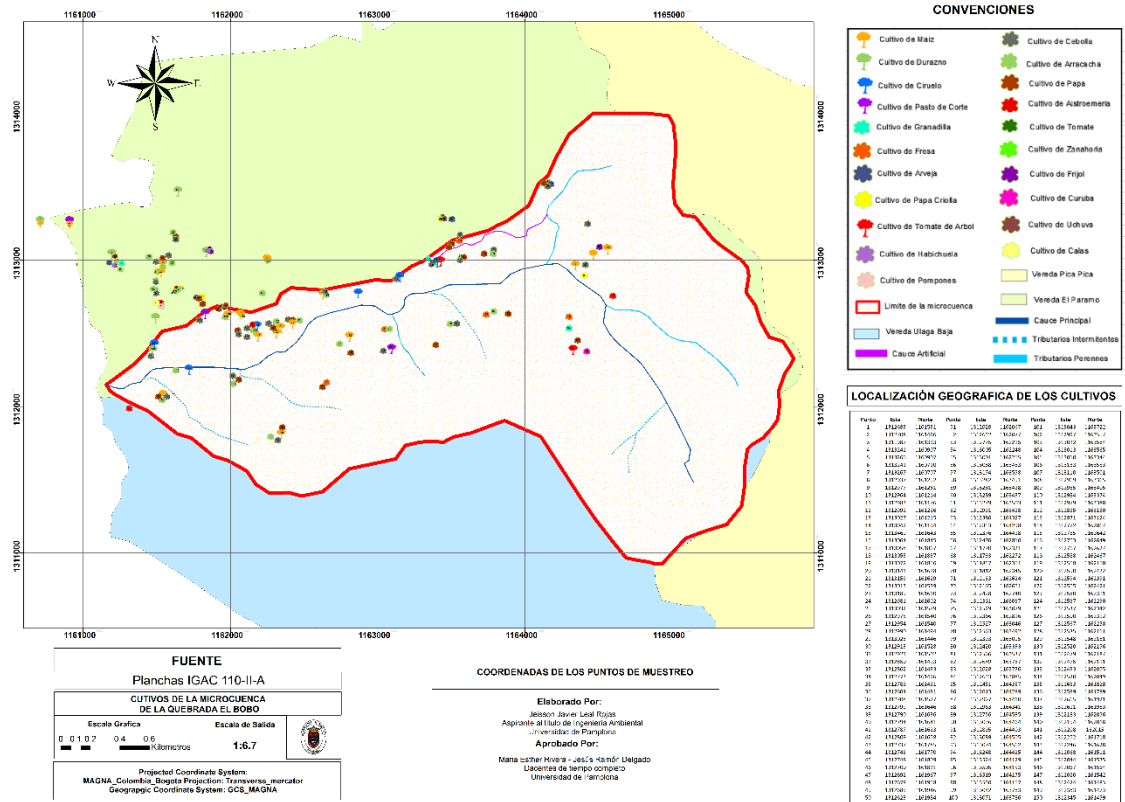
Los predios de los usuarios del recurso hídrico de la microcuenca y sus cultivos se muestran en la Imagen 46 y la Imagen 47, respectivamente. Aunque parte de los predios de los usuarios del recurso hídrico como de sus cultivos se encuentran ubicados fuera del límite de la microcuenca de la Quebrada El Bobo, estos se tuvieron en cuenta puesto que utilizan el agua procedente de la microcuenca. Cabe resaltar que, en general, la mayoría los cultivos se encuentran ubicados cerca de las parcelas, sin embargo, no todos los predios cuentan con zonas de cultivos y además, existen zonas de cultivos que no se encuentran cerca de los predios.

Imagen 46. Usuarios del recurso hídrico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

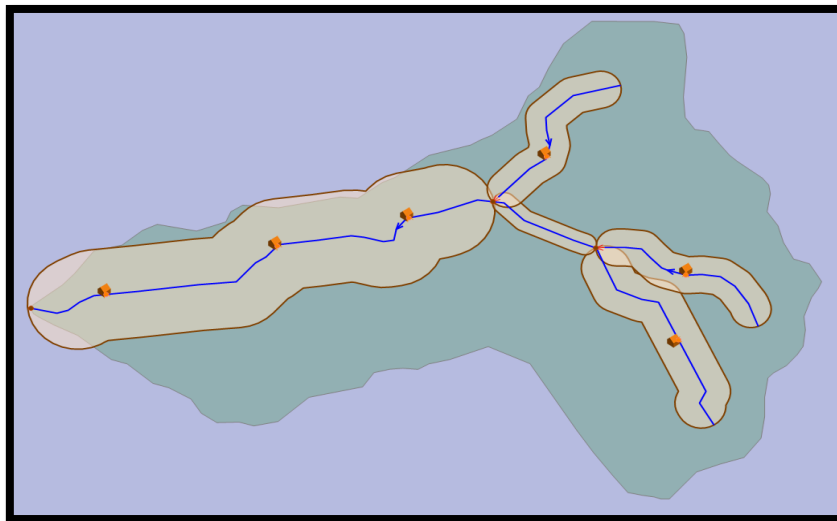
Imagen 47. Cultivos de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

Con base a la información recolectada sobre los predios, cultivos y la red hídrica se construyó un modelo básico de MIKE BASIN (Imagen 48).

Imagen 48. Modelo MIKE BASIN para la microcuenca de la Quebrada El Bobo.



Fuente: Leal J, 2016.

En el modelo se representa el límite de la microcuenca, su red de drenaje dividida en 5 tramos teniendo en cuenta los puntos de confluencia de la red fluvial y los puntos de los usuarios del recurso hídrico representados por la figura naranja. En general, se ubicaron los usuarios del recurso hídrico dentro de un respectivo tramo de la red fluvial teniendo en cuenta el punto de captación de cada usuario y seleccionando solo un tramo de la red fluvial para cada usuario (Tabla 17). Con base en el mapa de los puntos de aforo (Imagen 17) los usuarios y cultivos por parte de la Vereda Ulaga Baja del Municipio de Pamplona se incluyeron en el tramo correspondiente al punto de aforo 7. Para el tramo final de la red fluvial el punto medio representa a los usuarios del distrito de riego con sus respectivos cultivos, los puntos de usuarios ubicados arriba y abajo corresponden a usuarios antes y después del distrito de riego, respectivamente. En el tramo correspondiente al aforo 4 se incluyeron los usuarios del cauce artificial y el uso hídrico para los cultivos del Colegio El Páramo. El tramo 8 representan los usuarios faltantes con sus respectivos cultivos y un punto de captación para uso doméstico por parte del Colegio El Páramo.

En la tabla 18 se observa el impacto semanal generado a la red fluvial por el uso agrícola y domestico para los puntos de aforo 1, 5 y 8 ubicados en la zona baja, media y alta de la microcuenca, respectivamente.

Tabla 17. Distribución espacial de los usuarios del recurso hídrico de la microcuenca de la Quebrada El Bobo.

Ubicación	Usuarios del Recurso Hídrico
Tramo del Punto de Aforo 7	Usuarios de la Vereda Ulaga Baja
Punto medio del tramo final de la red de drenaje	Distrito de Riego El Paramo
Punto del tramo antes del Distrito de Riego	Pedro Rangel, Cultivos Escuela El Páramo, Silverio Contreras y Jaime Suarez
Punto del tramo después del Distrito de Riego	Luis Catiron, Pablo Rico, Nelly Leal, Javier Leal, Benjamin Arias, Juan Parada, Gloria Cecilia
Tramo del Punto de Aforo 4	Olinto Miranda, Cecilia Carbajal, Jairo Leal, Luis Acevedo, Fernando Leal, Alberto Gelves, Carlos López y Silverio Contreras.
Tramo del Punto de Aforo 8	Francisco Jaimez, Audon Moreno, Timoteo Carvajal, Jairo Leal, Luis Fernando Acevedo, Alberto Gelves y Carlos López

Fuente: Leal J, 2016.

Tabla 18. Disminución del Caudal por uso Doméstico/Agrícola.

Zona Baja - Aforo 1			Zona Media - Aforo 5			Zona Alta - Aforo 8		
Fecha	Caudal Medido (L/s)	Caudal con intervencion Domestica/Agricola (L/s)	Fecha	Caudal Medido (L/s)	Caudal con intervencion Domestica/Agricola (L/s)	Fecha	Caudal Medido (L/s)	Caudal con intervencion Domestica/Agricola (L/s)
08/03/2015	4.75	0.55	06/03/2015	7.09	3.09	01/04/2015	10.00	4.30
15/03/2015	5.01	0.61	13/03/2015	7.74	3.94	08/04/2015	7.99	3.40
22/03/2015	11.31	6.91	20/03/2015	7.62	3.62	15/04/2015	7.43	3.00
29/03/2015	11.02	1.22	27/03/2015	6.19	2.19	22/04/2015	8.59	4.10
05/04/2015	20.99	14.99	03/04/2015	8.78	5.78	29/04/2015	6.61	2.60
12/04/2015	19.22	12.22	10/04/2015	8.25	4.45	06/05/2015	5.95	2.43
19/04/2015	19.59	14.59	17/04/2015	7.75	2.75	13/05/2015	6.36	2.50
26/04/2015	15.04	9.04	24/04/2015	7.90	4.40	20/05/2015	6.74	2.75
03/05/2015	8.65	0.65	01/05/2015	4.72	0.52	27/05/2015	7.29	3.20
10/05/2015	10.39	1.39	08/05/2015	4.47	0.17	03/06/2015	5.42	2.00
17/05/2015	10.96	1.96	15/05/2015	5.08	1.88	10/06/2015	5.56	2.47
24/05/2015	19.29	11.29	22/05/2015	7.07	2.07	17/06/2015	6.14	3.85
31/05/2015	38.45	33.45	29/05/2015	10.12	5.12	24/06/2015	5.59	3.00
07/06/2015	35.41	31.41	05/06/2015	9.27	5.77	30/06/2015	3.35	1.35
14/06/2015	41.97	38.37	12/06/2015	14.53	10.53			
21/06/2015	42.60	39.40	19/06/2015	41.24	36.44			
28/06/2015	26.35	19.35	26/06/2015	42.32	37.32			
05/07/2015	14.40	7.40	03/07/2015	36.67	32.47			
12/07/2015	11.82	4.32	10/07/2015	44.59	39.59			
19/07/2015	13.02	5.02	17/07/2015	34.76	30.26			
26/07/2015	12.80	4.30						
31/07/2015	13.16	4.50						

Fuente: Leal J, 2016.

Se presentó un Caudal por debajo del Caudal Ecológico (ver apartado 7.2.2) para el Aforo 1 correspondiente a principios y finales de Marzo y las tres primeras semanas de Mayo. Para el Aforo 5 el caudal del cauce estuvo por debajo del Caudal Ecológico para el mes de Marzo, la segunda semana de Mayo y el mes de Junio. En el aforo 8, el caudal del cauce estuvo por debajo del Caudal Ecológico, lo cual muestra la sobre explotación en dicho tramo. La disminución del Caudal generado para los tres puntos de aforo se tuvo en cuenta suponiendo un uso de riego simultáneo para todos los cultivos.

CONCLUSIONES

La morfometría mostro una cuenta alta de montaña con predominancia de procesos erosivos, a pesar de la zona de recarga hídrica que presenta la microcuenca, la poca jerarquización de la red fluvial supone un manejo especial del recurso hídrico, especialmente en épocas de estiaje. El tiempo de concentración se debe calcular teniendo en cuenta las características morfológicas, geológicas, climatológicas, la cobertura vegetal y el uso de la microcuenca, siendo lo más preciso posible para evitar errores en posteriores análisis. Según Cañizares et al (2004), la elección del procedimiento para el manejo de datos faltantes resulta una tarea compleja, pues un mismo método en determinadas situaciones produce estimaciones precisas y en otras, no, esto sugiere a los investigadores que, cuando manejen datos faltantes, valoren previamente, el uso de más de una alternativa para tratarlos que les permita una mejor elección del procedimiento a implementar.

Parámetros como las curvas de duraciones de Caudales, el índice asimétrico de la microcuenca, el análisis estadístico descriptivo de caudales, el hidrógrama, las constantes de humedad del modelo MIKE SHE y la litología de la microcuenca indican la existencia de una zona de recarga hídrica en la parte alta de la microcuenca la cual abastecería a la población y al ecosistema en épocas de estiaje.

Los análisis fisicoquímicos del agua de la microcuenca muestran una calidad del agua bastante buena, lo cual concuerda con la calidad del agua de montaña, a pesar de esto, la carga biológica presente en el agua es alta, lo cual se debe a los malos hábitos con respecto al manejo del agua, de la ganadería y agricultura por parte de la comunidad.

El índice de escasez mostro una microcuenca con una sobreexplotación del recurso hídrico en épocas de estiaje lo que disminuye el caudal de la red fluvial por debajo del caudal ecológico.

La modelación en MIKE BASIN evidencia un consumo del agua por parte de la comunidad por encima del agua disponible si se utilizara el riego para todos los cultivos de la microcuenca. Las zonas de desbordamiento representadas por el modelo MIKE 11/ MIKE SHE no afectan a la población de manera directa dada la alta pendiente de la microcuenca, pero la erosión y las avenidas torrenciales generan daños en las conducciones hidráulicas, asimismo los sedimentos que transporta el agua a través de dichas conducciones, que a su vez repercuten en la calidad de vida de sus habitantes.

La granulometría revelo una microcuenca de montaña con lecho rocoso en donde los procesos de erosión son su principal característica, los cuales pueden agravar los daños producidos por las crecidas torrenciales.

En general, planes de manejo hídrico por parte de las autoridades competentes permitirán generar un manejo adecuado del agua por parte de la comunidad. Para la distribución y asignación del recurso hídrico se debe tener en cuenta el caudal ecológico y la oferta hídrica de la microcuenca, la protección de zonas estratégicas como lo son las nacientes de la microcuenca, planes de sensibilización dirigidos a la comunidad que permitan disminuir el riesgo de erosión que presenta la microcuenca y que puede generar daños económicos en la sociedad, proponer métodos encaminados al desarrollo económico y social que permitan un desarrollo sustentable del recurso hídrico especialmente en épocas de estiaje es de vital importancia. Todo esto teniendo en cuenta los resultados dados por el estudio hidrológico y la modelación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros estudios hidrológicos la utilización del Hidrógrama Triangular del U.S Bureau of Reclamation y el Hidrógrama Triangular de Témez para el caso de la microcuenca de la Quebrada El Bobo y la utilización de más de una metodología para la imputación de datos faltantes.

La imagen 31 mostro la formación Tibú Mercedes en la zona baja de la microcuenca y de acuerdo al mapa geológico la litología de esa zona corresponde a la Formación Bocas, por lo que se recomienda para futuros estudios realizar un análisis más detallada de le geología para obtener un mapeo exacto.

Se recomienda a las autoridades competentes estudios más a fondo que permitan determinar la cantidad y movimiento del agua subterránea de la microcuenca, la calidad del agua tanto superficial como subsuperficiales, estudios enfocados a la parte agrícola que permitan determinar un mejor manejo y uso tanto del agua como de los cultivos, estudios de cobertura vegetal, estudios geológicos que permitan describir mejor el comportamiento de la microcuenca y la continuación del registro de parámetros hidrológicos que permitan tener un conocimiento más amplio, con el cual se puedan tomar medidas mucho más precisas.

Los resultados de la modelación muestran un riesgo alarmante en cuando al agua disponible en épocas de sequía, se recomienda a las autoridades competentes realizar campañas, estudios y planes que permitan la protección y buen uso del recurso hídrico para evitar la racionalización del agua y en el peor de sus casos, el desvanecimiento total del agua superficial de la microcuenca.

Se recomienda a los usuarios de la microcuenca hervir el agua antes del consumo puesto que la calidad biológica del agua es defectuosa y puede generar enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott M. B., Ionescu F., On numerical computation of nearly Horizontal flows, Journal Hydraul, 1997, Res 5(2), Pgs. 97-117.
- Abril O. A., Montalvo C. I., Modelización del flujo subterráneo de dos cuencas de tamaño medio empleando dos estructuras (modelos) distintas, Universidad de Cuenca - Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil, 2014.
- Acker P. y White W.R, Sediment transport: new approach and analysis, PROC. ASCE, JHD, 99, HY11, 1973, pgs. 2041-2060.
- AGROSOILLAB, Acerca de Agrosoillab, 2016.
Disponible en: www.agrosoil.com.co.
- Almoroz J. A., Climatología Aplicada a la Ingeniería y Medioambiente, Tema 9: Necesidades Netas. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- Andia C. A., Morales Y. W., Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba-Bolivia, 2009.
- Aparicio F. J., Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial Limusa, 1992.
- Barrera J., Suárez D. Melgarejo L. M., Análisis De Crecimiento En Plantas, Capítulo 2, Experimentos en fisiología vegetal, Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- Becker S., Ichino A., Estimation of Average Treatment Effects Based on Propensity Scores, The Stata Journal, Vol. 2, No. 4, 2002.
- Bernard M. M., Formulas for rainfall intensities of long durations, Trans. ASCE, 1932, Vol 96, pgs. 592-624.
- Bertrand-Krajewski, Mesure et modélisation des rejets urbains par temps de pluie, Cours D.E.A Génie Civil, Lyon, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), 1999-2000.
- Bier, P.E. and Delleur, J.W., Hydraulics of single span bridge constructions. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division, 88(HY2), March, 1962, pgs 75-108.
- Blázquez B. L., García B. J., Manual de carreteras. 2000.
- Brunatti C. y De Napoli H. Métodos Potenciométricos, 2004. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6305/download/>
- Buck, S.F., A method of estimation of missing values in multivariate data suitable for use with an electronic computer, Journal of the Royal Statistical Society, B22, 1960, pgs. 302-306.
- Bustamante O., Manual básico para medir caudales, 2006.

- Butts M. B., Buontempo C., Lørup J. K., Williams K., Mathison C., Riegels N. D., Jessen O. Z., Glennie P., Mcsweeney C., Wilson M., Jones R. y Seid A. H., Developing a regional methodology for climate adaptation in the Nile Basin, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Science and Technology, Athens-Greece, 2013.
- Butts M.B, Overgaard J, Viaene P, Dubicki A, Stronska, Szalinska W. Flexible Process-Based Hydrological Modelling Framework for Flood Forecasting – MIKE SHE, International Conference “Innovation, advances and implementation of flood forecasting technology” Tromsø, Norway, October 2005.
- Cabezas G. M., Peña F., Duarte H. W., Colorado J. F. y Lora Silva L., Un Modelo Para La Estimación Del Área Foliar En Tres Especies Forestales De Forma No Destructiva, Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, 2009, Vol 12, No. 1, pgs. 121-130.
- Cadena P, Apuntes del curso de geomorfología, 2009.
- Calvo M. P., Silva F. P., Rozados M. L., Díaz M. B., Rodríguez P. D. y Suárez I. D., El Indici de Area Foliar (LAI) En Masas De Abedul (BETULA CELTIBERICA ROTHM. ET VASC.) En Galicia, Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2005, Vol 20, pgs. 11-126.
- Campos Aranda D., Procesos del ciclo Hidrológico, Universidad Autónoma de San Luis Potosi, 1992.
- Carrasco V. Luis, Hidrología Básica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC, Lima - Perú, 1992.
- Casas C. C., Analisis especial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya, Modelización y clasificación objetiva, Departament d’Astronomia i meteorología, Universitat de Barcelona, 1995, pgs. 103.
- Castillo L. A., Cabrera A. L., Ramírez R. A., Vázquez M. A., Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia registrada en Chapingo, Mexico, 2011.
- Charalampos D., Pantazis G., Dimitris Papadimos y Dimitris Papamichail, Ecosystem approach to wáter resources management using the MIKE 11 modeling system in the Strymonas River nad Lake Kerkini, Journal of environmental Management, 2012, Vol 94, pgs. 132-143.
- Chow V., Maidment D., Mays L. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 1994.
- Collier, C.G., Hardaker, P.J., Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach, Journal of Hydrology, 1996, Vol. 183, pgs. 277-306.

- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Pamplonita, 2010.
- Cortolima (Corporación autónoma regional del Tolima), Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de las quebradas las panelas y la balsa, 2008, pgs. 143-156.
- Corzo J. y Rodríguez A, Colorimetría: Análisis Espectrofotométrico de la Riboflavina, 2008. Disponible en: <https://bioquibi.webs.ull.es/practicas/2.pdf>
- Costa C. P., Domínguez E. C., Gonzalo H. R. y anegas R. S., El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico?, Universidad de los Andes, 2005.
- Cunge J.A., Holly F.M., Jr. and Verwey A., Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman, 1980.
- CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Universidad del Valle, MODELACION MATEMATICA DEL RIO CAUCA TRAMO SALVAJINA – LA VIRGINIA, Capitulo 4: modelo matemático unidimensional MIKE 11, 2001.
- DHI, Danish Hydraulic Institute, A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual, Horsholm, 2009. Disponible en: <https://www.dhigroup.com/>
- DHI, Danish Hydraulic Institute, MIKE BASIN User Manual, Horsholm, 2012. Disponible en: <https://www.dhigroup.com/>
- DHI, Danish Hydraulic Institute, MIKE SHE User Manual, Volume 1: User Guide, Horsholm, 2009. Disponible en: <https://www.dhigroup.com/>
- DHI, Danish Hydraulic Institute, MIKE SHE User Manual, Volume 2: Reference Guide, Horsholm, 2009. Disponible en: <https://www.dhigroup.com/>
- DHI, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, 2014. Disponible en: <https://www.dhigroup.com/>
- DHI, Danish Hydraulic Institute. The lemhi river mike basin model: a tool for evaluating stream flows, diversion operations and surface water-ground water relationships in the lemhi river basin, Idaho, 2006.
- Donald N. Maynard y George J. Hochmuth., Knott's Handbook for Vegetable Growers, Fifth Edition, 2007.
- Durrant, G and Skinner, C., Using missing data methods to correct for meas. error... Survey Meth, 2006.

- Durrant G. B., Imputation Methods for handling item-nonresponse in the social sciences: A methodological review. ESRC National Centre for Research Methods and Southampton Statistical Sciences Research Institute, University of Southampton, 2005.
- Espinace R., Laboratorio de Mecánica de Suelos, Valparaiso – Chile, 1979.
- Engelund, F. y Fredsøe, J., A sediment transport model for straight alluvial channels, 1976. Nordic Hydrology, Vol. 7, No. 5.
- Engelund, F. y Hansen, E., A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk Forlag, Copenhagen, 1967.
- Farías, M., Hidrología avanzada: Caudal máximo e hidrograma de diseño. Perú, Universidad de Piura, 2007.
- Fattorelli S., Fernandez P, Diseño hidrológico, Associazione Italiana di Idronomia, 2011.
- Ferreira A. M., Metodologías de análisis e imputación de datos faltantes en series de velocidad del viento, VI congreso de estadística e investigación de operaciones, 2003.
- Frana A. S. Applicability of MIKE SHE to simulate hydrology in heavily tile drained agricultural land and effects of drainage characteristics on hydrology, Iowa State University, Graduate theses and dissertations, 2012.
- Freeze, R. A. y Harlan, R. L, Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model, 1969, Journal of Hydrology. Vol. 9. Pgs. 237-258.
- Funprover (Fundación Produce Veracruz)., Formatos, Propiedades Físicas del Suelo, 2016, Capitulo X, pgs. 92. Disponible en: <http://www.funprover.org/formatos/manualTomate/Propiedades%20Fisica%20del%20Suelo.pdf>
- Gámez W. Texto básico de hidrología Managua, Universidad Nacional agraria, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Nicaragua, 2009.
- García C. y Martín J. B., Caracterización granulométrica del lecho móvil de un río de gravas efímero: Aplicación a un tramo de la riera de Les Arenas, 2001, ACTA GEOLOGICAHISPANICA. Vol. 36, No. 1-2, pgs 137-147.
- García M. S., Practica 1: Granulometría por tamizado de un material en polvo, Fundamentos de Materiales - Prácticas de Laboratorio, Universidad de Armería, Departamento de Física Aplicada, 2016.
- García P. M., Puppo L., Hayashi R. y Morales P., Metodología para Determinar los Parámetro Hídricos de un Suelo a Campo, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Agua, Montevideo-Argentina, 2012.
- Goicoechea, Imputación basada en arboles de clasificación, 2002, pgs. 5-19.

- Gómez J. J., Regionalización de curvas de duración, Universidad de Costa Rica–Facultad de Ingeniería, Costa Rica–San José, 1999.
- Gómez M. V., Hidrología Urbana, Barcelona-España, 2007.
- González C. P., Introducción al Análisis Volumétrico, Conceptos teóricos. 2013. Disponible en: <http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/quimica-analitica/contenidos/CONTENIDOS>
- Gregory K. J., y Walling D. E., Drainage basin form and process, Arnold, London, 1973.
- Grupo de Geotecnia, Manual de laboratorio de granulometría, Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería en Construcción, Valparaíso – Chile, 2016.
- Guerra F., González J., caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada la bermeja, san cristóbal, estado táchira, Venezuela. Universidad de los Andes, Táchira, Departamento de Ciencias Sociales, 2002, Pgs. 88-108. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/20840/2/articulo7.pdf>.
- Hamil, L., Bridge Hydraulics, E & FN Spon, 1999.
- Hansen, E. M., Schreiner, L. C., Miller, J. F., Application of Probable Maximum Precipitation Estimates - United States East of the 105th Meridian, Hydrometeorological Report No. 52, (HMR- 52), National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Springs, MD, 1982, pgs 168.
- Henao J. E., Introducción al manejo de cuencas hidrográficas, Bogotá: Fundación Universidad Santo Tomás, 1988.
- Horton, R., Erosional development of streams and drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology, 1945, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 56, pgs. 275- 370.
- Ibañez A. Sara, Moreno R. Hector, Gisbert B. Juan, Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica. Universidad Politecnica de Valencia, España, 2011.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos renovables en Colombia: Estudio Nacional del Agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica, Bogotá, 2008, pgs. 162.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Ministerio del Medio Ambiente, El Estudio Nacional del Agua (ENA), 2014.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB), Metodología para la determinación de Áreas Críticas de Recarga Hídrica Natural, Manual Técnico, Guatemala, 2003, pgs. 106.

- Jaime B., Efraín D. y Andrés E., Modelación del efecto de escenarios de cobertura sobre la migración de nutrientes (N, P2 O5) en la cuenca alta del río Magdalena (Huila, Colombia), Ing. Univ. Bogotá (Colombia), Julio-Diciembre de 2009, Vol. 13, No. 2, pgs. 341-369.
- Jaiswal R. K., Ghosh N. C., Poonam Guru y Devakant, MIKE BASIN Based Decision Support Tool for Water Sharing and Irrigation Management in Rangawan Command of India, 2014, Journal: Advances in Agriculture. Vol 2014, pgs 10.
- Kamel A. H., Application of a Hydrodynamic MIKE 11 Model for the Euphrates River in Iraq, 2008, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 6, pgs. 1-7.
- Kristensen, K. J. and Jensen, S. E., A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration, Royal Veterinary and Agricultural University, 1975, Nordic Hydrology, Vol. 6, pgs. 170-188.
- Lane, E.W y Kalinske, A. A., Engineering calculations of suspended sediment, Trans. Am. Geophys. Union, 1941, Vol. 22, pgs. 603-607.
- Larsen P. T., Stocker C. Alberdi Á E. y Jacobsen T., Flood forecasting system based on the distributed hydrological model MIKE SHE_MIKE 11, 2010.
- Lee, B., Lessler, J., and Stuart, E.A., Improving propensity score weighting using machine learning, 2009, Statistics in Medicine, Vol. 29, No. 3, pgs. 337-346.
- Liu Hai-long., Chen Xi., Bao An-Ming., Wang Ling, Investigation of groundwater response to overland flow topography using a coupled MIKE SHE/MIKE 11 modeling system for an arid watershed, 2007, Journal of Hydrology, Vol. 347. Pgs. 448-459.
- Lorente J. M., Casas C., Rodríguez R. y Redaño Á., Fenómenos meteorológicos adversos en España, Capítulo 1, Intensidades Extremas y precipitación máxima probable, 2013, pgs. 149.
- Maass M. La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala. Publicado en: El Manejo Integral de Cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Segunda Edición. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. 2007. Pag 65-77.
- Maldonado M. J., Martínez G. A., Matajira S. F., Elaboracion Curvas IDF Estaciones: Cinera Villa Olga y Santa Isabel, Municipio de Cúcuta, Colombia, 2007, Grupo de investigaciones ambientales (GIAAS), Vol. 2 No. 2, pgs. 80-94.

- Marín E. M., Hidrología Práctica, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, 2005.
- Martín J. V., Ingeniería de Ríos, Primera Edición, EDICIONS UPC, 2002.
- Martínez Y., Hernández R y Ortiz R. R., Prácticas de electroanalítica Parte I Conductimetría y Potenciometría, Universidad de los Andes Facultad de Ciencias Departamento de Química Laboratorio de Análisis Instrumental, 2006, pgs. 5.
- McCaffrey, D. F., Ridgeway, G., y Morral, A. R., Propensity Score Estimation With Boosted Regression for Evaluating Causal Effects in Observational Studies, 2004, Psychological Methods, Vol. 9, pgs. 403-425.
- Medina R. R., Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia, Universidad tecnológica de Pereira, Colombia, 2008.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Guía Técnica de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS), 2014.
- Monsalve G. Sáenz., Hidrología en la Ingeniería, Escuela Colombiana de ingeniería, segunda edición, 1999.
- Muñoz C. R. y Ritter R. A., Hidrologia Agroforestal, 2005.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, 2006.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo, Nueva York, 1997.
- Organización Mundial de Meteorología (OMM), Manual for estimation of probable maximum precipitation. Operational hydrology, 1986, Report. 1, WMO-No. 332, pgs 269.
- Otero G., Imputación de datos faltantes en un Sistema de Información sobre Conductas de Riesgo, 2011.
- Panreac Applichem ITW Reagents y Laboaragón J. S., Determinación de Nitrógeno por el Método Kjeldahl, 2015.
- Pan W., y Bai H., Propensity Score Analysis Fundamental and Developments, 2015.
- Patón M. V., Ricks Analysis if the Vidaa River System, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- Paul Christen Røhr, A hydrological study concerning the southern slopes of Mt Kilimanjaro, Tanzania, Faculty of Engineering Science and Technology Department of Hydraulic and Environmental Engineering, 2003.
- Pizarro R., González P., Wittersheim M., Saavedra J., Soto C. Elementos técnicos de hidrología III, Talca-Chile, Universidad de Talca, 1993.
- Pizarro T. R., Balocchi C. F., Andrade V. F., Sangüesa P. C., Vargas B. J., Morales C. C., VeraC. M., Valdés P. R., Vallejos C. C., Mendoza M. R.,

Olivares S. C., Abarza M. A., Fuentes L. R., Análisis Comparativo de Tres Hidrógramas Unitarios Sintéticos en Dos Cuencas Mediterráneas de Chile, Región de Maule, Chile, 2013.

- Pizarro T. R., Flores V. J., Sangüesa P. C., Martínez A. E. Hidrología aplicada al manejo de cuencas, Módulo 2 Curvas Intensidad Duración Frecuencia, Sociedad Estándares de Ingeniería para aguas y Suelos LTDA, 1996.
- Puyol A. B. y Villa M. J., Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2006.
- Refsgaard, J. C. y Storm B., MIKE SHE IN: Computer models of Watershed Hydrology, V. P. Singh Ed., Water Resources Publications, Colorado, USA, 1995, pgs. 809-846.
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales, Sección II, Título D, 2000.
- Resolución 865 del 2004, metodología propuesta por el IDEAM adoptada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, 2004.
- Rijn, L. C. Van, Part I: Bed load transport, 1984, Journal Hyd. ENG., Vol.110.
- Rijn, L. C. Van, Part II: Suspended load transport, 1984, Journal Hyd. ENG, Vol. 110.
- Rivera H. G., Marín R. M. y Vanegas R., Metodología de cálculo del índice de escasez, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá-Colombia, 2004.
- Rojo Hernández, Morfométrica de cuencas, 2008. Disponible en: <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>.
- Rosenbaum, P. R., y D. B. Rubin, The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects, 1983, Biometrika, Vol. 70, No. 1, pgs. 41-55.
- Rubin, Donald B., Bayesian Inference for Causal Effects: The Role of Randomization, 1978, Annals of Statistics, Vol. 6, No. 1, pgs. 34–58.
- Rubin, D. B., Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys, Wiley, New York, 1987.
- Salager J. L., Laboratorio de formulación, interfases reología y procesos, Cuaderno FIRP S554-A – Modulo de enseñanza en fenómenos interfaciales en español, Granulometría Teoría. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, 2007.
- Sánchez F. J., Transporte de contaminantes, Universidad de Salamanca, España, Departamento de Geología, 2012.

- Schreiner, L. C. y Reidel, J. T., Probable maximum precipitation estimates. United States east of 105th meridian, Hydrometeorological Report 51, U. S. National Weather Service: Washington D.C., 1978.
- Schumm S., The fluvial system, A Wiley–Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1956.
- Setoguchi, S., Schneeweiss, S., Brookhart, M. A., Glynn, R. J., y Cook, E. F., Evaluating uses of data mining techniques in propensity score estimation: A simulation study, 2008, Pharmacoepidemiology Drug Safety, Vol. 17, No. 6, pgs. 546-555.
- Silva G., Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama, estado Mérida, Venezuela, 1999, Revista Geográfica Venezolana, Vol. 40, No. 1, pgs. 9-42.
- Silva A., Ponce De León J., García F. y Durán A., Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay, Boletín de Investigación N° 10, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, 1988.
- Smart, G. M. y Jaeggi, M. N. R., Sediment transport on steep slopes, Mitteilung nr, 64 of the laboratory for Hydraulics, Hydrology and Glaciology at the federal technical university, Zurich, 1983.
- Statal Solutions, Predictive Model Based Multiple Imputation Features, 2014. Disponible en: <http://www.statsols.com/products/solas-for-missing-data>.
- Strahler, A., Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, 1952, Bulletin of Geological Society of America, Vol. 63, pgs. 1117- 1142.
- Strahler, A. N., Quantitative Analysis of watershed Geomorphology, American Geophysical Union, 1957, Disponible en: <http://www.uvm.edu/~pdodds/teaching/courses/2009-08UVM-300/docs/others/1957/strahler1957a.pdf>
- Témez J. R., Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales, 2003, Revista de Obras Públicas, Vol. 3430, pgs. 47-51.
- Tholin A., Keifer C., The Hydrlogy of Urban Runoff: Journal of the Sanitary Engineering Divison, ASCE, 1959, Vol. 85, pgs. 47-106.
- Thompson J. R., Sørensen H. R., Gavin H. y Refsgaard A., Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England, 2004, Journal of Hydrology. Vol 293. Pgs. 151-179.
- Torres A. A., Apuntes de clase sobre hidrologia Urbana, Editorial pontificia Universidad Javeriana, 2004.

- Ucross L. P., Análisis Químico Instrumental, Turbidimetría, 2014. Disponible en: <http://lauraucross.blogspot.com.co/>
- United States Department of Agriculture (USDA), National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, Soil Conservation Service, Washington DC, USA, 1985.
- Vélez, J. U. y Botero A. G., Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rizado en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales, 2010, Journal Dyna, No. 165. pgs. 58-71.
- Warnock R., Valenzuela J, Trujillo A., Madriz P. y Margaret G., Área Foliar, Componentes Del Área Foliar Y Rendimiento De Seis Genotipos De Caraota, 2006, Agronomía Tropical. Vol. 56, No. 1. pgs 21-42.
- Wiesner C., Hydrometeorology, Chapman and Hall: London, 1970, pgs 232.
- Wilks S. S., Certain generalizations in the analysis of variance, 1932. Biometrika, Vol. 24, pgs. 471-94.
- Williams R., Missing Data Part II: Multiple Imputation. University of Notre Dame, 2015.
- Zdrzewicz I., Water balance modeling using MIKE BASIN, First International Conference within EU project NEYMO Bogatynia, 2013. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/aag/2014/924948/>
- Zio M. y Guarnera U., A Semiparametric Predictive Mean Matching: An Empirical Evaluation, Statistical commission and economic commission for Europe, Conference of European statisticians, 2006.