

Maestría en Ingeniería Civil

**Análisis de riesgo del sistema de captación del acueducto de
Ibagué-Tolima, por procesos erosivos en la cuenca del Río
Combeima**

Isabel Cristina Rojas Rodríguez

Ing. Civil

Bogotá, D.C., 25 de julio de 2019



**Análisis de riesgo del sistema de captación del acueducto de
Ibagué-Tolima, por procesos erosivos en la cuenca del Río
Combeima**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Geotécnia.**

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Ing. Civil M.Sc. PhD.

Director

Luis Eduardo Peña Rojas

Ing. Civil Esp. M.Sc. PhD.

Codirector

Bogotá, D.C., 25 de julio de 2019



La tesis de maestría titulada “Análisis de riesgo del sistema de captación del acueducto de Ibagué-Tolima, por procesos erosivos en la cuenca del Río Combeima”, presentada por Isabel Cristina Rojas Rodríguez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotécnica.

Director de la tesis

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Codirector de la tesis

Luis Eduardo Peña Rojas

Jurado 1

Edgard Robert Barbosa Cruz

Jurado 2

Xavier Laloum

A Dios por ser mi guía y fortaleza, por estar siempre conmigo en este camino.

A mis padres Fabio Rojas y Myriam Cristina Rodríguez por su amor, apoyo y sacrificio ustedes han sido siempre mi ejemplo a seguir, a ustedes debo todo lo que soy.

A mis hermanos Diana Sofía y Fabio H. por su compañía, en especial a mi hermana por escucharme cuando me encuentro perdida dándome valiosos consejos, gracias nana.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud al ingeniero Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, mi tutor por sus valiosas asesorías por haberme ofrecido sus conocimientos y ser un referente para mí en la ingeniería civil particularmente en la ingeniería geotécnica, gracias ingeniero por sus enseñanzas no solo durante mi proceso de tesis sino durante mis estudios de maestría.

De igual forma quiero agradecer de manera especial al ingeniero Luis Eduardo Peña Rojas mi codirector de tesis, quien con sus conocimientos y gran trayectoria me ha guiado en todo este proceso enseñándome desde temas relacionados con hidrología e hidráulica hasta a mejorar mi escritura, ingeniero gracias por su generosidad, por impulsarme y ayudarme a culminar esta meta que con la ayuda de Dios será el inicio de muchas más.

A mis amigos Luisa Fernanda Rojas, María Paula Susunaga y Edwin Alejandro Yela por su compañía y ayuda siempre, por estar presentes en mi vida, por sus palabras de ánimo cuando más las necesité.

Al ingeniero Héctor García Manchola por ser un gran amigo y haberme introducido en el área de la ingeniería civil que más me gusta, la geotecnia.

Al ingeniero Jorge Armando Hernández por sus orientaciones en ArcGis y al ingeniero Carlos Domínguez por su ayuda oportuna ambos contribuyeron en el desarrollo de este trabajo que con seguridad mejorará la calidad de vida de nuestra ciudad, Ibagué.

A la Universidad de Ibagué y a la Escuela Colombiana de Ingeniería por haberme formado, en especial a la Universidad de Ibagué institución que ha sido mi casa por 10 años y me ha apoyado para realizar mis estudios de maestría.

Resumen

La erosión entendida como la degradación del suelo es un proceso que modifica la geometría de los taludes facilitando la ocurrencia de movimientos de remoción en masa y cuya deposición de partículas desagregadas a los cuerpos de agua se traduce en contaminación. De igual forma, ha podido encontrarse que los cambios de uso de suelo y el manejo inadecuado del mismo inciden en la pérdida de suelo y producción de sedimentos que a nivel de cuenca se depositan en el cauce principal del río.

Estas partículas elevan los niveles de turbiedad de las fuentes dificultando los procesos de potabilización como ocurre en la cuenca del Río Combeima donde el suministro de agua a la ciudad de Ibagué es interrumpido por el aumento de partículas transportadas.

Por lo anterior, este trabajo plantea como objetivo general desarrollar una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo físico del sistema de captación del acueducto de Ibagué – Tolima por procesos erosivos de la cuenca del Río Combeima, considerando diferentes condiciones de uso de suelo. Para esto se trabajó con el modelo hidrológico TETIS y su submodelo de sedimentos además del modelo hidráulico HEC-RAS.

Entre los resultados obtenidos se destaca la identificación de sedimentos producidos en la cuenca, así como la descripción de la magnitud de los eventos de crecidas e inundaciones relacionadas con usos del suelo como pastos, cultivos y bosques.

Índice general

Introducción	1
Justificación	3
Alcance del estudio	9
Objetivos	10
Capítulo I. Estado del Arte	11
1.1 Gestión integrada del riesgo de inundaciones	11
1.2 Efecto del cambio climático sobre el régimen de crecidas	12
1.3 Efecto de los cambios de uso del suelo	13
1.4 Evaluación de la amenaza	15
1.4.1 Amenaza de crecidas e inundaciones	18
1.4.2 Amenaza por erosión / transporte de sedimentos	20
1.5 Evaluación de la vulnerabilidad física	21
1.6 Riesgo de inundaciones en Colombia	22
Capítulo II. Metodología	24
2.1 Descripción área de estudio	24
2.1.1 Sistema de captación de Ibagué	32
2.2 Variables Hidroclimatológicas	37
2.3 Detección de tendencias en series hidroclimatológicas	40
2.4 Modelación hidrológica distribuida	41
2.4.1 Parámetros del modelo distribuido	49
2.4.2 Calibración modelo hidrológico	54
2.5 Tránsito de caudales y transporte de Sedimentos	56
2.5.1 Parámetros del modelo hidráulico	60
2.5.2 Calibración modelo hidráulico	61
2.6 Escenarios de simulación	61
2.7 Análisis de Frecuencia de Caudales Máximos	62
2.8 Evaluación del riesgo por crecidas asociado a la vulnerabilidad física de la captación	65
2.9 Evaluación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento por aumento en los niveles de turbiedad por procesos erosivos	67
2.10 Evaluación de la vulnerabilidad por desabastecimiento asociado a sedimentos producidos en el cauce	70

2.11 Evaluación de vulnerabilidad de desabastecimiento según localización de los sedimentos en la cuenca	71
Capítulo III. Resultados y discusión	73
3.1 Detección de tendencias en series hidroclimatológicas	73
3.2 Simulación y calibración del modelo hidrológico	73
3.3 Calibración sub-modelo de sedimentos	77
3.4 Evaluación de la producción de sedimentos en cambios de uso del suelo	81
3.5 Frecuencia caudales máximos	89
3.6 Evaluación del riesgo por crecidas e inundaciones	102
3.6.1 Estimación de la amenaza por crecidas e inundaciones	102
3.6.2 Estimación de la vulnerabilidad física por crecidas e inundaciones	105
3.6.3 Estimación de la vulnerabilidad de desabastecimiento por producción de sedimentos	107
3.6.4 Estimación del riesgo por crecidas e inundaciones	113
3.7 Evaluación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento por aumento en los niveles de turbiedad por procesos erosivos	115
3.7.1 Estimación de la amenaza por concentración de sólidos en suspensión	115
3.7.2 Estimación de la vulnerabilidad de operación de la planta de tratamiento	116
3.7.3 Estimación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento	117
Capítulo IV. Conclusiones	120
Capítulo V. Referencias	123
Anexo A. Mapas coeficientes de Manning	139
Anexo B. Mapas profundidad del flujo en escenarios de cambios de uso del suelo	141
Anexo C. Mapas velocidad del flujo en escenarios de cambios de uso del suelo	143
Anexo D. Mapas esfuerzos cortantes en escenarios de cambios de uso del suelo	145
Anexo E. Mapas Amenaza por crecidas en escenarios de cambios de uso del suelo	147
Anexo F. Mapas Vulnerabilidad física en escenarios de cambios de uso del suelo	149
Anexo G. Mapas Vulnerabilidad por desabastecimiento en escenarios de cambios de uso del suelo	151
Anexo H. Mapas riesgo de crecidas en escenarios de cambios de uso del suelo	153

Índice de Tablas

Tabla 1. Indicadores del servicio de Acueducto Zona Urbana de Ibagué 2015	5
Tabla 2. Calidad de la Fuente de abastecimiento según grado de polución.	5
Tabla 3. Registro de nivel de turbiedad de agua en la fuente.	7
Tabla 4. Listado de estaciones meteorológicas Combeima	37
Tabla 5. Tabla de texturas USDA	44
Tabla 6. Tamaño y velocidad de partículas	44
Tabla 7. Factor C	46
Tabla 8. Factor P	47
Tabla 9. Escenarios de simulación	49
Tabla 10. Parámetros del suelo y edafología en relación con los escenarios de uso del suelo con punto de cierre en la estación Montezuma.	53
Tabla 11. Factores correctores y variables de estado modelo hidrológico TETIS.	55
Tabla 12. Factores correctores submodelo de sedimentos TETIS.	55
Tabla 13. Amenaza por crecidas.	65
Tabla 14. Amenaza por crecidas en cada escenario.	66
Tabla 15. Vulnerabilidad física por crecidas.	66
Tabla 16. Vulnerabilidad física por crecidas en cada escenario.	66
Tabla 17. Riesgo físico por crecidas en cada escenario.	67
Tabla 18. Riesgo físico por crecidas.	67
Tabla 19. Vulnerabilidad de la planta de tratamiento por aumento de turbiedad.	69
Tabla 20. Riesgo de desabastecimiento por aumento de turbiedad.	69
Tabla 21. Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua.	70
Tabla 22. Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua en cada escenario.	70
Tabla 24. Parámetros de Calibración evento de 2007.	74
Tabla 25. Parámetros de Calibración del submodelo de sedimentos para el evento de 2007.	80
Tabla 26. Nomenclatura de las estructuras.	84
Tabla 27. Tamaño de granos definidos en HEC RAS para modelo cuasi estático.	86
Tabla 28. Presentación de algunas granulometrías empleadas en la caracterización del lecho del río.	87
Tabla 29. Análisis de Frecuencia Caudales Líquidos máximos con punto de cierre en Montezuma	90
Tabla 29. Amenaza por concentración de sólidos en suspensión	116
Tabla 30. Vulnerabilidad de la planta ante diferentes escenarios y periodos de retorno.	117
Tabla 31. Riesgo de desabastecimiento ante diferentes escenarios y periodos de retorno.	118

Índice de Figuras

Figura 1. Tipología del sistema de acueducto de la ciudad de Ibagué.	4
Figura 2. Número de desastres por eventos a nivel global periodo entre 1971 y 2018	15
Figura 3. Personas totales afectadas por eventos en miles a nivel global periodo entre 1971 y 2018	16
Figura 4. Total de daños económicos en billones de US\$ (escala 2006) por eventos a nivel global periodo entre 1971 y 2018	16
Figura 5. Numero de desastres por tipo a nivel global periodo entre 1971 y 2018	18
Figura 6. Número de eventos por tipo de desastre en Colombia en el periodo entre 1971 y 2019	19
Figura 7. Porcentaje de muertos y personas afectadas por tipo de desastre en Colombia en el periodo entre 1971 y 2019	20
Figura 8. Localización general de la cuenca del Río Combeima – Colombia	24
Figura 9. Comportamiento bimodal de la precipitación en la Estación meteorológica Pastales.	25
Figura 10. Localización de bocatoma y estación Montezuma en el Cañón del Combeima.	27
Figura 11. Imagen Landsat TM zona de Fallas Pericos e Ibagué, Ibagué – Tolima.	29
Figura 12. Mapa de geología estructural del Cañón del Combeima.	31
Figura 13. Distribución espacial de la precipitación mensual en la cuenca del Río Combeima. a) Enero. b) Febrero. c) Marzo. d) Abril. e) Mayo. f) Junio. g) Julio. h) Agosto. i) Septiembre. j) Octubre. k) Noviembre. l) Diciembre.	38
Figura 14. Distribución espacial de la temperatura mensual en la cuenca del Río Combeima. a) Enero. b) Febrero. c) Marzo. d) Abril. e) Mayo. f) Junio. g) Julio. h) Agosto. i) Septiembre. j) Octubre. k) Noviembre. l) Diciembre.	39
Figura 15. Esquema tridimensional de tanques del modelo TETIS.	41
Figura 16. Modelo de tanques conceptual TETIS	42
Figura 17. Parámetros morfológicos de la Cuenca. a) Modelo de elevación digital. b) Dirección de flujo c) Dirección acumulación. d) Pendientes.	50
Figura 18. Parámetros generales de la Cuenca. a) Unidades de suelos. b) Geología. c) Cobertura. d) Velocidad de percolación	51
Figura 19. Parámetros edafológicos de la Cuenca años 2002 y 2007. a) Hu año 2002. b) Ks año 2002. c) Kss año 2002. d) Hu año 2007. e) Ks año 2007. f) Kss año 2007	52
Figura 20. Coberturas de suelo años 2002 y 2007 en la cuenca del Río Combeima. a) Cobertura del suelo año 2002. b) Cobertura reclasificada por unidad general año 2002. c) Cobertura del suelo año 2007. d) Cobertura reclasificada por unidad general año 2007.	54
Figura 21. Caudales máximos anuales en el Río Combeima.	56
Figura 22. Estaciones y esquematización del sistema hidráulico a modelar (cuenca del Río Combeima, Ibagué –Tolima).	57

Figura 23. Tipos de daño por inundación.	65
Figura 24. Calibración evento 2008.	73
Figura 25. Validación evento 2003.	75
Figura 26. Caudales simulados para los escenarios de 2007, bosque, pasto y cultivo registro de 44años.	76
Figura 27. Mapas de C, P, K, arena, limo y arcilla en la cuenca del Río Combeima. a) C. b) P. c) K. d) Arena. e) Limo. f) Arcilla.	78
Figura 28. Calibración de caudal sólido.	79
Figura 29. Validación de caudal sólido.	80
Figura 30. Estimación de sedimentos producidos en todos los escenarios de cambio de uso del suelo.	81
Figura 31. Caudales líquidos + sólidos en todos los escenarios de cambio de uso del suelo.	83
Figura 32. Presentación de algunas secciones transversales modeladas en el sector de estudio.	85
Figura 33. Representación de la función GEV para todos los escenarios de uso con punto de cierre en Montezuma	92
Figura 34. Mapa de coeficientes de rugosidad en el cauce del tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	94
Figura 35. Curvas factor de daño y profundidad de agua “Netherlands Later” (Klijn et al. 2007)	96
Figura 36. Altura de la lámina de agua en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	97
Figura 37. Velocidades en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	99
Figura 38. Esfuerzos cortantes en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	101
Figura 39. Profundidad efectiva en los escenarios de uso de suelo para TR 100 años. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	102
Figura 40. Concentración de sedimentos en los escenarios de uso de suelo para TR 100 años. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	103
Figura 41. Amenaza por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	104
Figura 42. Vulnerabilidad física por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	106
Figura 43. Vulnerabilidad de desabastecimiento en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	108
Figura 44. Sedimentos tamaño arena en cantidades mayores a 45% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) cantidad de arena >45% en pendientes de 50-75%. b) cantidad de arena >45% en pendientes >75%	109

Figura 45. Sedimentos tamaño limo en cantidades mayores a 30% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) Limo >30% pendientes de 50-75%. b) Limo >30% pendientes >75%	110
Figura 46. Sedimentos tamaño arcilla en cantidades mayores a 10% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) Arcilla >10% pendientes de 50-75%. b) Arcilla >10% pendientes >75%	111
Figura 47. Vulnerabilidad de desabastecimiento por aporte de arenas, limo y arcilla en la cuenca del Río Combeima. a) Vulnerabilidad por aporte de arenas. b) Vulnerabilidad por aporte de limo. c) Vulnerabilidad por aporte arcilla	112
Figura 48. Riesgo por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.	114
Figura 49. Valores de Concentración de sólidos en suspensión vs turbidez.	115
Figura 50. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario 2007	139
Figura 51. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	139
Figura 52. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	140
Figura 53. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	140
Figura 54. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario 2007	141
Figura 55. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Pastos	141
Figura 56. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Cultivos	142
Figura 57. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Bosques	142
Figura 58. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	143
Figura 59. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	143
Figura 60. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	144
Figura 61. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	144
Figura 62. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	145
Figura 63. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	145
Figura 64. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	146
Figura 65. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	146
Figura 66. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	147
Figura 67. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	147
Figura 68. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	148
Figura 69. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	148
Figura 70. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	149
Figura 71. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	149
Figura 72. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	150

Figura 73. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	150
Figura 74. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	151
Figura 75. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	151
Figura 76. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	152
Figura 77. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	152
Figura 78. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007	153
Figura 79. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos	153
Figura 80. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos	154
Figura 81. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques	154

Lista de Símbolos

Capítulo II

Subcapítulo 2.3

S : estadístico del Test Mann Kendall

X_j y X_i : valores de serie temporal del test Mann Kendall

n : longitud de la serie temporal del test Mann Kendall

t_p : número de grupos para un valor de p del test Mann Kendall

p y q : número de valores atados en la prueba del estadístico S del test Mann Kendall

Z : tendencia de test Mann Kendall

Subcapítulo 2.4

W_{oj} : factor de ponderación del método del inverso de la distancia al cuadrado

x_o y y_o : distancia de un punto o celda donde se quiere estimar el valor de la variable

x_j y y_j : estaciones de medición

n : número de estaciones de medición empleadas

β : variación de X con la altura

X_o : variable en el punto de interés

X_f : valor puntual registrado en cada estación de medición

qt : ecuación modificada de capacidad de transporte

S : Pendiente del terreno o ladera

Q : Caudal

W : ancho del canal

K : factor erosionabilidad del suelo

C : factor cultivo y manejo del suelo

P : factor de prácticas de conservación

A : pérdida del suelo

R : factor por erosividad de la lluvia

L : longitud de la ladera

T_j : periodo de tiempo para intervalos de lluvia homogéneo

I_{30} : máxima intensidad de lluvia

j : intervalos

n : número de intervalos

I_j : intensidad de lluvia del intervalo

MO : porcentaje de materia orgánica

E : parámetro de estructura

p : parámetro de permeabilidad

x : componente horizontal de la ladera

Z_m : Zona Militar

Z_u : Zona Urbana

I_r : Instalaciones recreativas

Lg: Cuerpo de agua
 Vr: vegetación rupícola
 MKB: Consociación Alic Hapludands
 MKG: Consociación Typic Hapludands
 MQC: Asociación Typic Humitropepts - Typic Troorthents
 MQD: Asociación Typic Eutropepts- Typic Troorthents-Entic Hapludolls
 MQE: Asociación Typic Troorthents – Typic Dystropepts
 MDA: Grupo Indiferenciado Thaptic Haplocryands Y Lithic Cryorthents Y Typic Cryaquents
 MGA: Consociación Typic Melanudands
 MGB: Grupo Indiferenciado Lithic Troorthents, Lithic Hapludands Y Lithic Tropofolists
 MGC: Consociación Typic Hapludands
 MWD: Asociación Afloramientos Rocosos - Typic Ustorthents
 NP: Consociación NO SUELO - nieve perpetua
 PWD: Consociación Typic Haplustalfs
 PWL: Grupo Indiferenciado Typic Ustifluvents, Vertic Haplustalfs Y Typic Ustipsamments
 MQO: Grupo Indiferenciado Typic Tropofluvents Y Aerice Tropaquepts
 MKI: Consociación Fluventic Humitropepts
 MQH: Asociación Typic Dystropepts - Typic Troorthents
 MQJ: Consociación Typic Troorthents
 MWA: Asociación Lithic Ustorthents - Typic Ustorthents
 MWC: Asociación Usticdystropepts-Lithic Ustorthents
 MWJ: Asociación Entic Haplustolls - Ustic Dystropepts
 PWH: Asociación Typic Ustorthents-Lithic Ustorthents - Typic Natrustalfs
 MAA: Consociación NO SUELO – afloramientos rocosos
 MKD: Consociación TYPIC TROPORTHENTS
 Hu: almacenamiento estático del suelo
 Ks: permeabilidad superficial del suelo
 Kss: permeabilidad horizontal del suelo
 Kp: capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso
 Ksa: permeabilidad horizontal del estrato rocoso
 Kps: capacidad de percolación profunda
 Vt: velocidad de flujo superficial en ladera
 I_{max}: características de la vegetación
 NSE: índice de Nash
 \hat{Q}_i : caudal simulado
 Q_i : caudal observado
 \bar{Q}_i : valor medio de los caudales observados

Subcapítulo 2.5

C_m : concentración de descarga de sedimentos
 γ : peso unitario del agua
 d_s : diámetro de la partícula

D : profundidad de flujo efectiva
 τ'_o : esfuerzo cortante en el lecho por la resistencia de los granos
 τ_c : esfuerzo cortante crítico en el lecho
 $f\left(\frac{u}{\omega}\right)$: relación de velocidad de corte y velocidad de caída
 ω : velocidad de caída de las partículas
 ν : viscosidad cinemática
 s : gravedad específica de las partículas
 g : aceleración debido a la gravedad
 Deq : Profundidad de equilibrio
 d_i : diámetro de la partícula
 D : profundidad donde no hay transporte de granos
 q : descarga de agua

Subcapítulo 2.7

$F(x)$: probabilidad acumulada
 $f(x)$: función de densidad
 α : parámetro de escala
 β : parámetro de posición
 p : nivel de probabilidad
 xq : cuantil para p
 $\mu\beta = \widehat{\mu}\widehat{\beta} = \beta$: media o el parámetro de posición de la distribución LogNormal
 $\sigma\alpha = \widehat{\sigma}\widehat{\alpha} = \alpha$: desviación estándar del logaritmo de la serie o el parámetro de escala de la distribución LogNormal
 $L(\alpha, \beta)$: función de verosimilitud distribución Gumbel
 N : número de observaciones aleatorias $(x_1 \dots, x_N)$
 μ : media de la serie de datos $(x_1 \dots, x_N)$
 x_i : variable independiente
 k : parámetro de forma de la función GEV

Subcapítulo 2.8 y 2.10

Q : caudal líquido
 v : velocidad del flujo
 h : profundidad del tirante de agua
 Tr : periodo de retorno
 τ : esfuerzo cortante
 $Qsólido$: caudal sólido

Subcapítulo 2.9

CSS: concentración de sólidos en suspensión
UNT: Unidad nefelométrica de turbidez

Subcapítulo 2.11

A: arena

L: limo

Ar: arcilla

S: pendiente

L_A: localización de arenas

L_L: localización de limos

L_{Ar}: localización de arcillas

*S*_{<50%}: pendiente inferior a 50%

*S*_{50-75%}: pendiente entre 50 y 75%

*S*_{>75%}: pendiente superior a 75%

*A*_{<20%}: cantidad de arena inferior a 20%

*A*_{20 - 40%}: cantidad de arena entre 20 y 40%

*A*_{>40%}: cantidad de arena superior a 40%

*L*_{<25%}: cantidad de limo inferior a 25%

*L*_{25 - 30%}: cantidad de limo entre 25 y 30%

*L*_{>30%}: cantidad de limo superior a 30%

*Ar*_{<4%}: cantidad de arcilla inferior a 4%

*Ar*_{4 - 10%}: cantidad de arcilla entre 4 y 10%

*Ar*_{>10%}: cantidad de arcilla superior a 10%

Am: amenaza

VL: vulnerabilidad

R: riesgo

Introducción

La erosión es un proceso de denudación y transporte de granos de suelo (Römken et al., 2002) dada en la superficie del terreno y que puede variar con relación a los cambios de uso del suelo (Zuo et al., 2016) que haya en la zona. La erosión puede ocurrir por acción del agua o el viento aportando grandes volúmenes de partículas contaminantes a los cuerpos de agua (Suárez, 2001). Es así como puede considerarse que los sedimentos son el material contaminante más común del agua (Holz, et al., 2015) encontrándose como partículas en suspensión en las cuencas hidrográficas (Sadeghi & Mizuyama, 2007).

Los sedimentos producen altos niveles de turbiedad y de sedimentación en las corrientes de agua alterando los ecosistemas presentes y modificando las características hidráulicas del río (Ongley & FAO, 1997), donde dependiendo del flujo y tamaño de sedimentos el lecho del mismo puede ir construyéndose o deformándose (Chaudhry, 2008) siendo así los procesos de sedimentación un factor que afecta la vida útil de los embalses (Zhang et al., 2014).

En esta tesis se analizará la evaluación del riesgo por erosión de la cuenca del Río Combeima estimando los sedimentos producidos en escenarios de cambio de uso del suelo y su relación con el desabastecimiento de agua para el consumo humano de la ciudad de Ibagué. La cuenca del Río Combeima está localizada en la cordillera central y tiene una extensión de 27421 Ha (CONPES, 2009) su corriente principal es el Río Combeima con una longitud de 57.8 km desde el volcán Nevado del Tolima lugar donde está su nacimiento hasta desembocar en el Río Coello (Ospina Zúñiga, 2015). El Río Combeima es un drenaje del volcán Nevado del Tolima (Khabarov et al., 2011) que abastece el acueducto de la ciudad de Ibagué y cuyos niveles de turbiedad entre 3000 UNT y 152000 UNT en temporadas de lluvia (asociado a los sedimentos aportados al agua) ha influido en la dificultad de operación de la Planta de tratamiento y por ende en interrupciones frecuentes del servicio de agua potable (Superservicios, 2013).

En consecuencia surge la necesidad de plantear un estudio que pueda contribuir al mejoramiento de las condiciones de suministro de agua potable de la ciudad de Ibagué teniendo en cuenta la importancia que tienen los procesos erosivos en una cuenca, es así

como esta investigación se centra en los siguientes objetivos: *i)* evaluación de la amenaza por crecidas y procesos erosivos asociados a la producción de sedimentos, *ii)* evaluación de la vulnerabilidad física de la estructura de captación de la ciudad de Ibagué ante la ocurrencia de crecidas; y *iii)* evaluación del riesgo de desabastecimiento hídrico relacionado con la producción de sedimentos en la cuenca del Río Combeima.

En este trabajo se busca analizar el riesgo por erosión y su relación con el aprovechamiento de agua para el consumo humano en la ciudad de Ibagué, mediante la descripción de la producción de sedimentos a escala de cuenca y el transporte de sedimentos en el cauce del Río Combeima. Para tal fin, se implementó el modelo hidrológico distribuido TETIS (Francés et al., 2007) y el submodelo de sedimentos (Bussi et al., 2014) para describir la producción de sedimentos en la cuenca del Río Combeima en escenarios de cambios de uso del suelo. Los resultados obtenidos de la modelación hidrológica constituyó información de entrada para la implementación del modelo hidráulico con el cual se describió el tránsito de caudales y transporte de sedimentos, en este caso el modelo River Analysis System del Hydraulic Engineering Corp del Ejército de los Estados Unidos, más conocido como HEC-RASv5.0 (US Army Corps of Engineers, 2016). Con base a lo anteriormente expuesto, se genera la información necesaria para la evaluación del riesgo físico de la estructura de captación dentro de la cuenca del Río Combeima y el riesgo por desabastecimiento del servicio de agua potable.

Entre los resultados obtenidos se destaca la identificación de producción de sedimentos en relación con los usos del suelo, la descripción de la magnitud de los eventos de crecidas e inundaciones relacionadas con usos del suelo como pastos, cultivos y bosques. Dichos resultados permitieron identificar relaciones potencialmente son útiles en los procesos de planificación de cuencas e implementación de medidas no estructurales para la mitigación de efectos causados por las inundaciones y su relación con el riesgo asociado al abastecimiento hídrico de la ciudad de Ibagué.

Justificación

Con base al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2019) la escasez de agua es un problema global que afecta más del 40% de la población, motivo por el que se plantea como objetivo 6 dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) una medida direccionada al agua limpia y saneamiento que permita mitigar la escasez de este fluido. Así mismo y con miras a la preservación del agua y la salud se han elaborado documentos como las Guías para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006) en las que se menciona el tratamiento que puede darse al agua dependiendo de la fuente contaminante ya sea orgánica (microorganismos) o inorgánica (provenientes de rocas y sedimentos) lo cual ha permitido adoptar reglamentos que faciliten las comunidades tomar decisiones y planear.

Conforme a la información presentada por el Ministerio de Salud y Protección Social (2018) en el informe nacional de calidad del agua para consumo humano INCA 2016, Colombia a 2016 tenía un Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) de 21.6 mostrando que el nivel de riesgo a la ocurrencia de enfermedades por contaminación del agua del departamento es medio, de igual modo se observa que Ibagué capital del Tolima de acuerdo a este mismo informe tiene un IRCA municipal a 2016 de 40.2 lo que lo pone en un nivel de riesgo Alto, de manera que se hace evidente la necesidad de adoptar medidas que permitan mejorar la situación de suministro de agua a la población.

De manera análoga se ha observado que el municipio de Ibagué (Tolima) ha presentado numerosos problemas en el servicio de acueducto de la ciudad asociados a procesos erosivos motivo por el que se realizan cortes frecuentes del suministro de agua, principalmente durante las temporadas invernales en los meses de: abril y mayo; septiembre, octubre y noviembre, debido a incrementos de la turbiedad del agua generada por el arrastre de sólidos y deposición de los mismos en la estructura de captación del sistema.

El suministro de agua para consumo humano es efectuado directamente por el municipio a través de la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado, IBAL S.A. E.S.P., en adelante se denominará IBAL S.A. E.S.P. y por acueductos de tipo comunitario que abastecen la ciudad en aquellas partes en las que técnicamente no lo puede hacer la

empresa oficial con el sistema actual existente (Gálvez, 2002) debido a la topografía del lugar.

Con base en la información disponible en el Plan de Desarrollo 2016-2019 del municipio de Ibagué, el IBAL tiene una cobertura del servicio de acueducto en la ciudad del 90.1% de la ciudad y se abastece de tres fuentes: el Río Combeima del cual capta 1860 ls⁻¹, de la quebrada Cay 100 ls⁻¹ y 60 ls⁻¹ de la Quebrada Chembe (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2017c). Sin embargo, la continuidad del servicio se ve afectada debido que aumentan los niveles de turbiedad y transporte de sedimentos en el Río Combeima en temporadas de lluvias lo cual produce cortes en la captación y suministro de agua en las plantas de tratamiento de agua potable Pola 1 y Pola 2 (Figura 1) por la dificultad de tratamiento debido a las altas turbiedades, esto aunado a la insuficiencia de la capacidad de la infraestructura a 2015, el deterioro de la bocatoma del Combeima, las conexiones fraudulentas, las fugas de agua no detectadas a tiempo y la disminución de las fuentes hídricas por el fenómeno de El Niño permiten evidenciar interrupciones en la continuidad del servicio que según reporte de la Alcaldía municipal de Ibagué (2016) es de 6 hr d⁻¹ en 66 barrios de la ciudad.

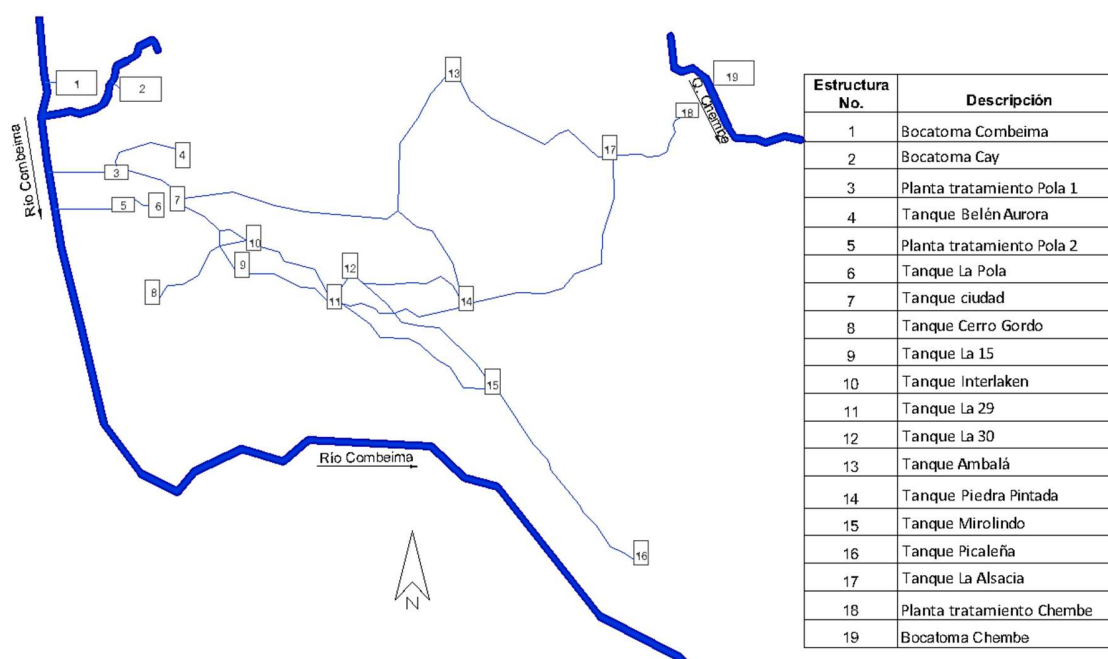


Figura 1. Tipología del sistema de acueducto de la ciudad de Ibagué.

Fuente: Autor.

De igual forma se identifica que el promedio anual de la continuidad del servicio de agua potable a diciembre 2015 es de 21.4 hr d⁻¹ como se muestra en la Tabla 1, en gran parte como consecuencia del aumento en los niveles de turbidez (del agua) por el aporte de partículas al cauce generados por procesos erosivos y movimientos en masa en las microcuencas que componen el Combeima y que son arrastrados por el río.

Tabla 1. Indicadores del servicio de Acueducto Zona Urbana de Ibagué 2015

Indicadores	Valor
Índice de Riesgo de Calidad del Agua	13.00%
IRCA del agua prestada por el IBAL S.A. E.S.P. Oficial	0.10%
Cobertura del servicio de acueducto	90.10%
Índice de continuidad del servicio de acueducto urbano	21.4 hr d ⁻¹
Índice de agua no contabilizada –IANC	44.60%

Fuente: (Alcaldía municipal de Ibagué, 2016).

La turbiedad o turbidez es una medida de la calidad del agua que se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (UNT), la cual no debe superar según el Título C en la tabla C.2.1 del RAS 2000 (Normatividad colombiana vigente) a 2 UNT para clasificar la fuente como aceptable de ahí que fuentes con valores mayores a 150 UNT son consideradas como muy deficientes. De no cumplirse lo anteriormente estipulado se requerirá la realización de un proceso de tratamiento adicional para su potabilización, como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Calidad de la Fuente de abastecimiento según grado de polución.

	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	< 2	2 - 4	40 - 150	150
Proceso de tratamiento utilizado			Desinfección + estabilización	Filtración lenta o filtración directa + Desinfección + estabilización	Pretratamiento + Desinfección + estabilización	Pretratamiento + Desinfección + estabilización + tratamientos específicos

Fuente: (República de Colombia et al., 2000)

La ocurrencia de lluvias y flujos torrenciales en el Combeima (Fotografía 1), posibilitan la producción y arrastre de gran cantidad de sólidos y microorganismos (tales como parásitos, bacterias, gérmenes y virus), en los que la turbidez del agua alcanza las 14000 UNT (Gutiérrez C. F., Jefe de Planeación IBAL, comunicación personal. Mayo 6 de 2016) o valores mayores, haciendo inadecuada la calidad de la misma.



Fotografía 1. Flujo torrencial y turbiedad de agua del Combeima.

Fuente: (Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado SA ESP Oficial (IBAL)., 2013)

Valores reportados por la IBAL SA ESP este año respecto a los aumentos de turbiedad del agua que han producido cortes en el servicio de suministro de agua potable a la ciudad en entre junio 2017 y julio 2018 se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Registro de nivel de turbiedad de agua en la fuente.

Reportes aumento turbiedad en el cauce del Río Combeima	
Fecha	Valores reportados de UNT
24/07/2018	38000
03/07/2018	40000
16/06/2018	30000
13/06/2018	36400
28/05/2018	42000
10/05/2018	63100
05/05/2018	50000
02/05/2018	87000
22/03/2018	18000
09/03/2018	3000
27/06/2017	152000

Fuente: (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2018d)

Cada vez que un evento de este tipo se presenta, la deposición de material en las estructuras (Fotografías 2a y 2b) obliga a la empresa de acueducto a detener el servicio de suministro mientras efectúa las obras de rehabilitación y potabilización necesarias, lo cual se traduce en mayores costos de mantenimiento al realizar limpieza continua por colmatación en la captación (Fotografía 2c).



a)



b.)



c)

Fotografía 2. Condición de la estructura de captación del acueducto de Ibagué. a). Arrastre de material del Río Combeima sobre la bocatoma en épocas de lluvia. b). Colmatación de unidades sedimentadoras; c). Remoción de sedimentos acumulados en los desarenadores del Combeima.

Fuente: (Empresa Ibaguerena de Acueducto y Alcantarillado SA ESP Oficial (IBAL)., 2013)

Por lo anterior, se han realizado estudios de evaluación de la turbiedad y la conductividad del Río Combeima en los periodos 2008 al 2012 (Ospina-Zúñiga et al., 2016), donde se encontró que los meses de abril, mayo, junio y julio presentan altos registros de lluvias y mayores aportes de partículas al cauce, información que permite a las entidades prestadoras del servicio de agua potable tomar medidas para el suministro de agua a la comunidad. De ahí que el reto actual de la investigación sea predecir el impacto del cambio de uso del suelo sobre la hidrología para lo que es necesario definir los procesos de escorrentía a escala de cuenca (H. Wheeler & Evans, 2009)

Alcance del estudio

El Combeima es una fuente hídrica importante para la prestación de servicios ambientales y para el desarrollo de actividades en la ciudad de Ibagué (CONPES, 2009) cuyo uso más importante es el abastecimiento de agua potable, y es a su vez, escenario de eventos naturales como inundaciones, avalanchas, deslizamientos y represamientos debido a la geomorfología de la zona. Con base en el diagnóstico presentado en el documento CONPES 3570 (2009), la ocurrencia de estos eventos influye en los procesos de degradación y desequilibrio de los ecosistemas y riesgos de pérdida de infraestructura física y social que amenazan la bocatoma del acueducto de Ibagué, motivo por el cual, se tendrán en cuenta los eventos registrados en el sector para la posterior identificación de amenazas en la estructura de captación del sistema de acueducto.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se propone en este trabajo de grado desarrollar una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo del sistema de captación del acueducto de Ibagué (Tolima), reconociendo su vulnerabilidad ante procesos erosivos de la cuenca del Río Combeima.

Dentro de la metodología propuesta se buscó realizar la simulación de escenarios de cambios de uso del suelo analizando la condición: cobertura de 2007, además de una cobertura homogénea de pastos, otra de cultivos y una de bosques, como estrategia para la evaluación de los efectos de uso del suelo en la cuenca sobre los caudales y producción de sedimentos. Posteriormente, se realiza la modelación del transporte de sedimentos en el tramo comprendido entre Juntas y Montezuma lugar donde está ubicada la bocatoma de Ibagué. Finalmente, se realiza la evaluación del riesgo a la interrupción del suministro de agua para acueducto en la ciudad de Ibagué debido al transporte de sedimentos en escenarios de cambio de uso del suelo en la cuenca del Río Combeima.

Objetivos

General: Desarrollar una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo físico del sistema de captación del acueducto de Ibagué – Tolima, por procesos erosivos de la cuenca del Río Combeima

Específicos

1. Evaluar la amenaza por crecidas y procesos erosivos asociados a la producción de sedimentos en la cuenca del Río Combeima.
2. Evaluar la vulnerabilidad física de la estructura de captación de la ciudad de Ibagué ante la ocurrencia de crecidas.
3. Evaluar el riesgo de desabastecimiento hídrico relacionado con la producción de sedimentos en la cuenca del Río Combeima.

Capítulo I. Estado del Arte

1.1 Gestión integrada del riesgo de inundaciones

La Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), introducida en la conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA) celebrada en Dublín (Irlanda) (1992), es definida por la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership, 2000) como una guía para la gestión del agua, el suelo y recursos afines (ONU-DAES, 2009), siendo este un medio que garantiza la seguridad hídrica en el mundo, gestionando el agua con criterio social, económico y ambiental (Aquabook, 2016).

Debido que los recursos son cada vez más limitados por el consumo en exceso, contaminación y cambio climático, la GWP establece con base a los resultados de la CIAMA de Dublín cuatro principios rectores y a partir de ellos recomendaciones que dan paso a medidas de uso local, nacional e internacional (Organización de las Naciones Unidas, 1992).

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible adoptada por la asamblea general de la ONU (2015) establece 17 Objetivos de los cuales el proceso del presente trabajo contribuye a cumplir las metas 6.4 y 6.5 del objetivo 6: garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos; las metas 11.1, 11.2 y 11.5 del objetivo 11: lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; las metas 13.1 del objetivo 13: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos y las metas 15.1 y 15.4 del objetivo 15: promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica de la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015)

De ahí nace el enfoque de la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas que tiene como fin optimizar y conseguir la igualdad respecto al bienestar socio-económico sin comprometer los ecosistemas (GWP, INBO, 2009). La OMM, en su documento Gestión integrada de crecidas: documento conceptual, considera que la cuenca es un sistema dinámico a la que se procura una mejora del funcionamiento mediante la búsqueda de un

equilibrio entre la necesidad de desarrollo y los daños de las crecidas, por lo que se considera las interacciones e intercambios entre los medios hidrológicos y la tierra, de este modo la gestión se centra en la fase ecológica del ciclo hidrológico teniendo en cuenta crecidas pequeñas, medianas e importantes (APFM, et al., 2009).

La gestión integrada de riesgo de inundaciones GIRI (ONU, 2007) corresponde a un tema de preocupación global asociado a la influencia del cambio climático, labores que se enfocan en la reducción de riesgos existentes y futuros relacionados con inundaciones (Sedano-Cruz, 2012),

Dentro del enfoque de la gestión integrada del riesgo de inundaciones se considera la aplicación de medidas estructurales, no estructurales e incluso la combinación de las dos anteriores en las que se propende por la protección de la infraestructura y la vida de las comunidades (Jha et al., 2011)

Estas medidas posibilitan que la población tanto a nivel nacional como local pueda enfrentarse de manera eficiente ante eventos que amenacen su bienestar, puesto que su enfoque incluye el desarrollo, planes de emergencias, prevención, recuperación y atenuación de efectos de los desastres (APFM et al., 2009), sin embargo para lograrlo es necesario un actuar conjunto de los gobiernos, instituciones educativas, ONU y de las empresas públicas y privadas (Jha et al., 2011)

1.2 Efecto del cambio climático sobre el régimen de crecidas

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas (1992) el cambio climático es el cambio de clima debido a la actividad humana que sumada a la variabilidad natural del clima altera la composición de la atmosfera mundial (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a). En este sentido se ha aceptado que el cambio climático influye en los eventos de crecidas de una cuenca hidrográfica toda vez que el régimen de precipitación y escorrentías son alterados (Bates et. al., 2008; APFM et al., 2009).

El cambio climático ha incrementado el riesgo de desastres (Daniels, 2017) puesto que modifica el patrón global y la intensidad en la que se presentan las inundaciones por lo que

la exposición de las poblaciones a estos eventos es mayor (Few, 2003). Así mismo, se ha observado que la magnitud de las crecidas depende de las condiciones de la cuenca, aunados a los factores climáticos, no climáticos, la intensidad, profundidad y tiempos de precipitación, la temperatura y vientos que afectan la fusión de nieve (APFM et al., 2009). Con base en lo anterior, se espera una mayor incidencia de crecidas en donde se presentan lluvias más violentas e intensas pero con una disminución en la frecuencia de los eventos (Trenberth et al., 2003, en APFM et al., 2009), es por esto que se ha identificado la necesidad de realizar análisis de las tendencias históricas de las series hidrológicas y meteorológicas (Ramesh, 2013), sin embargo debido a la incertidumbre existente respecto a los datos climáticos, hay poco entendimiento acerca del tema así como su impacto tanto en el pasado, presente y futuro en los recursos hídricos (Funtowicz & Ravetz, 1990).

Por otro lado ha podido observarse en estudios como el realizado por Lu et al. (2013), en ocho cuencas hidrográficas chinas mediante una evaluación cuantitativa que el cambio climático juega un papel importante en la producción de sedimentos, reportando que climas más cálidos y húmedos en zonas subtropicales tienen una mayor producción de sedimentos en comparación con precipitaciones bajas y temperaturas altas en zonas semiáridas y áridas.

1.3 Efecto de los cambios de uso del suelo

El uso del suelo es *"el resultado de los usos humanos de la tierra y las interacciones de los cambios climáticos globales en la superficie de la Tierra"* (Asner et al., 2005, en Kim, 2016, p. 183).

El cambio en el uso o cobertura del suelo influye en los procesos hidrológicos y ecológicos de una cuenca (Ali et al., 2011; Bronstert et al., 2002) las modificaciones asociadas a la disminución de bosques, el aumento de áreas de asentamiento, el cultivo intensivo y sobre pastoreo intervienen en la respuesta hidrológica de la cuenca (Alansi et al., 2009) puesto que cambia su capacidad de almacenamiento en la zona raíz y su capacidad de infiltración, además de favorecer la presencia de escorrentía en áreas urbanizadas e influir en la

interacción entre el suelo y la precipitación (Bronstert et al., 2002) lo que se refleja en una variación de la cantidad de sedimentos producidos por erosión laminar.

De acuerdo a lo anterior, actividades como la deforestación y urbanización reducen la capacidad de infiltración del terreno y por ende aumenta el coeficiente de escorrentía superficial (Ramesh, 2013), por lo que a medida que continúe urbanizándose la cuenca seguirán aumentando los volúmenes de escorrentía y descargas máximas producidas, pero cuyo manejo adecuado permite evitar riesgos por inundación (Ali et al., 2011), así mismo puede verse que la compactación del suelo de la agricultura o el sobrepastoreo del mismo influye en el aumento de la magnitud de las inundaciones (Alaoui et al., 2018).

Herramientas importantes en la investigación de los impactos potenciales del cambio de uso del suelo en la generación de inundaciones son: los escenarios espacialmente distribuidos del uso del suelo y los modelos hidrológicos (Niehoff et al., (2002); Wheeler, et al., (2017)). La selección del modelo hidrológico a emplear ya sea distribuido o agregado según Bronstert et al. (2002) depende de criterios como el comportamiento de la superficie del suelo y su zona no saturada, la distribución espacial, la resolución temporal de la precipitación e intervalos de tiempo, la dinámica del paisaje y la escala, esto con el fin de identificar los factores que intervienen en el desarrollo de escorrentía y que posteriormente posibilitan la generación de inundaciones.

La evaluación del impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía mediante la adopción de modelos empíricos y una escala de evento ha sido revisada en numerosos estudios (ej.: Ali et al. (2011); Sajikumar & Remya (2015); Zope et al. (2016)) lo que ha permitido evidenciar un aumento del volumen de escorrentía y descarga máxima en relación con el aumento de áreas urbanizadas supone un incremento del riesgo de inundación en la región.

Teniendo presente que los cambios de uso del suelo influyen especialmente en las características de escorrentía y sedimentos de una cuenca, es un parámetro que los planificadores deben tener en cuenta para adoptar medidas de conservación del suelo y el agua (Worku et al., 2017), convirtiéndose en un desafío la planificación del crecimiento del uso del suelo de manera que sea económicamente sostenible además de amigable con el medio ambiente (Singh, 2003).

1.4 Evaluación de la amenaza

La amenaza es entendida como la probabilidad de que suceda un evento natural o antrópico (CEPRENAC, 2009) que pueda causar potenciales daños a una comunidad ya sea en términos de pérdidas de vidas, degradación ambiental, daños a la infraestructura o a su economía (Makoka & Kaplan, 2005 en Kapucu & Özerdem, 2013). Las inundaciones, sequías y terremotos son considerados eventos peligrosos al constituir una amenaza a la comunidades o a la infraestructura (UNEP & UNISDR, 2007).

Según los registros de la EM-DAT (2018) el mayor número de desastres reportados a nivel global en el periodo entre 1971 y 2018 son generados por eventos hidrológicos (inundaciones y deslizamientos), seguido de los procesos meteorológicos (temperaturas extremas, tormentas y niebla), biológicos (epidemias, infestación de insectos y accidente animal), climatológicos (sequias e incendios) y geofísicos (terremotos, movimientos en masa (secos) y actividad volcánica), lo que evidencia que el mayor número de desastres estuvo entre el 2000 y 2016 (Figura 2).

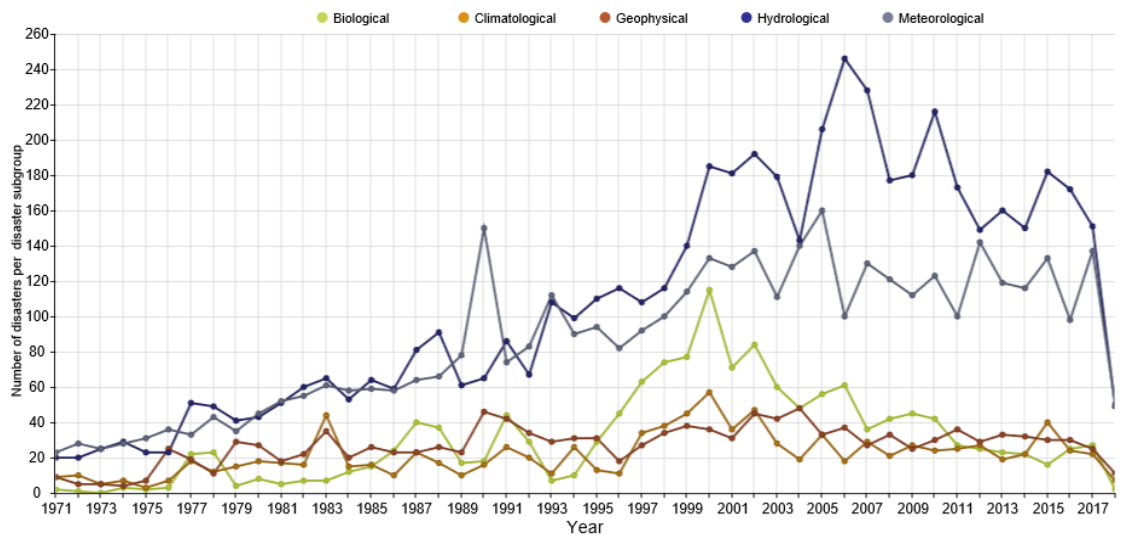


Figura 2. Número de desastres por eventos a nivel global periodo entre 1971 y 2018

Fuente: (EM-DAT, 2018).

Procesos que traen como consecuencia un gran número de personas afectadas (Figura 3) y daños económicos (Figura 4) a las comunidades. Reconociendo que el mayor número de

desastres y personas afectadas está relacionado con la ocurrencia de inundaciones y deslizamientos se hace necesaria la evaluación de la amenaza ante dichos eventos en la presente investigación.

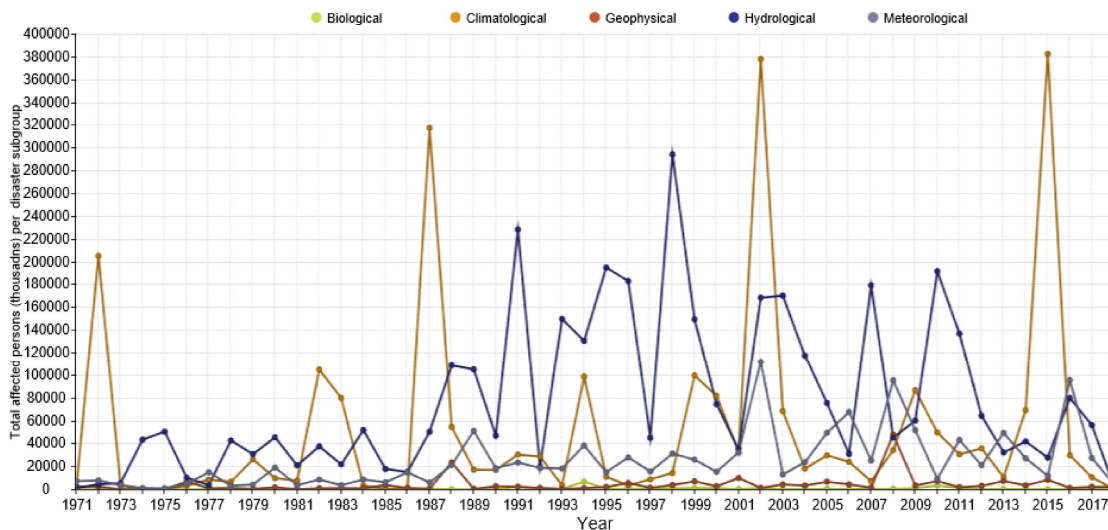


Figura 3. Personas totales afectadas por eventos en miles a nivel global periodo entre 1971 y 2018

Fuente: (EM-DAT, 2018).

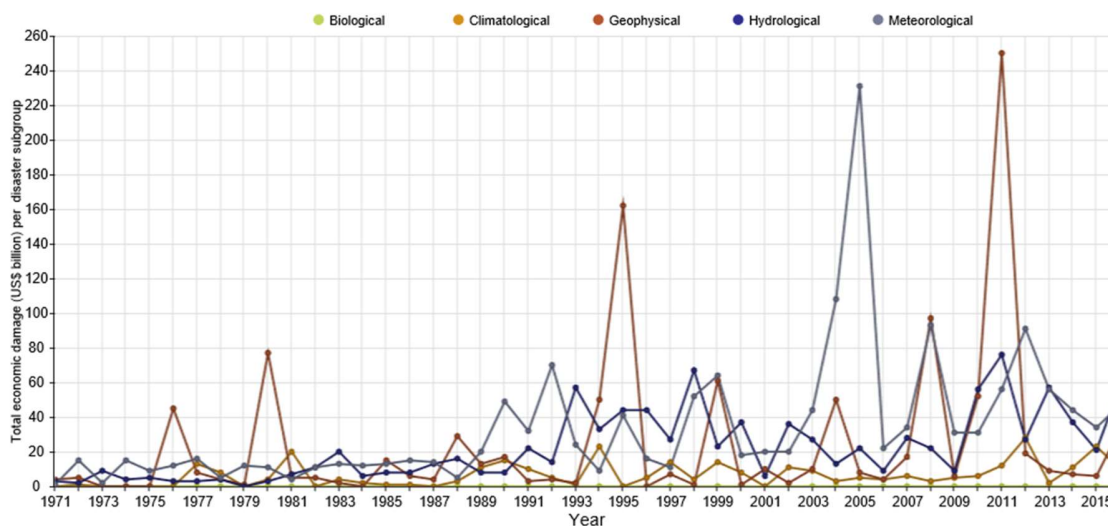


Figura 4. Total de daños económicos en billones de US\$ (escala 2006) por eventos a nivel global periodo entre 1971 y 2018

Fuente: (EM-DAT, 2018).

En zonas montañosas los deslizamientos ocurren cuando se producen esfuerzos gravitacionales que pueden fallar la roca o el suelo después de tenerse un alivio local de esfuerzos (Clague & Roberts, 2013), adicional a eso es bien sabido que influye en este proceso la resistencia al corte del material así como las fuerzas externas y las presiones de poro (Keefer & Larsen, 2007).

La evaluación de la amenaza por deslizamiento puede ser efectuada mediante enfoques cualitativos y cuantitativos los primeros resultan de la experiencia de los investigadores con relación a la amenaza determinado in situ o por la combinación de mapas de índice y los enfoques cuantitativos que se basan en análisis estadísticos y métodos determinísticos en lugares específicos (Aleotti & Chowdhury, 1999).

Para la zonificación de la amenaza se identifican los factores inestabilizantes del terreno y se ubican los lugares con riesgo similar con base a registros de deslizamientos pasados (Uromehy & MahdaviFar, 2000), esta evaluación puede hacerse a escala local, regional, nacional y global (UNISDR, 2017b). Según Cerri et al. (2017) en los suelos residuales tropicales la foliación, fracturas y estratificación junto con la pendiente del terreno permiten zonificar la amenaza de deslizamientos.

En la actualidad herramientas como los sistemas de información geográfica (GIS) son esenciales para el análisis de factores inestabilizantes y finalmente para la evaluación de amenaza por deslizamiento (van Westen et al., 1997),

La herramienta GIS ha sido empleada en un gran número de estudios (ej.: Sharma & Kumar (2008); Temesgenab et al. (2001); Hamza & Raghuvanshi (2017); Wang & Peng (2009); Huabin et al. (2016); Chau et al. (2004); entre otros) en los que se alimenta el modelo en GIS con los mapas de: pendientes, fallas geológicas, geología, uso de suelo, drenajes y caminos, para la zonificación de la amenaza por deslizamiento.

Estudios como el realizado por Perotto-Baldiviezo et al. (2004) ha permitido identificar que la pendiente y la cobertura del suelo inciden en la ocurrencia de deslizamientos verificados con la herramienta GIS, de ahí que zonas con cobertura de arbustos y bosques sean menos propensas a deslizamientos sin importar la pendiente en comparación las zonas con cobertura de cultivos donde se observaba que entre más pronunciada era la pendiente mayor peligro de deslizamiento había en la zona.

Colombia por su parte es el país suramericano con mayor riesgo de pérdidas de vidas por año por kilómetro cuadrado por efecto de los deslizamientos los cuales son los eventos más frecuentes y son atribuidos a fuertes lluvias e inundaciones, lo cual lo hace el país más monitoreado de Latinoamérica ante eventos hidrometeorológicos y geológicos (The World Bank & GFDRR, 2010)

1.4.1 Amenaza de crecidas e inundaciones

La inundaciones son el evento natural más frecuente como se muestra en la Figura 5 según los registros de la EM-DAT (2018) a nivel global y es también el que mayores pérdidas económicas genera a una comunidad (Kron, 2005).

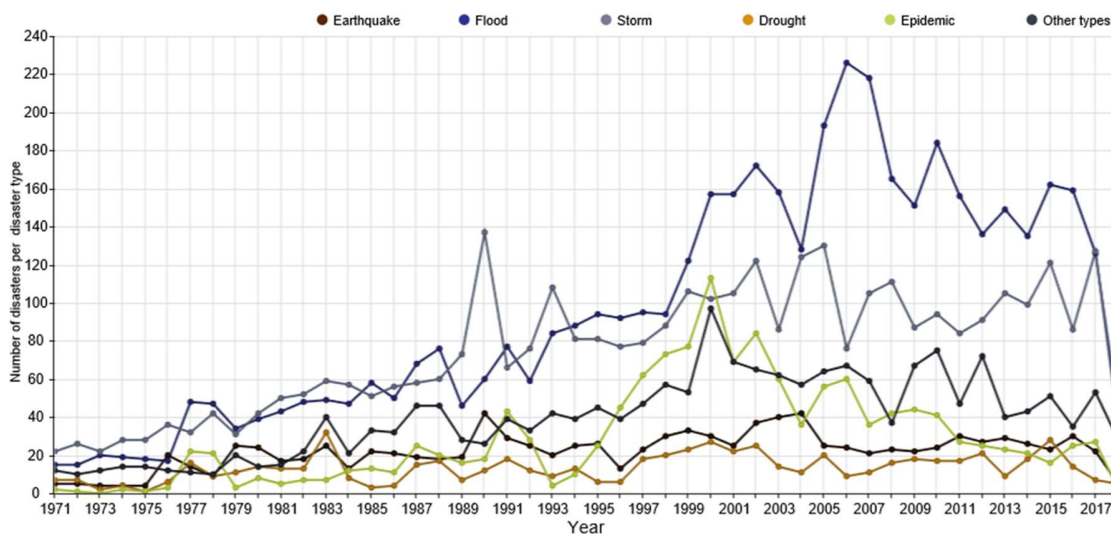


Figura 5. Numero de desastres por tipo a nivel global periodo entre 1971 y 2018

Fuente: (EM-DAT, 2018).

Los peligros de inundación son cuantificados mediante la determinación de la profundidad, velocidad o caudal máximo (Kelman, 2000), donde los efectos del daño de inundación pueden directos o indirectos. Los daños directos son daños causados

por el contacto físico del agua de inundación con los humanos, las estructuras y el medioambiente y los indirectos son producidos como consecuencia de las inundaciones entre los que se encuentran las interrupciones de las actividades de la comunidad (económicas y sociales) (Messner & Meyer, 2005).

Conforme a los registros de la EM-DAT, UCL, & CRED (2019) en Colombia los eventos más recurrentes se relacionan con inundaciones y deslizamientos siendo estos el 44% y el 23% respectivamente de la totalidad de desastres presentados en el periodo entre 1971 y 2019 (Figura 6).

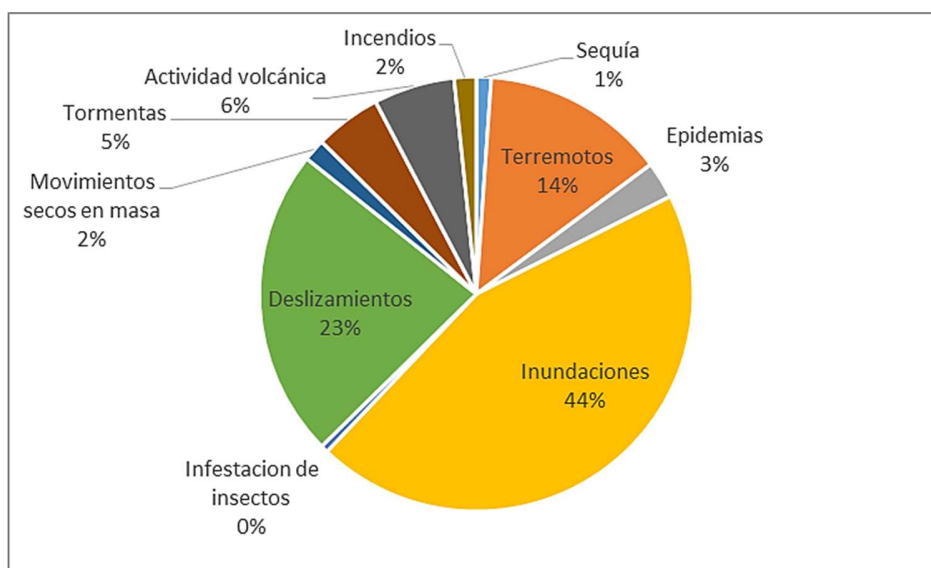


Figura 6. Número de eventos por tipo de desastre en Colombia en el periodo entre 1971 y 2019

Fuente:(EM-DAT, UCL, & CRED, 2019a).

De manera semejante se observa que dentro de los registros en el periodo 1971 a 2019 de los mayores números de muertes y de personas afectadas tienen relación con procesos de inundación y deslizamientos (Figura 7).

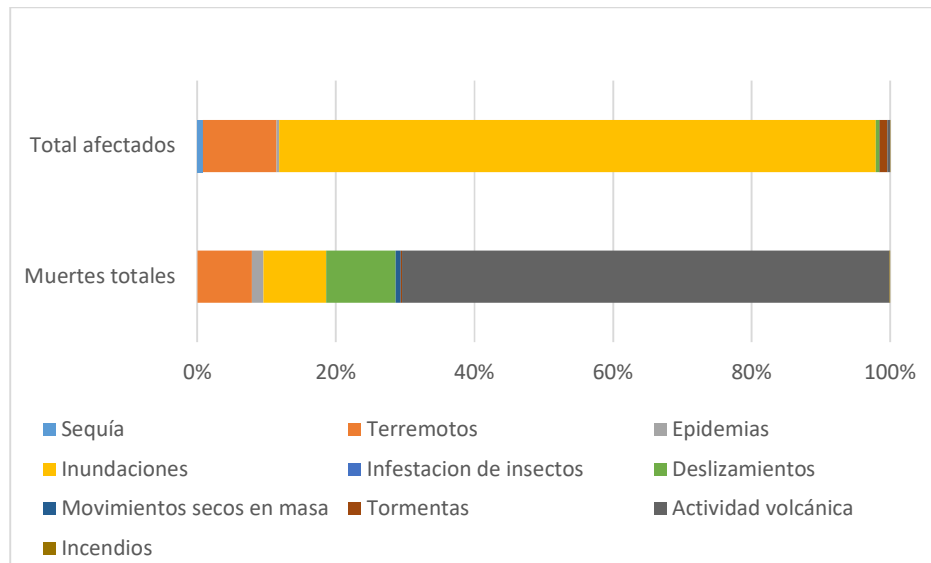


Figura 7. Porcentaje de muertos y personas afectadas por tipo de desastre en Colombia en el periodo entre 1971 y 2019

Fuente: (EM-DAT et al., 2019b).

1.4.2 Amenaza por erosión / transporte de sedimentos

La erosión hídrica representa un problema global (Angima et al., 2003) para el medio ambiente y la agricultura (Shi et al., 2012) puesto que posibilita el desarrollo de procesos erosivos.

La erosión consiste en la denudación del suelo o roca (Zorn & Komac, 2013) donde las partículas son arrastradas por el agua de acuerdo a su capacidad de transporte (Beneš et al., 2006), este proceso disminuye la fertilidad del suelo y favorece la sedimentación del canal del río (Wu et al., 2016)

Estudios como el de Hrisanthou (2002) han permitido evidenciar que en la estimación de sedimentos en una cuenca resulta muy eficiente la utilización de submodelos de precipitación, escorrentía, un submodelo de transporte de sedimentos y de erosión, donde la estimación de los sedimentos producidos por erosión puede realizarse mediante la adopción de métodos distribuidos o agrupados, los primeros se basan en el desarrollo de diferenciales parciales

mientras que los segundos trabajan diferenciales ordinarias (Singh, 1995, en Aksoy & Kavvas, 2005) para generar un modelo físico que represente las condiciones del terreno.

Otros estudios como el de Olan et al. (2015) reconocen la importancia del uso de vegetación y del sistema de raíces que ellas desarrollan en el suelo para reducir los procesos de erosión hidráulica. Ouyang et al. (2018) por su parte, sugieren que tiene mayor influencia en la tasa de erosión los cambios de uso de suelo que los cambios en la propiedad del suelo, donde cambios de uso del suelo inadecuados pueden ser insostenibles (Zare et al., 2017) debido a la gran cantidad de material producido por erosión.

Con respecto al caso colombiano, recientes investigaciones muestran que aproximadamente el 40% del territorio presenta erosión alta (Daniels, 2017) de ahí que la adopción de modelos de erosión permiten una mejor planificación del suelo (Angima et al., 2003)

1.5 Evaluación de la vulnerabilidad física

La vulnerabilidad entendida como la susceptibilidad de una comunidad a sufrir daños en su infraestructura, economía, política o sociedad ante eventos de origen natural o antrópicos (Bankoff & Frerks, 2004), es un concepto que como se menciona permite considerar los impactos de los peligros naturales (Fuchs et al., 2011) los cuales suceden con mayor frecuencia debido a los desarrollos socioeconómicos, el uso del suelo y la variabilidad climática en una región (Balica et al., 2009).

La evaluación de la vulnerabilidad se realiza mediante la caracterización de los elementos expuestos (UNISDR, 2017a), de ahí que durante la ocurrencia de un evento los elementos que tengan mayor exposición a este son más susceptibles a sus fuerzas e impactos y por ende tienen un mayor riesgo de ser dañados (Messner & Meyer, 2005).

Pese a lo anterior el análisis de la vulnerabilidad física frente a múltiples riesgos es un campo que aún recibe poca atención (Kappes et al., 2012) debido que existen dificultades

en la implementación de metodologías para la evaluación de vulnerabilidad asociadas a la disponibilidad de datos, diferencias entre métodos respecto a la escala geográfica y temporal (Papathoma-Köhle et al., 2011) además de la complejidad de los mecanismos de daño estructural y la habilidad de modificar el nivel de amenaza (Douglas, 2007).

De ahí que los enfoques de vulnerabilidad se fundamenten en indicadores flexibles que pueden ajustarse a los diferentes peligros y a las necesidades específicas de los usuarios (Kappes et al., 2012) cuyo conocimiento es importante pues es bien sabido que mediante la reducción de la vulnerabilidad puede disminuirse daños y pérdidas sin realizar la evaluación del riesgo (Weichselgartner, 2001).

Liu & Shi (2017) por ejemplo desarrollaron un estudio en las llanuras de inundación de Wuhan localizadas en la cuenca del Río Yangtze en China, en el que se buscaba cuantificar el efecto que tienen los cambios en el uso del suelo en la evolución dinámica de la vulnerabilidad a las inundaciones proponiendo una correlación no paramétrica que emplea un índice de dominancia y un índice de ubicación.

1.6 Riesgo de inundaciones en Colombia

Por definición de la CRED (2014) el riesgo es la *“pérdida esperada (de vidas, personas heridas, daños a la propiedad e interrupción de la actividad económica) debido a un peligro particular para un área determinada y un período de referencia”* (p.5). El riesgo puede expresarse de manera probabilística o semicuantitativa y es obtenido de la combinación de la amenaza, exposición y vulnerabilidad (IPCC, 2012, en Gallina et al., 2016)

La noción de percepción de riesgo varía de individuo a individuo y depende de los niveles de información e incertidumbre que estos tienen (Messner & Meyer, 2005) respecto a su exposición a una situación amenazante, de ahí que la consciencia antes estos eventos permite que la comunidad pueda tomar medidas efectivas de protección.

Instrumentos como el Marco de Acción de Hyogo (HFA) (UNISDR, 2013) adoptado por las Naciones Unidas buscan la reducción del riesgo de desastres estableciendo cinco principios rectores y medios prácticos que permitan a la comunidad comprender y tomar conciencia

ante situaciones de riesgo permitiendo un aumento de la resiliencia de las mismas y por ende disminuyendo las pérdidas de vidas, activos sociales, económicos y ambientales (Holmes, 2005) por lo que se ha pasado de la vulnerabilidad al desastre a la resiliencia ante los desastres (Cutter et al., 2008).

A nivel global las inundaciones son la causa principal de daños a la comunidad además de desencadenar otros eventos de tipo natural que ha venido intensificándose con las últimas décadas, por lo que el riesgo de inundación es cada vez más frecuente y la magnitud de las crecidas es mayor en relación al cambio climático (Kron, 2005).

El riesgo por inundación no siempre tiene un enfoque probabilista sino que puede hacerse evaluación de escenarios o mapas de amenaza ante el evento el cual no es estacionario en el tiempo ni en el espacio (UNISDR, 2017a).

En Colombia ocurren frecuentemente desastres asociados a inundaciones debido que no siempre se dispone de información suficiente y confiable (Sedano-Cruz, 2012) para realizar estudios e investigaciones. Según Sedano-Cruz et al. (2013) algunos factores que influyeron en las inundaciones ocurridas en Colombia en los años 2010 y 2011 fueron fortalecidas por el fenómeno de la Niña, los cambios de cobertura y la pobre gestión del suelo y el agua por lo que resulta importante incluir información climática en los enfoques de gestión de riesgo de inundaciones.

Es bien sabido que las comunidades donde hay un elevado crecimiento demográfico y un inadecuado uso del suelo tienen un mayor riesgo por eventos de crecidas, evidenciando que la mala planificación y la vulnerabilidad causada por el hombre incide en la magnitud de los daños (IUCN, 2006) de ahí que sea necesario aunar esfuerzos entre la población y las agencias de emergencia para implementar medidas eficientes en la reducción del riesgo.

Capítulo II. Metodología

2.1 Descripción área de estudio

La cuenca del Río Combeima también llamada el cañón del Combeima está ubicada en el departamento del Tolima, Colombia sobre el flanco oriental de la cordillera central a $04^{\circ}19'30''$ y $04^{\circ}39'57''$ latitud norte y los $75^{\circ}10'11''$ y $75^{\circ}23'23''$ longitud oeste (CONPES 3570, 2009, p. 6), está localizada entre los 5150 y 1000 m.s.n.m, con un área de 278.37 km^2 y en el punto de cierre se localiza la bocatoma del acueducto de la ciudad de Ibagué (Peña et al., 2016), la cual cuenta con 500.000 habitantes (García et al., 2016) (Figura 8).

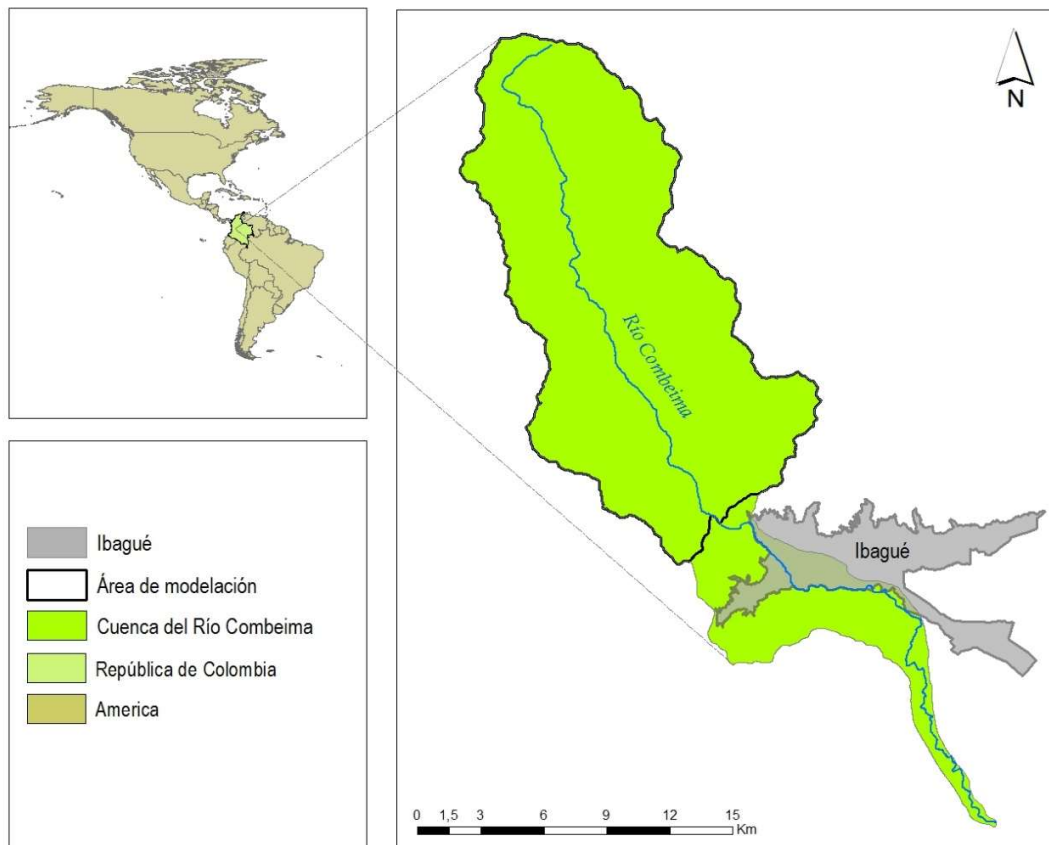


Figura 8. Localización general de la cuenca del Río Combeima – Colombia

Fuente: Autor.

El Río Combeima es un afluente importante del Río Coello. Los afluentes principales del Combeima son: Q. El Guamal, Las Perlas, Las Peñas, Cay, Corazón, Las Ánimas, El Tejar, El Billar, La Honda y La Tribuna.

A lo largo del cañón del Río Combeima se encuentran las poblaciones de Juntas, Pastales, Villa Restrepo, Llanitos, Chapetón e Ibagué. El documento en el que se enmarca el Plan de Ordenación de Manejo de Cuencas (POMCA) que rige la cuenca del Río Combeima es la del Río Coello puesto que esta hace parte de la cuenca mayor del Río Coello (CORTOLIMA, 2007).

Según el documento CONPES (2009), la cuenca del Río Combeima presenta dos épocas de lluvias (abril y mayo; septiembre, octubre y noviembre) y dos de bajas precipitaciones (diciembre, enero, febrero y marzo; junio, julio y agosto) (Figura 9), posee un caudal promedio de $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, una longitud de drenaje de 57.78 km, una pendiente promedio de 7.8% lo cual posibilita el transporte de sedimentos a grandes velocidades, además de presentarse también mayores procesos erosivos en el cauce y socavación de taludes alledaños.

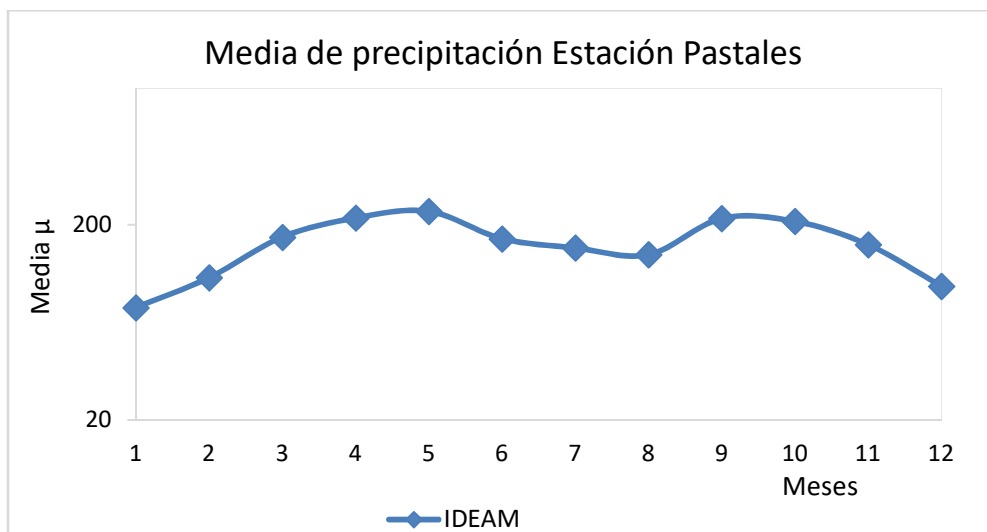


Figura 9. Comportamiento bimodal de la precipitación en la Estación meteorológica Pastales.

Fuente: Autor.

Geológicamente la cuenca del Río Combeima se conforma por rocas metamórficas y rocas ígneas en menor proporción con incidencia torrencial, en la parte alta de cuenca se observan zonas con reptación (Plan de desarrollo, 1994).

Según Moreno & Vergara (1992) las rocas metamórficas que lo componen corresponden al Complejo Cajamarca, sus rocas ígneas son intrusivas de edad jurásica y terciaria (Batolito de Ibagué), y presenta lavas andesíticas del Cuaternario que hacen parte de la secuencia de flujos piroclásticos, lahares y depósitos aluvio - torrenciales (Abanico de Ibagué) en el Combeima, donde la mayoría de procesos de inestabilidad se relacionan a los coluvios compuestos por gravas limosas y arcillosas ubicados en taludes entre 20° y 45° y cenizas volcánicas localizadas en las divisorias de aguas, materiales que cubren la cuenca en su mayoría.

El Complejo Cajamarca fue descrito por Nelson (1957 y 1962), en el documento del Servicio Geológico Colombiano & MINMINAS (2016) como Grupo Cajamarca. Conforme a Núñez (2001) “la unidad aflora sobre las carreteras Ibagué – Cajamarca - La Línea, Ibagué - Juntas, Armero - Líbano, San Felipe – Falan, Fresno - Delgaditas y en la mayoría de las corrientes de agua y carreteables que cortan el flanco oriental de la Cordillera Central”.

Con base en la información contenida en el mapa geológico del departamento del Tolima presentado por INGEOMINAS (1999), las estructuras hidráulicas de la bocatoma y desarenadores que se encuentran dentro de la cuenca del Río Combeima están localizadas en el complejo Cajamarca (Pzen), específicamente sobre un depósito volcánico sedimentario de nivel inferior (QI3) que según Consorcio GEOTEC GROUP (2012) el depósito QI3 está poco consolidado y se compone de bloques de roca en una matriz limo arenosa (Figura 10).

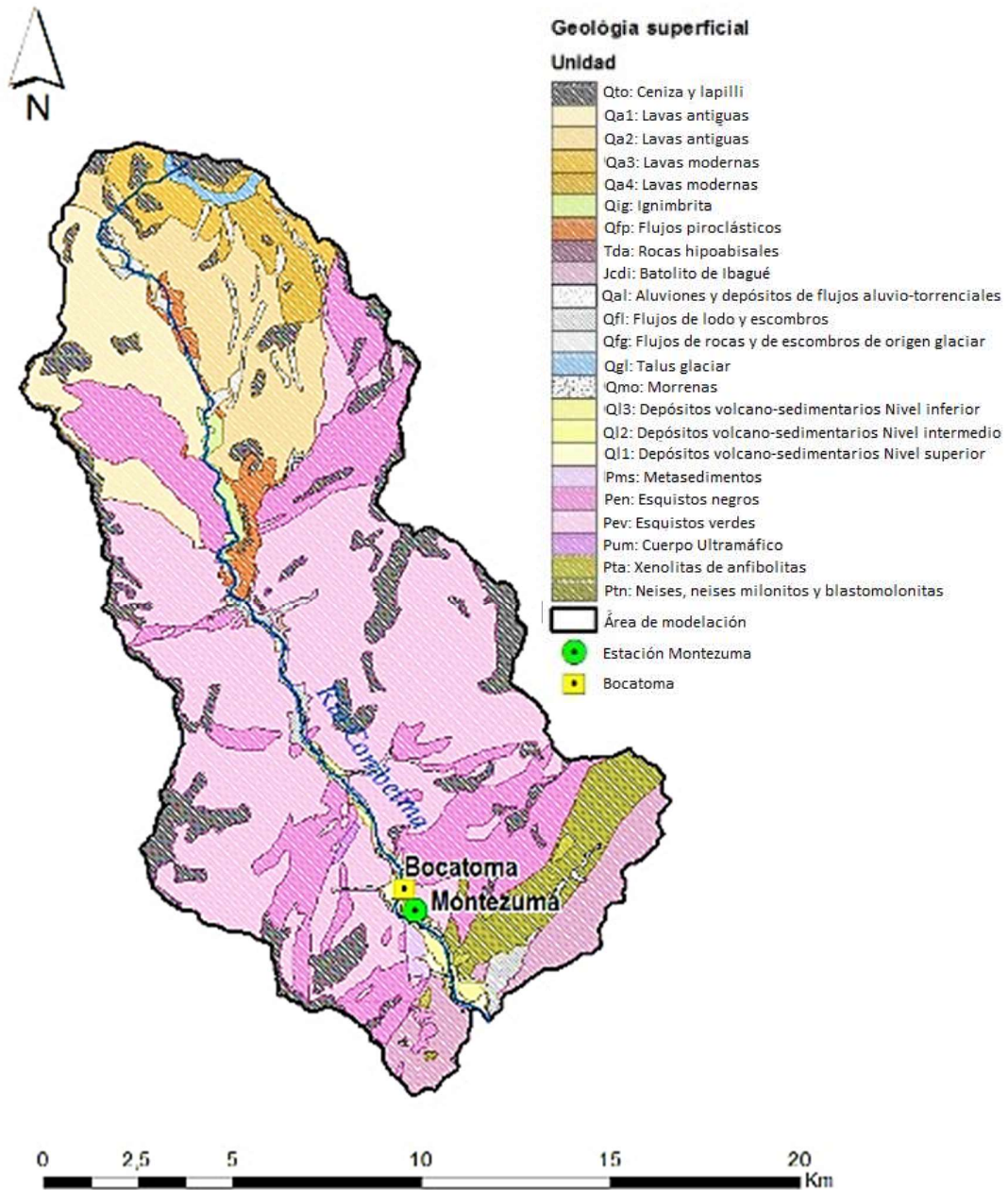


Figura 10. Localización de bocatoma y estación Montezuma en el Cañón del Combeima.

Fuente: (Adaptado de Consorcio GEOTEC GROUP, 2012)

Según lo reportado por Cárdenas et al. (2014) la cuenca del Río Combeima presenta un relieve con alturas entre 1.300 m.s.n.m. y más de 5.000 m.s.n.m. con pendientes entre 35° y 90°; además de *“una unidad de abanico aluvio-torrencial de topografía suave a moderadamente inclinada”*, con elevaciones desde 800 m.s.n.m. (base del abanico) hasta 1.300 m.s.n.m. (ápice del abanico) con pendientes entre 5° y 50°, además existen deformaciones en la superficie del terreno debido a los sistemas de falla Otú – Pericos y la Falla de Ibagué (Figura 11).

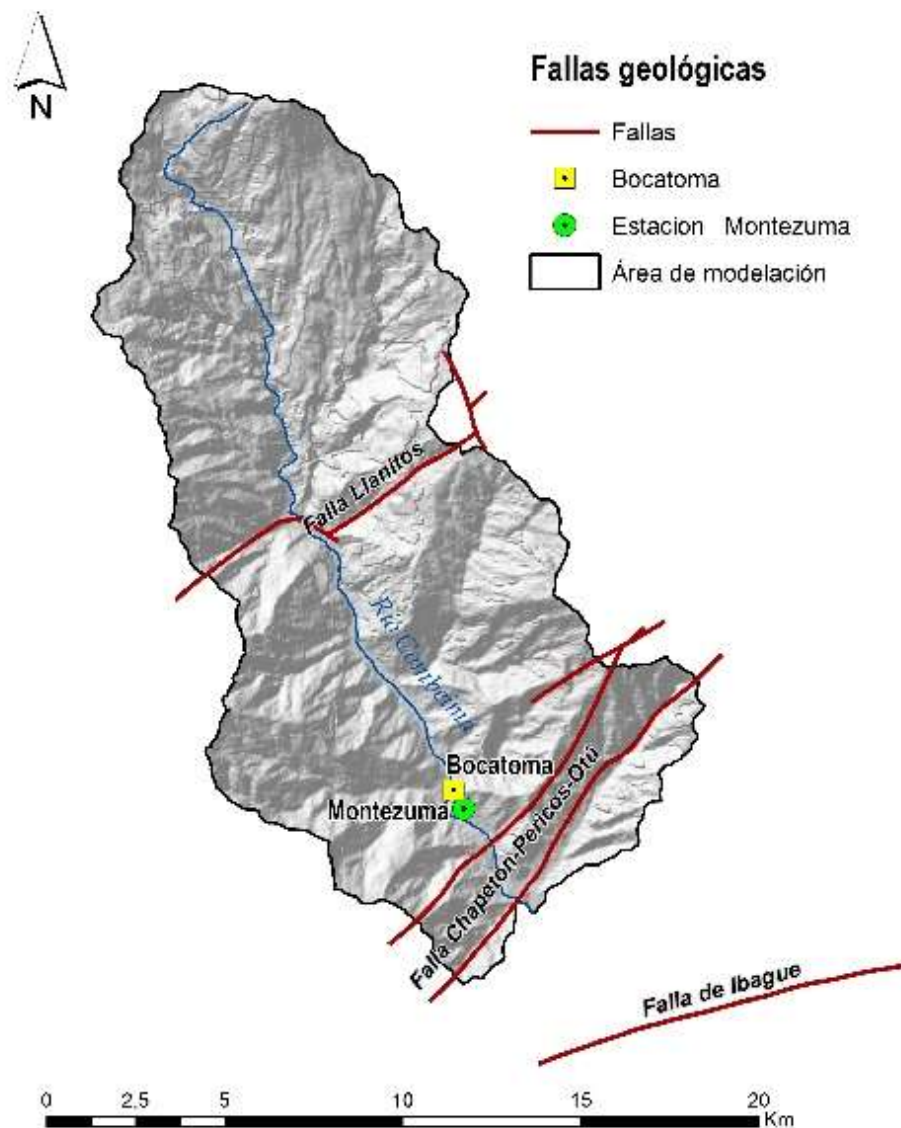


Figura 11. Imagen Landsat TM zona de Fallas Pericos e Ibagué, Ibagué – Tolima.

Fuente: (Adaptado de Consorcio GEOTEC GROUP, 2012)

Restrepo & Toussaint (1989), en el documento Historia geológica de los Andes colombianos en los alrededores de Ibagué del Servicio Geológico Colombiano & MINMINAS (2016) plantean el nombre de Falla de Otú-Pericos. En concepto de Toussaint et al. (1992) en

Núñez (2001), este sistema es una falla de rumbo dextral, con presencia de milonitas y cataclasitas (Cárdenas et al., 2014).

Según INGEOMINAS (1997) y Marquínez (2001), en Montes, Velandia, Osorio, Audemard, & Diederix, 2005), la Falla Ibagué atraviesa la Cordillera Central en dirección N70°E hasta el valle del Río Magdalena, “afectando principalmente rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Cajamarca, rocas ígneas de edad jurásica del Batolito Ibagué, rocas sedimentarias paleógenas y neógenas de los grupos Gualanday y Honda y el depósito neógeno cuaternario del Abanico de Ibagué” (Figura 12).

El desplazamiento de la Falla de Ibagué en las rocas del Batolito de Ibagué es de tipo sinistral y en los depósitos cuaternarios del Abanico de Ibagué es de tipo dextral según el estudio microtectónico de Vergara (1988), en Lopez (2006).

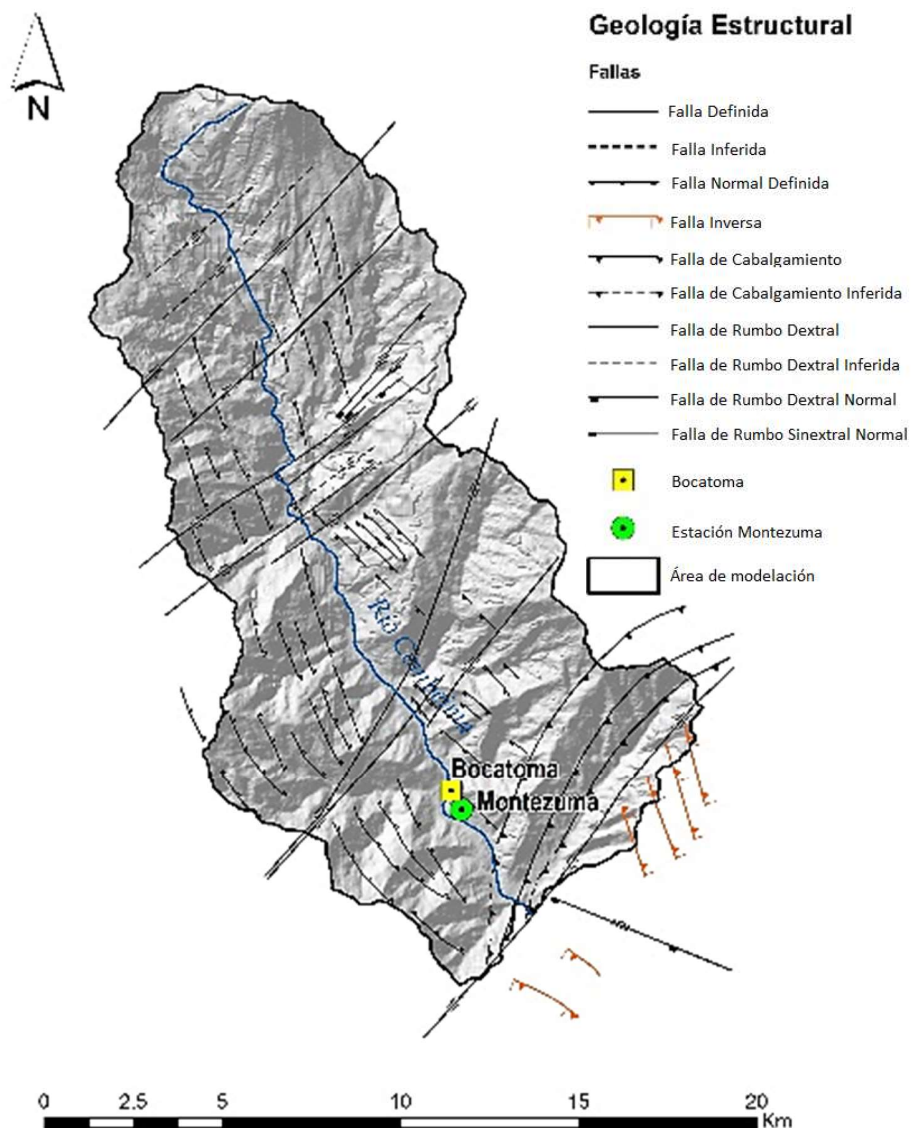


Figura 12. Mapa de geología estructural del Cañón del Combeima.

Fuente: (Adaptado de Consorcio GEOTEC GROUP, 2012)

Así mismo según el Instituto Geofísico Universidad Javeriana & Consultoría Colombiana S.A. (2000) el Río Combeima presenta “*un valle juvenil con escarpes aterrazados profundos y encañonamiento del cauce del río*”, lo que posibilita la ocurrencia de procesos de remoción en masa, cuya actividad erosiva influye en gran medida en la evolución del valle.

El cárcavamiento es el proceso erosivo que predomina en el Batolito de Ibagué conformado por arena limosa y procesos de remoción en masa ocurren en “roca intensamente fracturada, a lo largo de fallas geológicas, en condiciones de alta montaña y pendientes superiores a 45°” que en su mayoría evolucionan en flujos de escombros (Moreno & Vergara, 1992).

Respecto al uso del suelo de la cuenca del Río Combeima partiendo de los mapas de uso del suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC-Colombia) en escala 1:25000, con base a Rojas (2017) la cuenca del Río Combeima ha tenido variaciones en el uso del suelo teniendo que en el año 1991 la cuenca presentaba un 48.91% de bosques, 20.33% de cultivos, 28.25% de pastos y 2.51% eran zonas impermeables; en el año 2000 hubo una disminución de la cobertura de bosques y fue reemplazada por pastos; en el 2002 se recuperaron 5.68% de bosques, 5.75% de cultivos y los pastos disminuyeron en 9.86%; para el 2007 hubo un aumento de la zona de bosques registrando un 49.07% del área, un 21.52% correspondientes a cultivos y 27.01% de pastos.

2.1.1 Sistema de captación de Ibagué

La bocatoma Ibagué - Combeima se encuentra localizada en la margen izquierda de la vía Ibagué - Nevado del Tolima, en Llanitos al lado izquierdo del Río Combeima aguas abajo y fue construida hace más de 40 años en concreto reforzado, con espesores de muro de 25 cm y alturas de 2.5 m aproximadamente (Triana, 2015). Teniendo en cuenta los parámetros especificados en el RAS 2000 Título B.4.4.1 del Ministerio de Vivienda (2010) la estructura de captación fue planteada para un nivel de complejidad del sistema alto cuyo periodo de diseño es de 30 años, el cual fue excedido.



Fotografía 3. Estructura de captación a 2015.

Fuente: (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2017a)

Pese a la edad de la captación, esta no presentaba a 2015 fisuras por falla estructural pero si presentaba zonas de deterioro por desgaste en los sectores que están en contacto con el agua, presentando una coloración oscura por humedad y ataque de hongos (Triana, 2015).

Con miras al mejoramiento en la prestación del servicio, en el año 2017 la empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL S.A. E.S.P realiza un proyecto de optimización de la bocatoma del Río Combeima, se implementó una captación lateral y de fondo con el objeto de emplear una de ellas cuando haya aumento en la turbiedad y la otra cuando el agua se encuentre bajo condiciones normales de tratamiento (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2017b).

En el 2018 se da inicio a la fase II del acueducto complementario que funcionara como fuente alterna del rio Cocora donde se instalará 12.6 km de tubería de 36" CCP y 6.3 km de tubería de 24" en PVC del que espera tomarse aproximadamente 1000 ls⁻¹, el cual funcionara cuando aumente la turbiedad del agua por captación en el Río Combeima (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2018c).

Según Ospina-Zúñiga et al. (2016) el sistema de acueducto de Ibagué se encuentra en riesgo por interrupciones del servicio y presenta altos costos de tratamiento para la potabilización del líquido asociados con el aumento de la turbiedad del agua (Fotografía 4 y Fotografía 5) debido a altos niveles de dilución de partículas coloidales y sólidos en suspensión generados por erosión, problemática en la que influye el fenómeno de la Niña al haber relación entre el aumento de precipitaciones y de turbidez en la cuenca del Río Combeima (Fotografía 6).



Fotografía 4. Alerta roja por fuertes lluvias en el Río Combeima, aumento de turbidez a 34000 UNT 11/06/18.

Fuente: (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2018a)



Fotografía 5. Suspensión del servicio por registro de nivel de turbidez de 38000 UNT en la Bocatoma Combeima 24/07/18.

Fuente: (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2018)



a)



b)



c)



d)

Fotografía 6. Aumento de turbiedad por fuertes lluvias en la parte alta de la cuenca del Río Combeima 24/07/18.

Fuente: (IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, 2018)

2.2 Variables Hidroclimáticas

Para la implementación del modelo hidrológico de la cuenca del Río Combeima se realizó en primer lugar la recolección de datos correspondientes a las variables hidroclimáticas de la cuenca, para lo cual se identifican 25 estaciones dentro del Combeima optando por trabajar con 9 que se encuentran en estado activo y tienen como corriente principal el Combeima (8 meteorológicas y 1 hidrométrica, listadas en la Tabla 4, de las que 6 de ellas corresponden a estaciones pluviográficas PG, 1 pluviométrica PM, 1 sinóptica suplementaria SS y 1 liminigráfica LM), las demás estaciones están suspendidas o tienen periodos de registro menor de 20 años o presentan muchos años con datos faltantes o se alimentan de otras corrientes por cuanto no se tienen en cuenta para el estudio.

Tabla 4. Listado de estaciones meteorológicas Combeima

Nombre de la Estación	Código	Clase	Categ.	Corriente	Elevación (m.s.n.m)	Coordenadas		Periodo de registro
						X	Y	
Palmar El	21210220	MET	PG	Combeima	2329	861432.1	998340.6	1971-2015
Juntas Las	21210020	MET	PG	Qda Perlas	1872	861857.1	995719.5	1971-2015
Placer El	21210110	MET	PG	Combeima	2189	866816	991823.2	1983-2015
Pastales	21210030	MET	PG	Combeima	1584	864194.9	990760.6	1971-2015
Secreto El	21210080	MET	PG	Combeima	1511	865399.2	988918.7	1985-2015
Esmeralda La	21210120	MET	PG	Qda Cay	1925	871066.5	978575.8	1982-2015
Interlaken	21210240	MET	PM	Combeima	1223	871704.1	982472.1	1994-2015
Perales	21245040	MET	SS	Opia	900	880984.4	981551.1	1971-2015
Montezuma	21217180	HMT	LG	Combeima	1444	865828.1	987334	1975-2015

Fuente: Autor.

Se compila los registros de precipitación diaria para el periodo comprendido entre 1971 y 2015 de la estación El Palmar, Juntas, El Placer, Pastales, El Secreto, Esmeralda, Interlaken y Perales ubicadas dentro de la cuenca, cuya información es proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para alimentar el modelo, el valor del caudal es asignado teniendo en cuenta los registros de la estación hidrometeorológica Montezuma.

En la Figura 13 se presenta el comportamiento de la precipitación mensual en la cuenca del Río Combeima y así mismo, Figura 14, presenta la variación de la temperatura mensual en la zona de estudio.

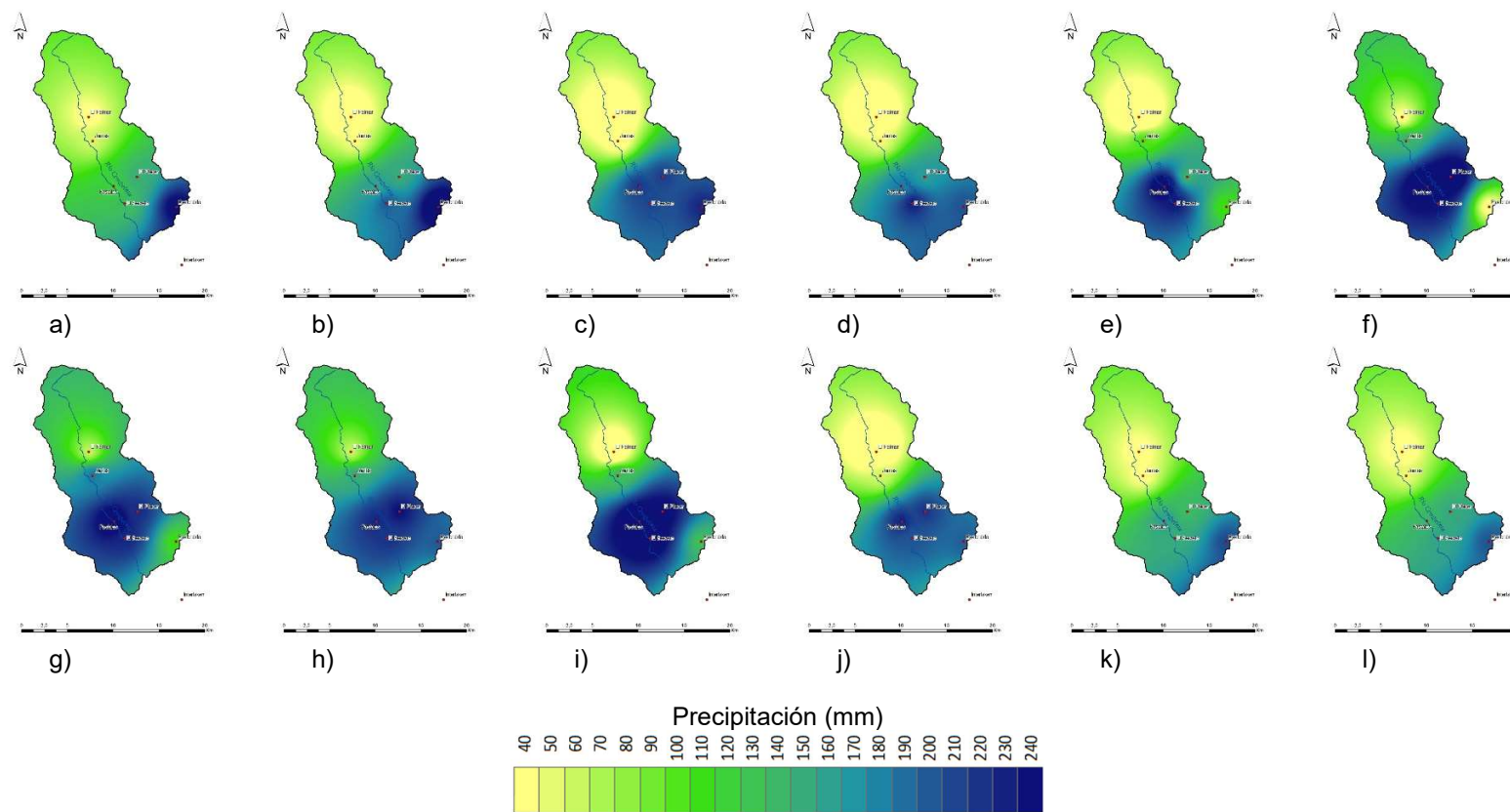


Figura 13. Distribución espacial de la precipitación mensual en la cuenca del Río Combeima. a) Enero. b) Febrero. c) Marzo. d) Abril. e) Mayo. f) Junio. g) Julio. h) Agosto. i) Septiembre. j) Octubre. k) Noviembre. l) Diciembre.

Fuente: Autor.

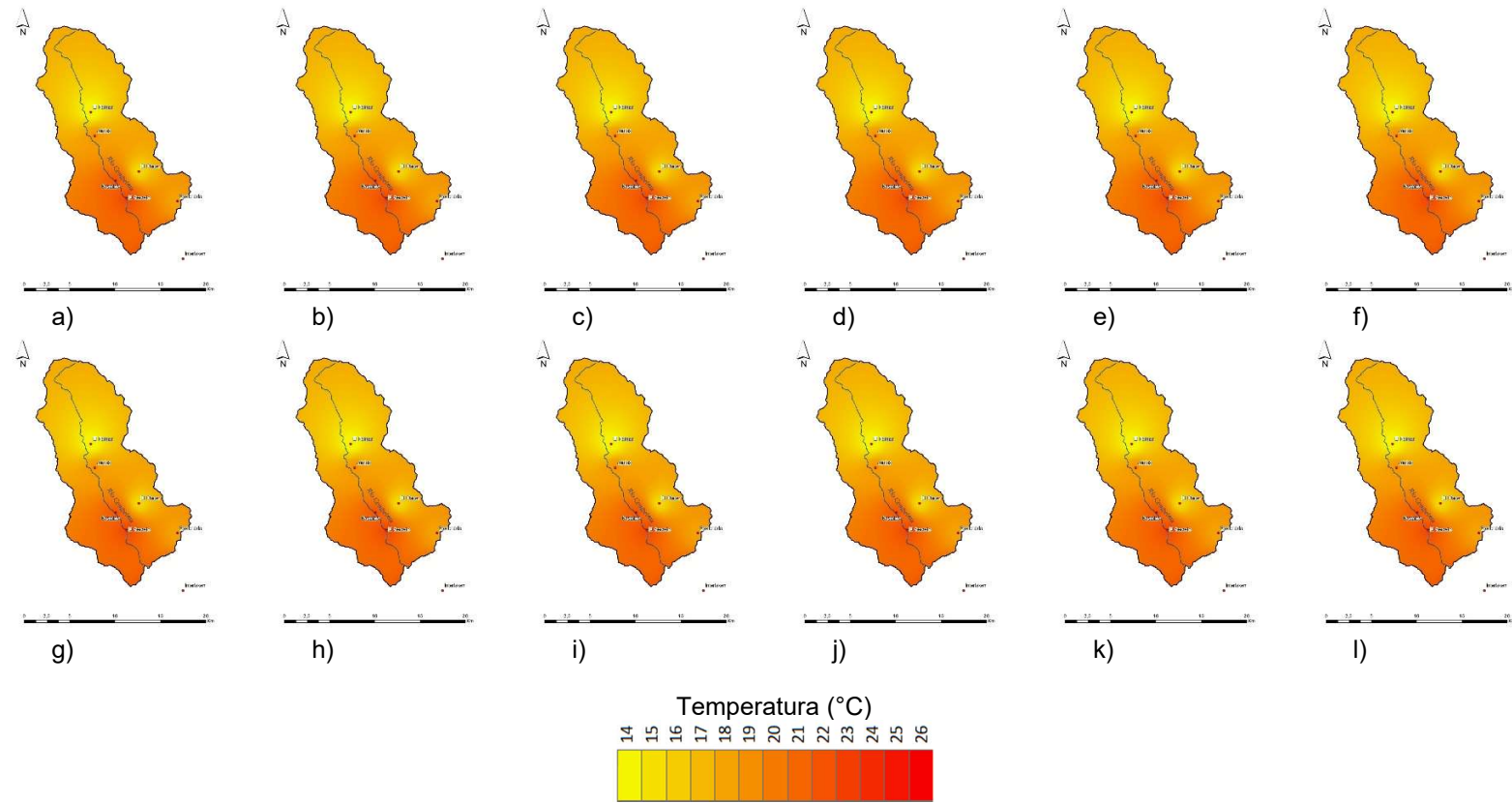


Figura 14. Distribución espacial de la temperatura mensual en la cuenca del Río Combeima. a) Enero. b) Febrero. c) Marzo. d) Abril. e) Mayo. f) Junio. g) Julio. h) Agosto. i) Septiembre. j) Octubre. k) Noviembre. l) Diciembre.

Fuente: Autor.

2.3 Detección de tendencias en series hidroclimatológicas

El test Mann Kendall es una prueba estadística no paramétrica empleada en la detección de tendencias monotónicas en estudios hidrológicos (Yue et al., 2002), usada para la determinación de tendencias de precipitación, caudal y temperatura (Douglas E.M et al., 2000, en Ramesh, 2013). El test es sencillo y ampliamente trabajado sin embargo tiene como limitante su hipótesis H_0 que es una hipótesis nula puesto que la no aceptación de H_0 implica que no puedan tomarse los datos como distribuidos de manera independiente e idéntica (Blain, 2013). Es importante tener en cuenta que los cambios climáticos inciden en variaciones de la respuesta hidrológica de un sitio por lo que afectan los resultados del test (Hamed, 2008).

Las ecuaciones matemáticas de este test se basan en la prueba del estadístico S con media cero y varianza calculada con las ecuaciones siguientes:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^{i-1} \text{sign}(X_j - X_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde X_j y X_i son los valores de serie temporal,

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (\text{Ec. 3})$$

n es la longitud de la serie temporal, t_p es el número de grupos para un valor de p y q es el número de valores atados.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 4})$$

Z positivos corresponden a tendencias con pendientes positivas de la serie temporal y Z negativos a tendencias decrecientes. H_0 se rechaza y existe una tendencia estadísticamente significativa si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$. Así mismo, el valor crítico de $Z_{1-\alpha/2}$ para un valor p de 0.05 de las tablas de distribución estándar normal es 1.96 (Ahmad et al., 2015).

2.4 Modelación hidrológica distribuida

Para la realización de la simulación hidrológica de la cuenca del Río Combeima se trabaja con TETIS que es un modelo distribuido conceptual aplicable a cuencas naturales de áreas entre 1 km² y 60000 km² en el que se discretiza el espacio de estudio en celdas de 30 x 30m a 500 x 500m (Bussi, et al., 2014). TETIS (Francés et al., 2007) trabaja con celdas que hacen parte de una malla tridimensional interconectada (Figura 15) en la que según Vélez et al. (2009) cada celda es un tanque con seis tanques conectados entre sí, donde los tanques inferiores drenan en la dirección del flujo definida por el modelo de elevación digital suministrado al modelo hasta depositarse finalmente en cárcavas y cauces (Grupo Redhisp, 2014a).

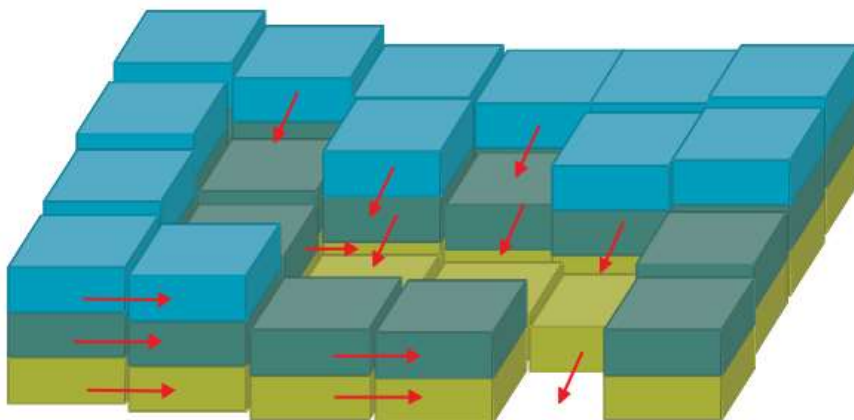


Figura 15. Esquema tridimensional de tanques del modelo TETIS.

Fuente: (Vélez et al., 2009, tomado de Vélez, 2001).

Según Redhisp (2014) el esquema conceptual de tanques interconectados entre sí son adaptados a escala de celda y a intervalos de tiempo que pueden ir desde la modelación de un evento (entre 1 hora y 10min) a una simulación continua (periodos hasta de 1 día) y que se basa en la estimación del balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis tanques conceptuales como los que se muestran en la Figura 16 donde el flujo entre ellos depende del almacenamiento de cada uno.

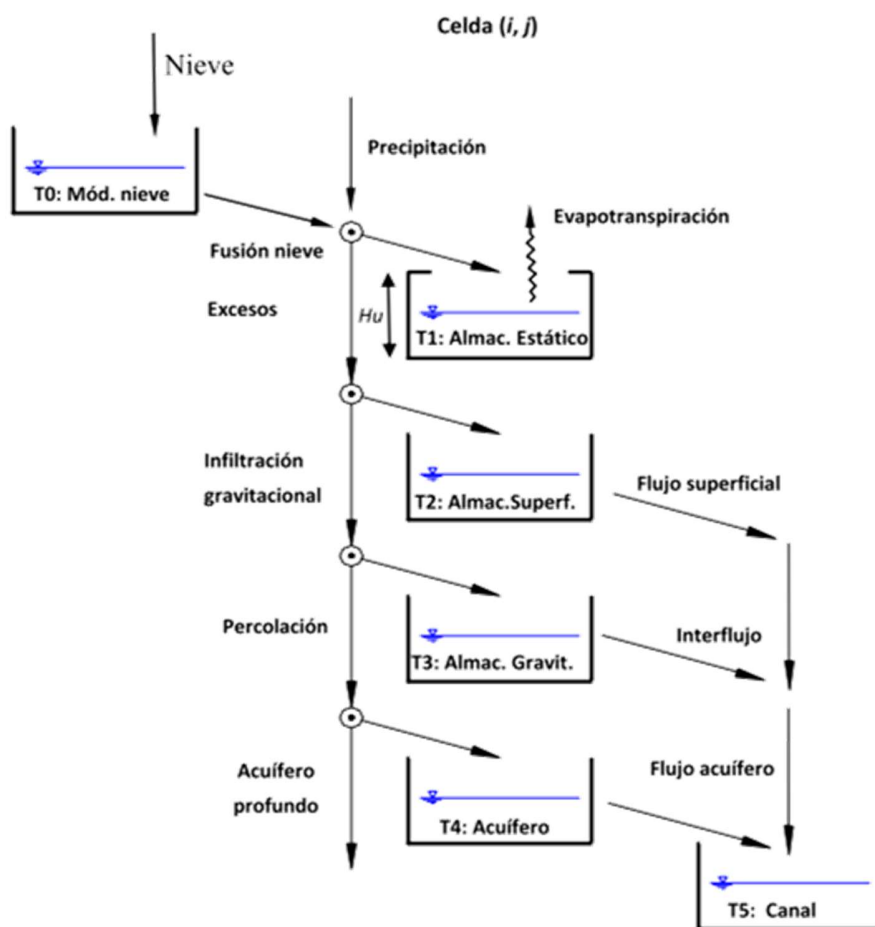


Figura 16. Modelo de tanques conceptual TETIS

Fuente: (Peña, 2017)

El modelo TETIS como lo describe la Redhisp (2014), emplea el método del inverso de la distancia al cuadrado para la generación de información distribuida en la zona de estudio

correspondiente a las variables de precipitación, nieve, temperatura y evapotranspiración potencial, empleando la ecuación (Ec. 5):

$$W_{oj} = \frac{\frac{1}{d^2 o_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^2 o_j}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde n es el número de estaciones y d_{oj} se determina como sigue (Ec. 6):

$$d_{oj} = \sqrt{(x_o - x_j)^2 + (y_o - y_j)^2}, j = 1 \dots n \quad (\text{Ec. 6})$$

β es el porcentaje de incremento de x con la altura y varía entre 0 y 1 y x en el punto de interés se calcula como (Ec. 7):

$$X_o = \sum_{j=1}^n W_{oj} X_f \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{Ec. 7})$$

Según la descripción realizada por Redhisp (2014), el primer almacenamiento de agua se realiza en el tanque T6 que es el tanque de intercepción asociado al agua interceptada por la vegetación, el segundo almacenamiento lo efectúa el tanque T1 que corresponde al agua que recorre la cuenca teniendo en cuenta charcos y capilaridad en el suelo; el agua que sale tanto del tanque T6 como T1 se da por evaporación.

El tanque T2 corresponde a la escorrentía directa que recorre superficialmente la cuenca o se infiltra en el suelo. El tercer almacenamiento se realiza en el tanque T3 que corresponde al agua gravitacional e interflujo. En el tanque T4 se efectúa el almacenamiento subterráneo representando el acuífero y el flujo base del cauce. El valor de T0 hace referencia al modelo de fusión de nieve en el que se tiene en cuenta la acumulación y fusión para lo que el TETIS emplea el índice de temperatura (Redhisp, 2014).

Adicionalmente el TETIS incluye un submodelo sedimentológico que simula los procesos de sedimentos en ladera y en canales de manera unidimensional, donde la cantidad de partículas producidas por erosión hídrica, así como su transporte y deposición dependen de la disponibilidad de sedimentos y la capacidad de transporte del cauce (Grupo Redhisp, 2014a); para esto el TETIS reconoce tres tamaños de partículas: arena, limo y arcilla

tomando como referencia la clasificación textural de suelos propuesta por la U.S.D.A descrita en la Tabla 5.

Tabla 5. Tabla de texturas USDA

Clase	Descripción	Textura
1	Ligeramente erosionable	Arcillosa, Arcillo-arenosa, Arcillo-limosa
2	Moderadamente erosionable	Franco-arcillo-arenosa, Franco-arcillosa, Franco-arcillo-limosa, arenoso-franca, arenosa
3	Altamente erosionable	Franca, Franco-limosa, Limosa, Franco-arenosa

Fuente: (Almorox, et al., 1994)

El movimiento de las partículas está condicionado al tamaño de las mismas, el transporte de finos depende de la disponibilidad de sedimentos y el transporte de granulares depende de la capacidad de transporte del cauce (Julien, 1995, en Grupo Redhisp, 2014a), requiriendo menores velocidades para el transporte de partículas de pequeño tamaño (limo, arcilla) que las empleadas para mover partículas de diámetros mayores, como se ve en la Tabla 6.

Tabla 6. Tamaño y velocidad de partículas

Clase	Diámetro (mm)	Velocidad (mm s ⁻¹)
Arena	0.35	36
Limo	0.016	0.22
Arcilla	0.001	0.00086

Fuente: (Grupo Redhisp, 2014b)

En el submodelo se trabaja con la ecuación modificada de capacidad de transporte propuesta por (Julien, 1995.) que considera como parámetros de entrada: La pendiente del terreno (S), el caudal (Q), el ancho del canal (W) además de los factores K , C y P de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE) como se muestra a continuación (Ec. 8):

$$qt = 23210 S^{1.66} \left(\frac{Q}{W}\right)^{2.035} \frac{K}{0.15} C P \left(\frac{t}{m * s}\right) \quad (Ec. 8)$$

La USLE es un modelo paramétrico empírico de simulación que hace parte de los métodos cuantitativos de evaluación indirecta de una cuenca, cuyos parámetros buscan reproducir las condiciones ambientales de una cuenca para la evaluación de producción de

sedimentos producidos por erosión laminar (Almorox, et al., 1994). La ecuación para la estimación de pérdida de suelo planteada por la USLE es la siguiente (Ec. 9) :

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \left(\frac{t}{ha * año} \right) \quad (Ec. 9)$$

Donde R es el factor por erosividad de la lluvia (expresada en $hJ \text{ cm m}^{-2} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$) definido como:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210.2 + 89 \log I_j) (I_j * T_j) I_{30}}{100} \quad (Ec. 10)$$

En la que T_j es el periodo de tiempo (hr) para intervalos de lluvia homogéneo, I_{30} es la máxima intensidad de lluvia, j son los intervalos y n el número de intervalos.

El submodelo de sedimentos del TETIS requiere información del factor K , que es el factor por erosionabilidad del suelo ($t \text{ m}^2 \text{ hr ha}^{-1} \text{ hJ cm}^{-1}$), el cual es determinado mediante la ecuación de Wischmeier et al. (1971) como sigue (Ec. 11):

$$100 * K = [10^{-4} * 2.71 * T^{1.14} * (12 - MO)] + 4.2 * (E - 2) + 3.2(p - 3) \quad \left(\frac{t * m^2 * h}{ha * hJ * cm} \right) \quad (Ec. 11)$$

Donde; $T = [(100 - \text{Arcilla})(\text{Limo mas arena muy fina})]$

MO = porcentaje de materia orgánica

E = parámetro de estructura

p = parámetro de permeabilidad

Se determina el factor L correspondiente a la longitud de la ladera y es un valor adimensional (Ec. 12), donde x es la componente horizontal de la ladera, m es calculado como $[B/(1+B)]$, B es el cociente entre la erosión en regueros y la erosión entre regueros de la siguiente forma:

$$L = \left(\frac{x}{22.1} \right)^m \quad (Ec. 12)$$

El factor S es la pendiente de la ladera (adimensional) calculado así (Ec. 13)

$$S = \frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613} \quad (Ec. 13)$$

Por otro lado C es el factor que tiene en cuenta la eficacia de los cultivos para proteger el suelo y manejo del suelo (adimensional), este valor se selecciona de los valores propuestos por el Instituto Español para la conservación de la Naturaleza (ICONA), valores presentes en la Tabla 7:

Tabla 7. Factor C

Código	Símbolo	Descripción	C
1	Am	Arbustos y Matorrales	0.15
2	Bpd, Bpt	Bosque	0.045
3	Bf	Bosque natural Fragmentado	0.012
4	Mc	Cultivos	0.25
5	Cat	Cultivos permanentes	0.25
6	Csp	Cultivos semipermanentes	0.25
7	Mv	Cultivos y Pastos	0.25
8	Zn	Glacial	0.8
9	Pn, Pm	Pastos naturales	0.004
10	Par	Pastos y arboles	0.15
11	Prs	Pastos y rastrojo	0.08
12	Ra	Rastrojo	0.2
13	Af	Roca	0.8
14	Aa	Sin cobertura	0.8
15	Td, Ze	Suelo desnudo	0.8
16	Vp	vegetación de paramo	0.8
17	Zm	Zona Militar	0
18	Zu	Zona Urbana	0
19	Ir	Instalaciones recreativas	0
20	Lg	Cuerpo de agua	0
21	Vr	vegetación rupícola	0.8

Fuente: Autor.

Finalmente el factor P asociado a las prácticas de conservación es un valor adimensional que tiene relación con el suelo perdido y el que se perdería en la máxima pendiente es seleccionado de la Tabla 8.

Tabla 8. Factor P

Unidad de suelo	Descripción	Material parental	P
MKB	Consociación Alic Hapludands	Material parental constituido por cenizas volcánicas y en algunos sectores por rocas metamórficas (esquistos).	1
MKG	Consociación Typic Hapludands	Suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas localizadas sobre andesitas	1
MQC	Asociación Typic Humitropepts - Typic Troporthents	Material parental constituido por rocas metamórficas mezcladas con cenizas volcánicas	1
MQD	Asociación Typic Eutropepts- Typic Troporthents-Entic Hapludolls	Suelos localizados en el batolito de Ibagué, con erosión hídrica ligera y deslizamientos frecuentes	1
MQE	Asociación Typic Troporthents – Typic Dystropepts	Suelos que se han desarrollado a partir de rocas ígneas (tonalitas y granodioritas)	1
MDA	Grupo Indiferenciado Thaptic Haplocryands Y Lithic Cryorthents Y Typic Cryaquents	Presencia de depresiones de origen glaciar, con algunas zonas de acumulación de material orgánico sin descomponer	1
MGA	Consociación Typic Melanudands	Suelos conformados a partir de cenizas volcánicas	3
MGB	Grupo Indiferenciado Lithic Troporthents, Lithic Hapludands Y Lithic Tropofolists	Suelos donde predomina la presencia de tonalitas y andesitas con recubrimiento de cenizas volcánicas	3
MGC	Consociación Typic Hapludands	Material parental constituido por cenizas volcánicas, depositadas sobre andesitas.	1
MWD	Asociación Afloramientos Rocosos - Typic Ustorthents	Material parental constituido por esquistos y arenas volcánicas.	6

NP	Consociación NO SUELO - nieve perpetua	No hay suelo, solo nieve.	6
PWD	Consociación Typic Haplustalfs	Suelos que han evolucionado a partir de lodo y aglomerados de origen volcánico y de aluviones	1
PWL	Grupo Indiferenciado Typic Ustifluvents, Vertic Haplustalfs Y Typic Ustipsamments	Suelos que se han derivado de sedimentos coluvio- aluviales heterométricos	1
MQO	Grupo Indiferenciado Typic Tropofluvents Y Aeric Tropaquepts	Material parental constituido por sedimentos coluvio- aluviales heterométricos	1
MKI	Consociación Fluventic Humitropepts	Suelo desarrollado a partir de sedimentos heterométricos de matriz fina	5
MQH	Asociación Typic Dystropepts - Typic Troporthents	Consiste en areniscas y arcillolitas de la formación Saldaña	1
MQJ	Consociación Typic Troporthents	Suelo conformado por esquistos y arenas volcánicas	1
MWA	Asociación Lithic Ustorthents - Typic Ustorthents	Desarrollado sobre materiales sedimentarios de areniscas y arcillolitas, están afectados de erosión hídrica laminar en grado moderado a severo	6
MWC	Asociación Usticdystropepts- Lithic Ustorthents	Suelos desarrollados sobre rocas sedimentarias arcillositas y areniscas con intrusiones de cillolitas y granodioritas	6
MWJ	Asociación Entic Haplustolls - Ustic Dystropepts	Materiales litológicos están formados por conglomerados y areniscas, las tierras están dedicadas a ganadería extensiva	1
PWH	Asociación Typic Ustorthents- Lithic Ustorthents - Typic Natrustalfs	Consiste en materiales tobáceos, cantos y bloques de roca volcánica	4
MAA	Consociación NO SUELO – afloramientos rocosos	Grandes afloramientos de roca y extensos depósitos de arena, cubiertos de nieve en las épocas frías del año.	1

MKD	Consociación TYPIC TROPORTHENTS	Consiste predominantemente de rocas tonalitas	1
ZONA URBANA	-	Suelo urbanizado o construído	6

Fuente: Autor con base en información de Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (1989).

Según Redhisp (2014), en el modelo TETIS la capacidad de transporte es empleada en primera instancia para el arrastre de material y finalmente si hay remanente de capacidad de transporte continúa el proceso de erosión del material parental. Dentro de los resultados de la simulación el TETIS permite identificar el volumen de sedimentos depositados, suspendidos y erosionados del material parental para un intervalo de tiempo definido.

2.4.1 Parámetros del modelo distribuido

En este estudio se planteó la simulación de cuatro escenarios de cambios de uso de suelo presentados en la Tabla 9, adicionalmente se toman como datos de entrada en el modelo distribuido la geología y el modelo de elevación digital de la cuenca del Río Combeima (MED), del cual se extraen mediante la utilización de la herramienta ArcGIS el modelo de elevación digital, el mapa de dirección de flujo, dirección de acumulación y el mapa de pendientes como se muestran en la Figura 17.

Tabla 9. Escenarios de simulación

Escenario	Descripción
2007	Basado en la cobertura y uso de suelo de 2007.
Pastos	Basado en la cobertura y uso de suelo homogénea de pastos.
Cultivos	Basado en la cobertura y uso de suelo homogénea de cultivos.
Bosques	Basado en la cobertura y uso de suelo homogénea de bosques.

Fuente: Autor.

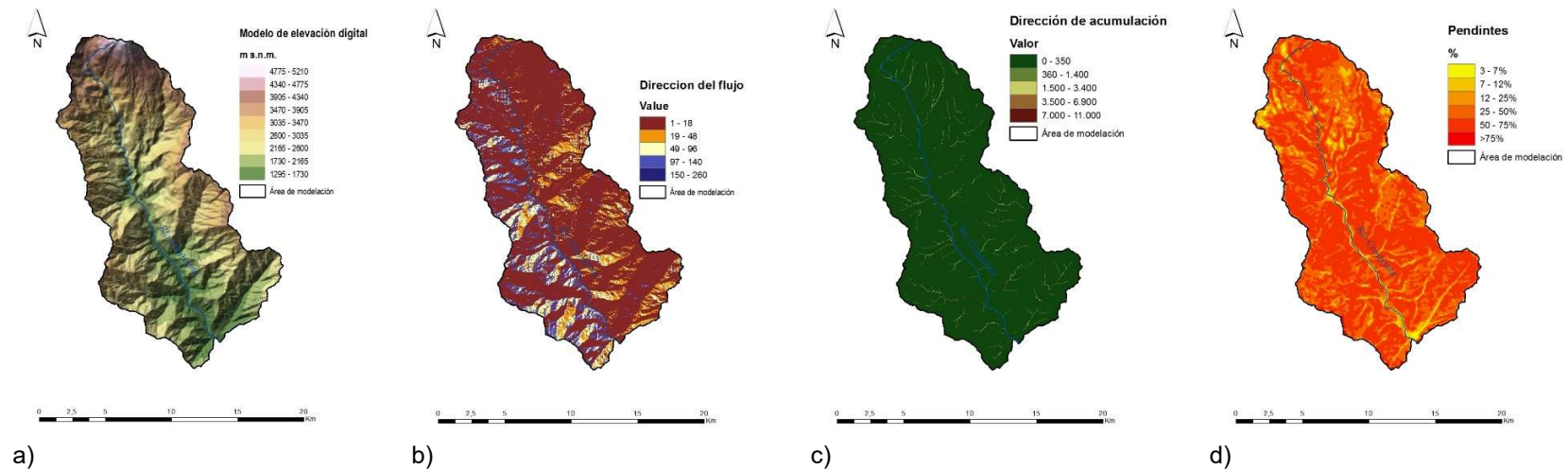


Figura 17. Parámetros morfológicos de la Cuenca. a) Modelo de elevación digital. b) Dirección de flujo c) Dirección acumulación. d) Pendientes.

Fuente: Autor.

Se toman las unidades de suelo (Esc. 1:100000), geología (Esc. 1:500000), cobertura y velocidad de percolación definidos por Rojas (2017) representados en la Figura 18.

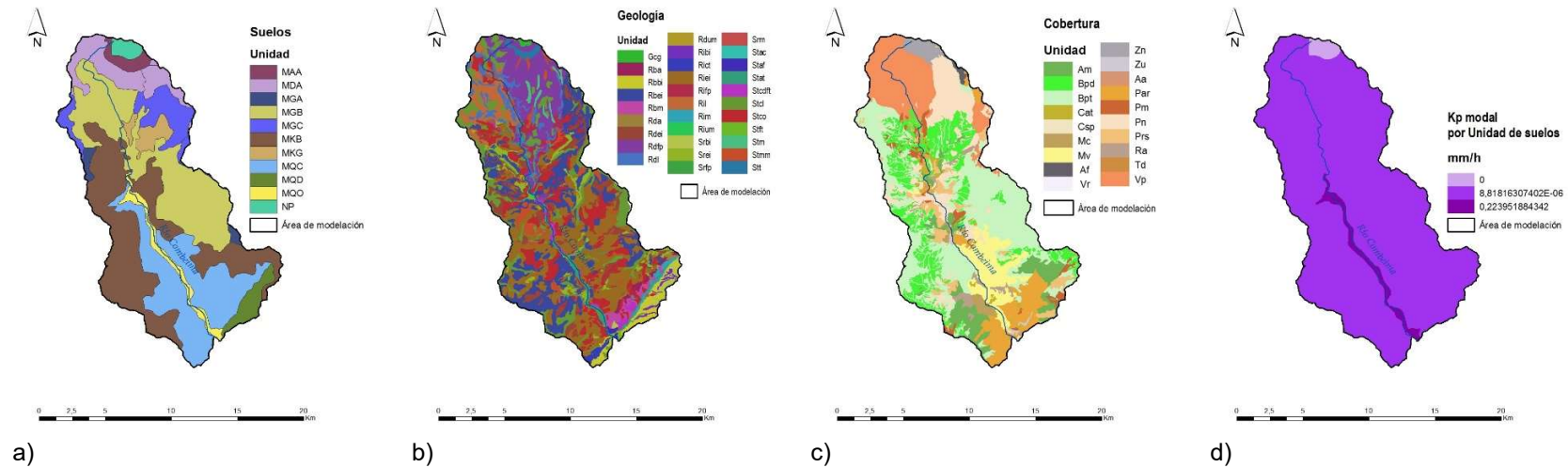


Figura 18. Parámetros generales de la Cuenca. a) Unidades de suelos. b) Geología. c) Cobertura. d) Velocidad de percolación

Fuente: (Adaptado de Rojas, 2017).

De igual manera el modelo toma como datos de entrada la información correspondiente a las series de precipitación y temperatura de los periodos 1971 al 2015 obtenidas de la información proporcionada por las estaciones meteorológicas del IDEAM (Tabla 4), junto con los valores de caudal obtenidos de la estación hidrometeorológica Montezuma (21217180) localizada en el punto de cierre de la cuenca, los datos de evapotranspiración son trabajados con la ecuación de Turc (Turc, 1954, 1961) a partir de los registros de la estación Perales (21245040). A partir de la serie de temperatura de Perales, se aplicó la ecuación de escalamiento de la temperatura por elevación (Poveda et al., 2007), de manera que se obtuvo la evapotranspiración en las demás estaciones de la cuenca.

Se realizó la definición de los parámetros del suelo y cubierta vegetal correspondientes a la capacidad de almacenamiento estático del suelo H_u , la permeabilidad superficial del suelo K_s , la permeabilidad horizontal del suelo K_{ss} , propiedades hidráulicas que son obtenidos con las funciones de pedotransferencia de Saxton & Rawls (2006), función que ha demostrado ser eficiente al ajustarse a las características de la cuenca del Río Combeima como reporta Peña (2017) y que se presentan en la Figura 19.

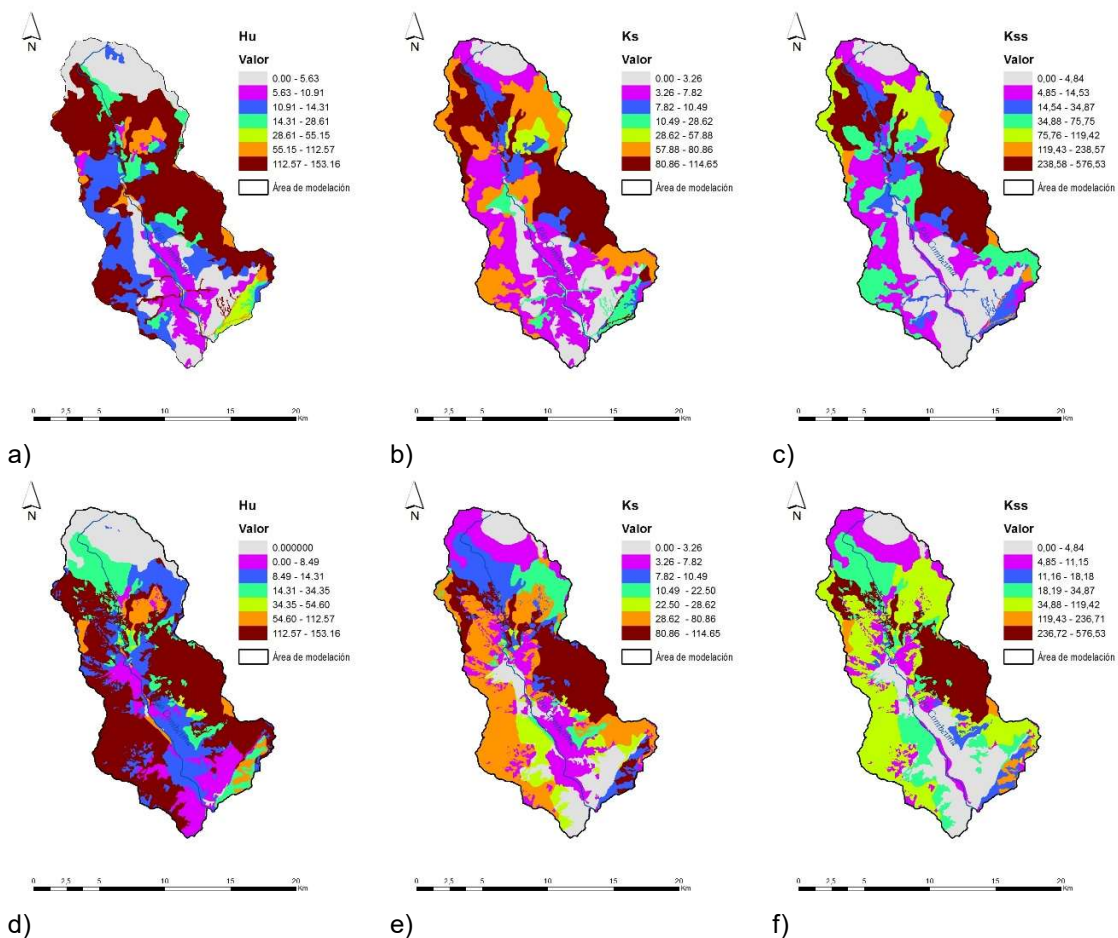


Figura 19. Parámetros edafológicos de la Cuenca años 2002 y 2007. a) H_u año 2002. b) K_s año 2002. c) K_{ss} año 2002. d) H_u año 2007. e) K_s año 2007. f) K_{ss} año 2007

Fuente: (Adaptado de Rojas, 2017).

Finalmente se ingresan los valores de capacidad de almacenamiento estático del suelo H_u , la permeabilidad superficial del suelo K_s , capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso K_p , conductividad hidráulica horizontal saturada del

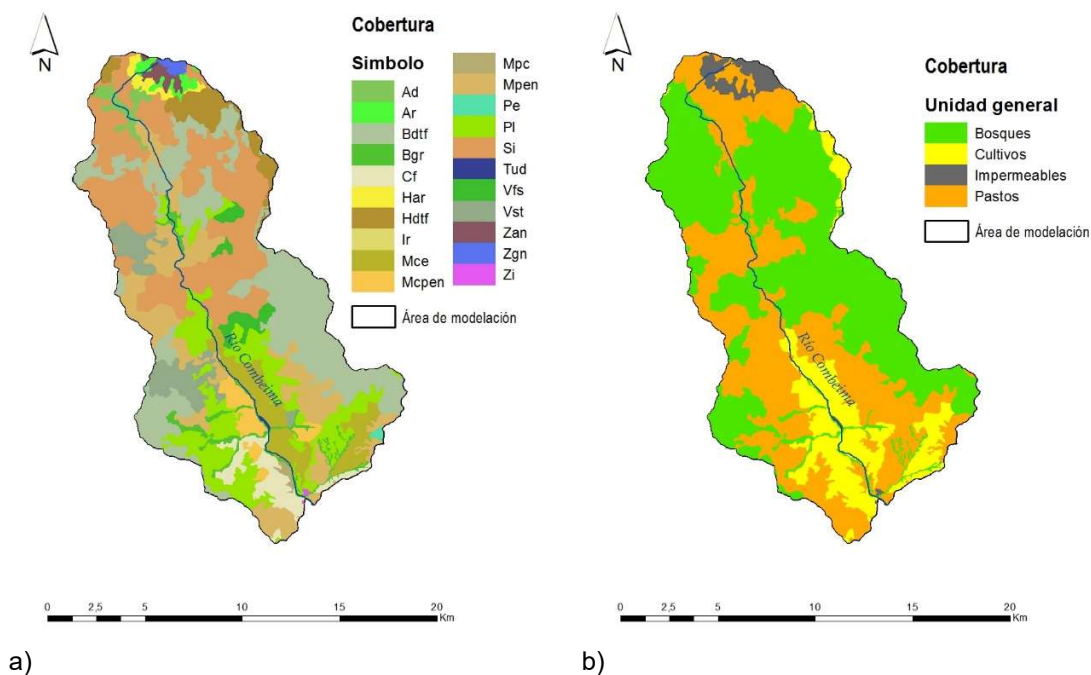
suelo Kss, permeabilidad horizontal del estrato rocoso Ksa, la capacidad de percolación profunda Kps, la velocidad de flujo superficial en ladera Vt y las características de la vegetación I_{max}, valores correspondientes a los presentados en la Tabla 10:

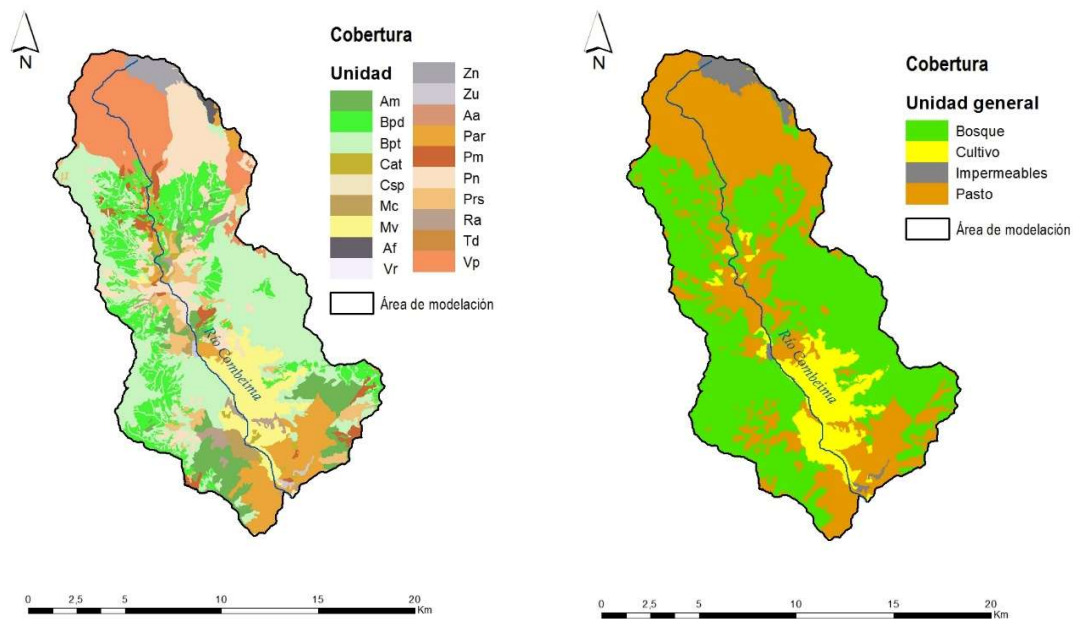
Tabla 10. Parámetros del suelo y edafología en relación con los escenarios de uso del suelo con punto de cierre en la estación Montezuma.

Cob.	Hu (mm)	Ks (mm)	Punto de cierre en Montezuma				Velocidad (m s ⁻¹)	I _{max} (mm)
			Kp (mm)	Kss (mm)	Ksa (mm)	Kps (mm)		
2007	75.01	44.04	2529.86	150.81	2529.86	0.01	0.98	5.17
Pastos	12.45	9.96	2529.86	23.24	2529.86	0.01	0.98	2
Cultivos	29.87	20.98	2529.86	49.73	2529.86	0.01	0.98	1
Bosques	121.90	72.78	2529.86	233.87	2529.86	0.01	0.98	9

Fuente: Autor.

Los mapas de uso del suelo empleados fueron los reclasificados por Rojas (2017) para los años 2002 y 2007 (Figura 20) en el que se reconfiguraron las coberturas en cuatro categorías generales: pastos, cultivos, bosques y superficiales impermeables por lo que para realizar la simulación hidrológica y sedimentológica en la cuenca del Río Combeima se emplean la cobertura de suelo de 2007, la de pastos, cultivos y bosques.





c) **Figura 20. Coberturas de suelo años 2002 y 2007 en la cuenca del Río Combeima. a) Cobertura del suelo año 2002. b) Cobertura reclasificada por unidad general año 2002. c) Cobertura del suelo año 2007. d) Cobertura reclasificada por unidad general año 2007.**

Fuente: (Adaptado de Rojas, 2017).

2.4.2 Calibración modelo hidrológico

Con el fin de verificar que el modelo matemático describa de manera aproximada el modelo real se busca la calibración del mismo mediante la comparación del gráfico de resultados de caudal líquido observado con el caudal simulado para la condición de uso de suelo de 2007, para esto el modelo hidrológico del TETIS incluye como primera medida coeficientes de correlación con la altura para interpolación espacial, contiene también los parámetros agregados del submodelo de nieve, además de nueve factores correctores y seis variables de estado relacionadas con la cantidad de agua inicial en el embalse (Tabla 11) valores que pueden ser modificados manual o automáticamente.

Tabla 11. Factores correctores y variables de estado modelo hidrológico TETIS.

Factores correctores	Variables de estado
FC 1 Almacenamiento estático	H 1 Almacenamiento estático
FC 2 Evapotranspiración	H 2 Almacenamiento superficial o agua en superficie
FC 3 Infiltración	H 3 Almacenamiento gravitacional
FC 4 Escorrentía directa	H 4 Estado inicial del acuífero o nivel del acuífero
FC 5 Percolación	H 5 Caudal circulante inicial o cauce a sección llena
FC 6 Interflujo	H 6 Estado inicial del tanque de intercepción o intercepción por la vegetación
FC 7 Perdidas Subterráneas	
FC 8 Flujo base o subterráneo	
FC 9 Velocidad en los cauces	

Fuente: (Grupo Redhisp, 2014a)

De igual manera es importante definir los parámetros del submodelo de sedimentos del TETIS, el cual simula los procesos de producción, transporte y deposición de partículas en la cuenca de manera unidimensional haciendo distinción entre aquellas tamaño arena, limo y arcilla. Es por esto que el TETIS incluye tres factores correctores que pueden ser manipulados manual o automáticamente (Tabla 12) y que permiten direccionar el modelo teniendo en cuenta la capacidad de transporte en ladera, en cárcavas y en el cauce.

Tabla 12. Factores correctores submodelo de sedimentos TETIS.

Factores correctores
FCsed 1 Capacidad de transporte en ladera
FCsed 2 Capacidad de transporte en cárcavas
FCsed 3 Capacidad de transporte en cauces

Fuente: (Grupo Redhisp, 2014a)

Se seleccionan los años 2008 y 2003 como los periodos a evaluar, el primero debido que corresponde al año del que se dispone información de cobertura y uso del suelo para la simulación y el último por ser un año cercano a la condición de 2007 y cuyo registro de caudal máximo de acuerdo a los registros del IDEAM (Figura 21) son importantes.

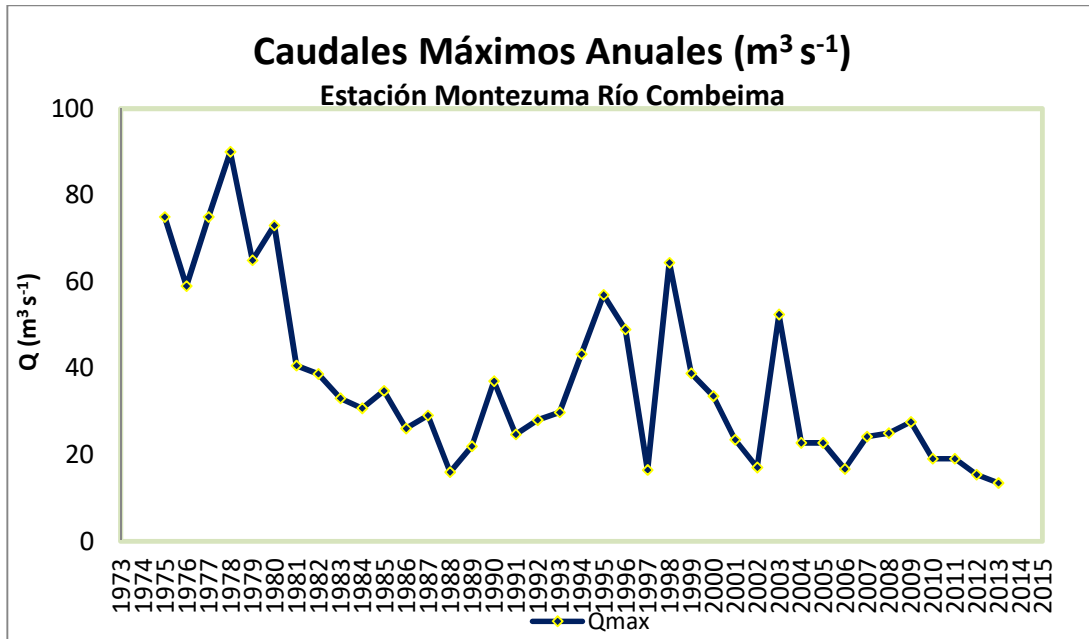


Figura 21. Caudales máximos anuales en el Río Combeima.

Fuente: Autor.

Finalmente se toma como criterio de verificación de la calibración y validación la comparación visual del gráfico de caudal líquido observado con el simulado y el chequeo de los valores obtenidos de índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), calculado de la siguiente manera (Ec. 14):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (Ec. 14)$$

Donde \hat{Q}_i es el caudal simulado, Q_i el caudal observado y \bar{Q} el valor medio de los caudales observados.

2.5 Tránsito de caudales y transporte de Sedimentos

La evaluación del tránsito de caudales y el transporte de sedimentos se efectúa en HEC RAS, para esto se decide tomar un tramo del cauce del Río Combeima, sector comprendido entre Juntas y la estación hidrometeorológica Montezuma donde está ubicada la bocatoma de Ibagué (Figura 22).

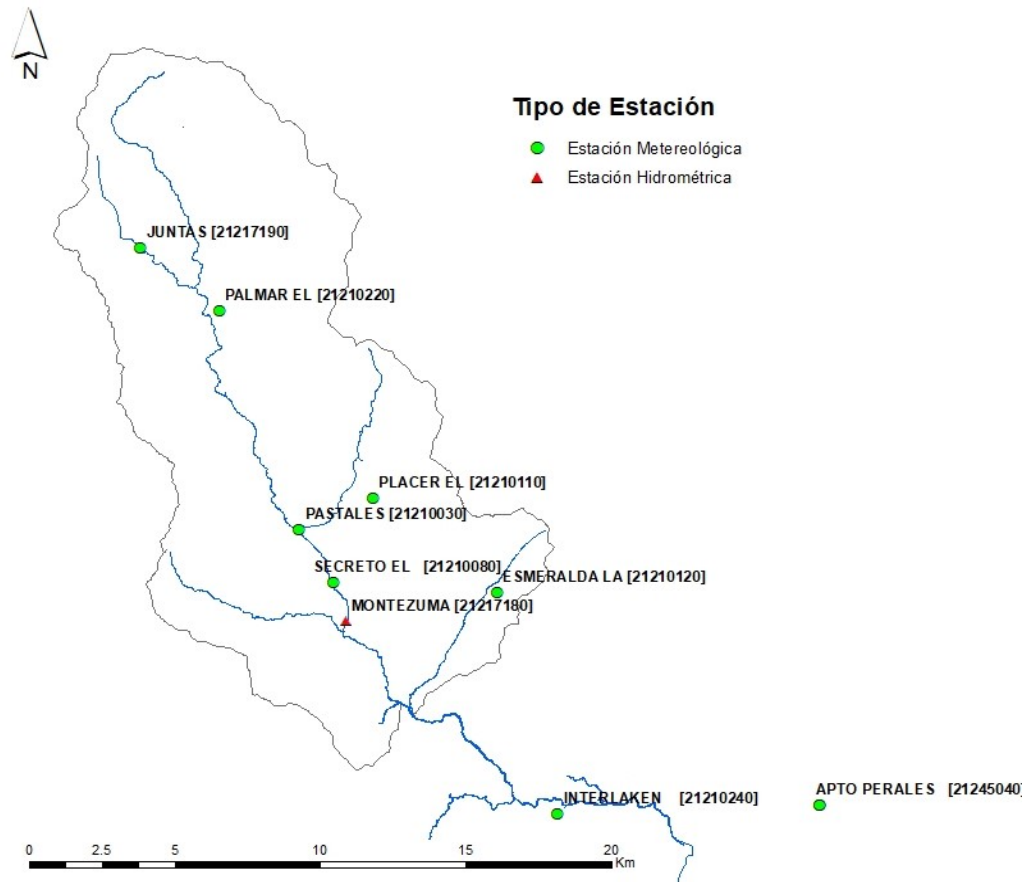


Figura 22. Estaciones y esquematización del sistema hidráulico a modelar (cuenca del Río Combeima, Ibagué –Tolima).

Fuente: Autor.

El modelo de transporte de sedimentos es realizado con la metodología desarrollada por la USACE: HEC RAS 5.0.3 (US Army Corps of Engineers, 2016) el cual es un modelo bidimensional de flujo que puede ser trabajado con las ecuaciones: Full Saint Venant o las de difusión de onda (Brunner, 2016). La herramienta puede trabajarse completamente bidimensional o híbrida 1D2D en la que se incluye el cauce del río 1D y los planos de inundación 2D (Moya, et al., 2016).

Para el estudio de sedimentos se emplea la hidráulica de flujo cuasi estático que divide el tiempo en tres pasos o en tres incrementos computacionales en los que se tiene transporte

hidráulico y de sedimentos. El transporte de sedimentos es resuelto mediante la función de Laursen (Ec. 15):

$$C_m = 0.01 \gamma \left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_o}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u^*}{\omega}\right) \quad (\text{Ec. 15})$$

En la que C_m es la concentración de descarga de sedimentos, γ es el peso unitario del agua, d_s es el diámetro de la partícula, D la profundidad de flujo efectiva, τ'_o es el esfuerzo cortante en el lecho por la resistencia de los granos, τ_c es el esfuerzo cortante crítico en el lecho y $f\left(\frac{u^*}{\omega}\right)$ corresponde a la relación de velocidad de corte y velocidad de caída (Brunner, 2016).

El transporte de partículas en suspensión se da cuando la velocidad de caída es menor a la turbulencia que hay en el lecho del cauce (Brunner, 2016), el HEC RAS ofrece tres métodos para el cálculo de la velocidad de caída de las partículas: Toffaleti (1968), Van Rijn (1993), and Rubey (1933). La selección de uno de los tres métodos se realiza de acuerdo al tamaño del material transportado teniendo en cuenta que Toffaleti presenta valores de velocidad de caída para partículas de arena fina a grava media, Van Rijn trabaja con partículas de tamaño arena media, arena fina y finos y Rubey desarrolla una ecuación para partículas de limo, arena y grava. Partiendo del tamaño de partículas observadas durante un evento de crecida en el Combeima puede identificarse que se transporta en suspensión partículas finas, arenas y detritos por cuanto el método de velocidad de caída empleado por Rubey (1933) se considera el más pertinente para este trabajo.

La formulación de Rubey propone una relación (Ec. 16) basada en la ley de Stoke en la que interviene el fluido, los sedimentos y la velocidad de caída, donde el agua tiene una temperatura de 16°C (Brunner, 2016).

$$\omega = F_1 \sqrt{(s-1)gd_i} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd_i^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd_i(s-1)}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Ecuaciones en las que ω es la velocidad de caída de las partículas, ν es la viscosidad cinemática, s es la gravedad específica de las partículas, g es la aceleración debido a la gravedad y d el diámetro de las partículas.

Adicionalmente el HEC RAS ofrece tres algoritmos para la representación de los granos que están en el lecho: Thomas, Copeland y el método de la capa activa, los tres métodos dividen el material del lecho en una capa activa en la que se tiene una franja superficial que se modifica debido que son partículas que pueden transportarse y se tiene una capa inactiva que se encuentra por debajo de la activa que no sufre cambios.

El algoritmo empleado en este trabajo es el método por defecto definido en el HEC RAS que corresponde al algoritmo de Thomas (1982) desarrollado para suelos gruesos bien gradados en el que se calcula la capacidad de transporte para la capa activa la cual según esta metodología es dividida en dos estratos (cobertura y estrato subsuperficial) para la que el HEC RAS define una profundidad de equilibrio (Deq) (Ec. 18) que es la mínima profundidad donde las fuerzas del agua no son capaces de remover partículas de la cobertura y la capa inactiva (Brunner, 2016).

$$Deq = \left(\frac{q}{10.21 d_i^{1/3}} \right)^{6/7} \quad (Ec. 18)$$

Donde d_i es el diámetro de la partícula, D es la profundidad donde no hay transporte de granos y q es la descarga de agua en cfs ft⁻¹ y se desarrolla con la ecuación de Stricker:

$$q = \frac{1.49}{\left(\frac{d_i^{1/6}}{19.3} \right)} D^{5/3} \left(\frac{d_i}{18.18 D} \right)^{1/2} \quad (Ec. 19)$$

En el proceso de modelación del flujo bidimensional y el transporte de sedimentos con la herramienta HEC RAS 5.0.3, se introduce el volumen de sedimentos producidos en la cuenca por erosión laminar estimados con TETIS y el levantamiento batimétrico realizado en el sector de estudio. Se toma la información de los puntos correspondientes al eje del

Río Combeima y se determinan las secciones para cada uno teniendo en cuenta las dimensiones del canal principal de acuerdo al levantamiento realizado en la zona, esto con el fin de exportar las características físicas del cauce a la herramienta HEC RAS con la cual se realizaron las corridas.

Dentro de la herramienta se identifica la elevación de la lámina de agua en cada sección y se define el valor n de Manning para los márgenes derecho e izquierdo del canal, además se define un valor de rugosidad n para el sector definido por el cauce del río. Posteriormente se establecen las condiciones de contorno del cauce y se inician las simulaciones con ayuda del HEC RAS 5.0.3.

2.5.1 Parámetros del modelo hidráulico

El modelo hidráulico se define como una condición de flujo casi permanente (quasi unsteady flow) con el fin de realizar el análisis de transporte de sedimentos en la cuenca del Río Combeima, para esto como datos de entrada se define la geometría del modelo a partir de las batimetrías realizadas por Lizcano Murcia & Muñoz Barreto (2018) en el sector Juntas hasta el Barrio Libertador y por Benavides et al. (2018) desde el centro poblado de Villa Restrepo hasta la Bocatoma de Ibagué.

Luego se asignan los valores de caudal obtenidos del análisis de frecuencias de caudales máximos para cada uno de los escenarios planteados de cambio de uso del suelo que fueron calculados de los resultados del modelo hidrológico.

Posteriormente se definen las características del lecho del río a partir de curvas granulométricas proporcionadas por el IDEAM en la estación Montezuma y Juntas como información de entrada a los datos de sedimentos del HEC RAS.

Adicionalmente y como se menciona en el ítem 2.3 del presente documento se toman como función de transporte la ecuación de Laursen (Copeland), como método de representación de los granos en el lecho la ecuación de Thomas y finalmente como método de velocidad de caída de las partículas la ecuación de Rubey.

Finalmente se especifica la carga de sedimentos con base a los resultados del modelo hidrológico, se utilizaron las series de sedimentos producidos en la cuenca del Río Combeima y se realizó un análisis de frecuencias, de manera que con los caudales líquidos y el caudal sólido se analice el transporte de partículas en el tramo comprendido entre Juntas y Montezuma del Río Combeima mediante simulación en HEC RAS

2.5.2 Calibración modelo hidráulico

La variable de calibración del modelo hidráulico fue el coeficiente de rugosidad “n” de Manning, el cual se modificó asignando valores de “n” a los márgenes derecho, centro e izquierdo del río para la verificación de los niveles de lámina de agua calculados en contraste con los observados para todas las secciones en las que se dividió el cauce en el momento del aforo. Los valores del coeficiente de Manning se seleccionaron basados en los valores sugeridos en la documentación del HEC RAS y en la observación de las condiciones de campo para cada sección. La calibración se realizó de manera manual a partir de la comparación de los valores de nivel de agua observados por medio de las batimetrías realizadas por Lizcano Murcia & Muñoz Barreto (2018) en el sector Juntas hasta el Barrio Libertador y por Benavides et al (2018) desde el centro poblado de Villa Restrepo hasta la Bocatoma de Ibagué, con respecto a su aproximación a los valores de la respuesta del modelo hidráulico HEC RAS.

2.6 Escenarios de simulación

Teniendo en cuenta la diversidad de la cobertura vegetal existente en la cuenca, se realizó la modelación del comportamiento del cauce y de la cuenca bajo cuatro escenarios de usos de suelo: la primera corresponde a las características encontradas en la cuenca para el año 2007 y se realizó el análisis de tres escenarios más, considerando una primera condición en la que la cuenca tiene una cobertura generalizada de pastos, otra de cultivos y finalmente una de bosques; lo cual posibilita la identificación de las tasas de erosión de cada una y así mismo las de sedimentos, además de la identificación del uso de suelo favorable en términos de la descripción de la magnitud de eventos de crecidas e inundaciones.

Los escenarios de uso de suelo fueron definidos mediante la metodología CORINE Land cover adaptada para Colombia de manera visual en pantalla para el material encontrado en la cuenca del Río Combeima, reconociendo la relevancia que tiene dentro de las propiedades hidráulicas y características de drenaje del suelo los tipos de cobertura, para esto se identificaron regiones con presencia de tejido urbano discontinuo; café; pastos limpios; mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales; mosaico de pasto con espacios naturales; bosque de galería y/o ripario y finalmente arbustos y matorrales; de ahí que para el trabajo se opte por el análisis de tres tipos de cobertura en general: pastizales, cultivos y bosques, escenarios también manejados en otros estudios como el empleado por Peña et al. (2016).

Para la evaluación del comportamiento hidrológico en el TETIS se incluye la información característica de la cuenca como son: registro de precipitaciones para el periodo comprendido entre 1971 y 2015, cobertura de nieve, almacenamiento del suelo, capacidad de infiltración y percolación del suelo, y otras como la conductividad hidráulica interflujo y la del acuífero. Por otra parte el submodelo de sedimentos del TETIS se alimenta de los datos correspondientes de los factores C, K y P de la USLE así como la cantidad de arena, limo y arcilla. Finalmente con el fin de obtener la cantidad de sedimentos movilizados por erosión laminar en los escenarios de uso de suelo planteados (2007, pastos, cultivos y bosques) se asignan los valores de H_u , K_s , K_{ss} , cobertura y el factor C de la USLE correspondientes a cada uso del suelo obteniendo el volumen de sedimentos de tamaño arena, limo y arcilla que son posteriormente depositados al cauce principal del Río Combeima.

2.7 Análisis de Frecuencia de Caudales Máximos

Para la realización del análisis de frecuencias se empleó el software gratuito AFINS (Botero & Francés, 2010) versión 2.0 desarrollado por el grupo de investigación de hidráulica e hidrología de la Universidad Politécnica de Valencia, herramienta de gran utilidad para realizar análisis de frecuencia de extremos con información sistemática y no sistemática.

Se efectúa el análisis de frecuencias de los caudales máximos de la cuenca del Río Combeima ubicando punto de cierre en Montezuma, empleando información sistemática

con función de distribución sin límite superior para todos los escenarios de simulación, se realizó la verificación de la función que presente mejor ajuste respecto al comportamiento de la cuenca, por lo que realiza el análisis utilizando las funciones Gumbel, General Extreme Values –GEV– y LogNormal.

La distribución de probabilidad Gumbel se representa de la siguiente manera (Ec. 20) y (Ec. 21)

$$F(x) = e^{-e^{\alpha(x-\beta)}} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde $F(x)$ es la probabilidad acumulada, $f(x)$ la función de densidad, α es el parámetro de escala, β es el parámetro de posición y x_q representa el cuantil para un nivel de probabilidad p (Ec. 22).

$$x_q = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln p] \quad (\text{Ec. 22})$$

La segunda función de distribución empleada corresponde a la distribución GEV (General Extreme Values) la cual es empleada para el análisis de frecuencias de valores extremos que trabaja con los parámetros α (parámetro de escala), β (parámetro de posición) y k (parámetro de forma) como sigue: (Ec. 23) y (Ec. 24)

$$F(x) = e^{\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\beta)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}\right\}} \quad k \neq 0 \quad (\text{Ec. 23})$$

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k(x-\beta)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}-1} F(x) \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde siguiendo la distribución Weibull:

$$\begin{array}{ll} k < 0 & \beta + \frac{\alpha}{k} \leq x < \alpha \\ k = 0 & -\alpha < x < \alpha \\ k > 0 & -\alpha < x \leq \beta + \frac{\alpha}{k} \end{array}$$

Finalmente la densidad de probabilidad de la distribución LogNormal es estimada como:
(Ec. 25)

$$f(x) = \frac{1}{x \sigma \alpha \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(\ln x - \mu\beta)^2}{2\sigma\alpha^2}\right]} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde $\mu\beta = \widehat{\mu\beta} = \beta$ es la media o el parámetro de posición y $\sigma\alpha = \widehat{\sigma\alpha} = \alpha$ es la desviación estándar del logaritmo de la serie o el parámetro de escala.

Se emplea el método de la máxima verosimilitud para la identificación de los parámetros de las funciones de probabilidad descritas anteriormente como se muestra a continuación:

GUMBEL
$$L(\alpha, \beta) = \alpha^N e^{-\alpha \sum_{i=1}^N (x_i - \beta) - \sum_{i=1}^N e^{-\alpha(x_i - \beta)}} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\ln L(\alpha, \beta) = N \ln \alpha - \alpha \sum_{i=1}^N (x_i - \beta) - \sum_{i=1}^N e^{-\alpha(x_i - \beta)} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde β y α se determinan como:

$$\beta = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{N}{\sum_{i=1}^N e^{-\alpha x_i}} \right] \quad (\text{Ec. 28})$$

$$\frac{1}{\alpha} = \mu - \frac{\sum_{i=1}^N x_i e^{-\alpha x_i}}{\sum_{i=1}^N e^{-\alpha x_i}} \quad (\text{Ec. 29})$$

GEV
$$\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1 - k - x_i^{1/k}}{x_i} \right] = 0 \quad (\text{Ec. 30})$$

LOGNORMAL
$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (\text{Ec. 31})$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \beta)^2 \quad (\text{Ec. 32})$$

2.8 Evaluación del riesgo por crecidas asociado a la vulnerabilidad física de la captación

Los mapas de riesgo por inundación se elaboran con la superposición de los mapas de amenaza y exposición de los elementos ante el evento (UNISDR, 2017a).

La amenaza fue evaluada tomando en consideración los criterios de la literatura existente ((Universidad Nacional, 2001, en Vélez et al., (2003)) en el que se define la Figura 23 como ayuda para evaluar el nivel de daño que genera una crecida de inundación en un periodo de retorno de 100 años.

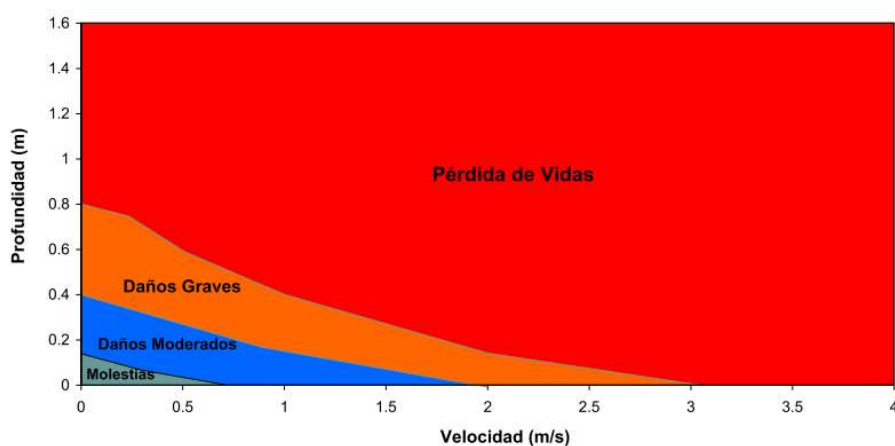


Figura 23. Tipos de daño por inundación.

Fuente: Tomado de (Vélez et al., 2003).

De lo anterior se planteó como criterios para la evaluación de la amenaza los parámetros encontrados en la Tabla 13.

Tabla 13. Amenaza por crecidas.

Nivel	Frecuencia Tr (años)	Magnitud ($m^3 s^{-1}$)
Bajo	Tr < 10	Qmax < 9
Medio	10 > Tr > 25	10 < Qmax < 30
Alto	25 > Tr > 100	Qmax > 30

Fuente: Autor.

Por lo que la amenaza según los resultados de cada escenario sería:

Tabla 14. Amenaza por crecidas en cada escenario.

Escenarios	Q (m ³ s ⁻¹)	Frecuencia	Magnitud	Amenaza Crecidas
2007med	6.623	Alto	Bajo	Medio
2007 (100 años)	35.68	Bajo	Alto	Alto
Bosque (100 años)	27.17	Bajo	Medio	Medio
Cultivo (100años)	36.28	Bajo	Alto	Alto
Pastos(100 años)	47.68	Bajo	Alto	Alto

Fuente: Autor.

Se plantea la vulnerabilidad física por crecidas como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Vulnerabilidad física por crecidas.

Nivel	v*h
Bajo	<0.5
Medio	0.5<h<2
Alto	> 2

Fuente: Autor.

Donde v corresponde a la velocidad del flujo y h es la profundidad del tirante de agua.

Por lo que la vulnerabilidad física según los resultados de cada escenario es (Tabla 16):

Tabla 16. Vulnerabilidad física por crecidas en cada escenario.

Escenarios	Q (m ³ s ⁻¹)	h (m)	v (m s ⁻¹)	v*h	Vulnerabilidad Física
2007med	6.623	0.54	1.94	1.0476	Medio
2007 (100 años)	35.68	1.4	2.87	4.018	Alto
Bosque (100 años)	27.17	1.27	2.89	3.6703	Alto
Cultivo (100años)	36.28	1.4	2.85	3.99	Alto
Pastos(100 años)	47.68	1.64	2.57	4.2148	Alto

Fuente: Autor.

Finalmente el riesgo por crecidas en cada escenario seria Tabla 17:

Tabla 17. Riesgo físico por crecidas en cada escenario.

Escenarios	Amenaza	Vulnerabilidad	Riesgo
2007med	Medio	Medio	Medio
2007 (100 años)	Alto	Alto	Alto
Bosque (100 años)	Medio	Alto	Alto
Cultivo (100 años)	Alto	Alto	Alto
Pastos(100 años)	Alto	Alto	Alto

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta que el riesgo físico por crecidas se evalúa como se presenta en la Tabla 18:

Tabla 18. Riesgo físico por crecidas.

Amenaza	Vulnerabilidad		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	Alto	Alto	Alto
Medio	Alto	Medio	Medio
Bajo	Medio	Bajo	Bajo

Fuente: Autor.

2.9 Evaluación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento por aumento en los niveles de turbiedad por procesos erosivos

La amenaza fue evaluada tomando en consideración los registros de turbidez (UNT) y la concentración de sólidos en suspensión (CSS) medidos en la fuente, para esto se revisó la teoría de Mie (Mishendo et al. (1999) en Hannouche et al., (2011)) en donde se establece que para n clases de partículas homogéneas suspendidas (con el mismo tamaño, forma, índice de refracción y gravedad específica) es posible encontrar una relación lineal entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión.

Las correlaciones de tipo lineal entre dichas variables han sido ampliamente utilizadas por autores como Tan et al., (2017); Giuliana et al., (2016); Restrepo & Pierini, (2012); Hui et al., (2011); Murillo, (2009); Pavanelli & Bigi, (2005) en cuyos estudios realizan representaciones gráficas para el análisis de las características del agua.

Es igualmente importante notar que cada fuente tiene una curva de correlación particular, debido que cada una arrastra sedimentos diferentes en términos de su tamaño, forma, color, gravedad específica e índice de refracción (Duchrow & Everhart, 2011)

Para el presente estudio se trabajó con los valores de turbidez y concentración de sólidos o partículas en suspensión medidos por la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado, IBAL S.A. E.S.P. en la bocatoma Combeima durante el periodo del 12 al 31 de diciembre del año 2016 con una resolución horaria de la turbidez y la concentración de partículas en suspensión, periodo para el cual la empresa de acueducto y alcantarillado presentó la disponibilidad de uso de un turbidímetro para la medición de concentración de sólidos.

La concentración de partículas en suspensión fue identificada mediante la utilización de un sensor para turbidez y contenido de sólidos in situ Turbimax CUS51D instalado por e IBAL en la bocatoma Combeima. Dicho turbidímetro está diseñado para la medición continua del contenido de sólidos presentes en el agua, donde el sensor emite un haz de luz que se dispersa en diferentes ángulos a la dirección de propagación al encontrarse con partículas ópticamente más densas definiendo la turbidez en función de la cantidad de luz dispersada en el medio (Endress + Hauser, 2018).

La vulnerabilidad en este caso es definida como la capacidad de tratamiento que tiene la planta del acueducto de Ibagué, por lo cual para la definición de los umbrales de vulnerabilidad se toma en consideración el manual de operaciones de la bocatoma Combeima establecido por el IBAL (2019).

En el manual de operaciones empleado por el IBAL se establece que la bocatoma Combeima no se opera con turbiedades mayores a 15000 UNT debido que la alta cantidad de material discreto puede causar el colapso de la PTAP al no ser posible su evacuación por medios de lavado convencional. Así mismo se identifica que con niveles de turbiedad inferiores a 8000 UNT se efectúa un tratamiento de agua en la planta sin inconvenientes y

con turbiedades entre 8000UNT y 15000 UNT la planta realiza procesos de reducción de velocidad del agua para aumentar el tiempo de retención y posibilitar que los materiales en suspensión se decanten. Es de esta manera como en la Tabla 19 se establecen los niveles de vulnerabilidad a emplear.

Tabla 19. Vulnerabilidad de la planta de tratamiento por aumento de turbiedad.

Nivel	Turbiedad (UNT)
Bajo	≤ 8000
Medio	$8000 < T < 15000$
Alto	≥ 15000

Fuente: Autor con base en información de PTAP IBAL (2019).

El riesgo es evaluado como la probabilidad de que la planta de tratamiento deje de funcionar por su exposición a diferentes niveles de concentración de sedimentos, es de este modo como se toma en consideración los niveles de amenaza por concentración de sólidos y la capacidad de tratamiento de la planta la cual define su vulnerabilidad. Los niveles de riesgo son los presentados en la Tabla 20.

Tabla 20. Riesgo de desabastecimiento por aumento de turbiedad.

Amenaza	Vulnerabilidad		
	Bajo	Medio	Alto
Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Medio	Medio	Medio	Alto
Alto	Alto	Alto	Alto

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estima la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de desabastecimiento por aumento de la turbiedad en el acueducto de Ibagué frente a diferentes escenarios de cambio de uso del suelo (2007, pastos, cultivos y bosques) realizando análisis de tránsito de caudales a 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

2.10 Evaluación de la vulnerabilidad por desabastecimiento asociado a sedimentos producidos en el cauce

Para evaluar la vulnerabilidad por desabastecimiento se plantean como parámetros de verificación el caudal sólido y los esfuerzos cortantes en el cauce principal de la cuenca del Río Combeima, estableciendo los niveles que se presentan a continuación:

Tabla 21. Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua.

Nivel	Qsólido (T d ⁻¹)	τ (N m ⁻²) (Max)
Bajo	< 0.1	$90 < \tau$
Medio	$0.1 < Q_s < 1500$	$90 < \tau < 120$
Alto	> 1500	$\tau > 120$

Fuente: Autor.

Por lo que la vulnerabilidad por desabastecimiento según los resultados de cada escenario sería:

Tabla 22. Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua en cada escenario.

Escenarios	Q (m ³ s ⁻¹)	h (m)	τ (max) (N m ⁻²)	τ (Med) (N m ⁻²)	Qsólido (T d ⁻¹)	Vulnerabilidad Desabastecimiento
2007med	6.623	0.54	121.92	98.07	0.0023	Bajo
2007 (100 años)	35.68	1.4	180.74	94.9	5460	Alto
Bosque (100 años)	27.17	1.27	194.94	106.4	932	Medio
Cultivo (100 años)	36.28	1.4	178.08	93.17	1891	Alto
Pastos(100 años)	47.68	1.64	134.87	75.66	5802	Alto

Fuente: Autor.

2.11 Evaluación de vulnerabilidad de desabastecimiento según localización de los sedimentos en la cuenca

Desde la década pasada los Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota (SIG) han sido empleadas para mapear, monitorear y predecir fallas por deslizamientos (Pardeshi et al., 2017) lo cual es útil en la evaluación del riesgo ante la ocurrencia de deslizamientos.

Amenaza de la ocurrencia de deslizamientos se define como:

$$A \cup S_{50-75\%} = L_A \quad (\text{Ec. 33})$$

$$L \cup S_{50-75\%} = L_L \quad (\text{Ec. 34})$$

$$Ar \cup S_{50-75\%} = L_{Ar} \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde A : Arena, L : Limo, Ar : Arcilla, S : Pendiente, L_A : Localización de arenas, L_L : Localización de limos y L_{Ar} : Localización de arcillas, donde la numeración que acompaña el símbolo de S corresponde a la pendiente a evaluar de ahí que por ejemplo $S_{50-75\%}$ hace referencia a pendientes entre 50 y 75%.

La amenaza (Am) es definida como la intersección entre la localización de arenas, limos y arcillas, así:

$$L_A \cap L_L \cap L_{Ar} = Am \quad (\text{Ec. 36})$$

Por otro lado la vulnerabilidad de desabastecimiento por aporte de sedimentos es evaluada para diferentes grados de pendiente y cantidades de partículas de arena, limo y arcilla distintas como:

$$S_{<50\%} \cap A_{<20\%} = Vl_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 37}) \quad S_{<50\%} \cap L_{<25\%} = Vl_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 38})$$

$$S_{<50\%} \cap A_{20-40\%} = Vl_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 39}) \quad S_{<50\%} \cap L_{25-30\%} = Vl_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 40})$$

$$S_{<50\%} \cap A_{>40\%} = Vl_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 41}) \quad S_{<50\%} \cap L_{>30\%} = Vl_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$50\% < S < 75\% \cap A < 20\% = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 43}) \quad 50\% < S < 75\% \cap L < 25\% = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 44})$$

$$50\% < S < 75\% \cap A_{20-40\%} = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 45}) \quad 50\% < S < 75\% \cap L_{25-30\%} = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 46})$$

$$50\% < S < 75\% \cap A > 40\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 47}) \quad 50\% < S < 75\% \cap L > 30\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 48})$$

$$S > 75\% \cap A < 20\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 49}) \quad S > 75\% \cap L < 25\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$S > 75\% \cap A_{20-40\%} = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 51}) \quad S > 75\% \cap L_{25-30\%} = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 52})$$

$$S > 75\% \cap A > 40\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 53}) \quad S > 75\% \cap L > 30\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$S < 50\% \cap Ar < 4\% = VI_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 55}) \quad 50\% < S < 75\% \cap Ar > 40\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 56})$$

$$S < 50\% \cap Ar_{4-10\%} = VI_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 57}) \quad S > 75\% \cap Ar > 10\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$S < 50\% \cap Ar > 10\% = VI_{\text{Bajo}} \quad (\text{Ec. 59}) \quad S > 75\% \cap Ar_{4-10\%} = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$50\% < S < 75\% \cap Ar < 4\% = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 61}) \quad S > 75\% \cap Ar > 10\% = VI_{\text{Alto}} \quad (\text{Ec. 62})$$

$$50\% < S < 75\% \cap Ar_{4-10\%} = VI_{\text{Medio}} \quad (\text{Ec. 63})$$

Donde Am = Amenaza, VI : Vulnerabilidad, R : Riesgo.

Capítulo III. Resultados y discusión

3.1 Detección de tendencias en series hidroclimatológicas

Se realizó revisión de las tendencias en series hidroclimatológicas evaluadas por Peña et al (2016) para la cuenca del Río Combeima, quienes señalaron mediante el uso del test Mann Kendall que las series de precipitación y temperatura de la cuenca no presentan tendencia.

3.2 Simulación y calibración del modelo hidrológico

Se realizó calibración de los caudales líquidos con el evento de 2008 empleando la cobertura vegetal del año 2007 haciendo una comparación entre el caudal líquido observado (Registros del IDEAM – Estación Montezuma) y el simulado como se muestra en la Figura 24. Lo anterior, considerando que el año 2008 corresponde a la información más cercana al año de calibración del modelo que corresponde a información levantada en campo.

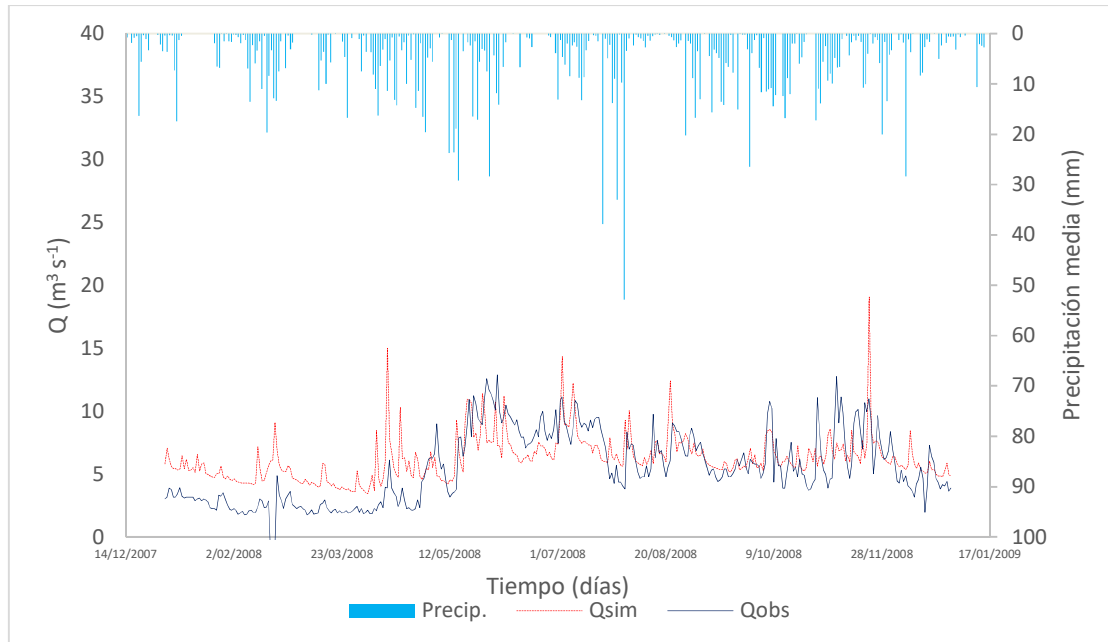


Figura 24. Calibración evento 2008.

Fuente: Autor.

Los valores obtenidos para los parámetros de calibración se presentan en la Tabla 23, con los cuales se obtuvo un valor del índice de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.52, valor que al encontrarse entre 0.0 y 1.0 es considerado por la literatura como una calibración aceptable (Moriassi et al., 2007).

El proceso de calibración de este modelo se enfocó en la descripción de eventos máximos y no en los caudales medios. Así mismo, se precisa que no fue posible obtener una mejor calibración del modelo probablemente porque las propiedades hidráulicas del suelo fueron obtenidas mediante funciones de pedotransferencia (Saxton & Rawls, 2006). Lo anterior, debido a que no se contaba con información de suelo a escala 1:25.000, de manera que se trabajó con valores modales que representen las características del suelo como el almacenamiento estático H_u a partir de métodos indirectos.

Tabla 23. Parámetros de Calibración evento de 2007.

Factores correctores modelo hidrológico:		Humedad Inicial:	
FC 1 Almacenamiento estático :	0.3000	H 1 Almacenamiento estático (%):	10.0000
FC 2 Evapotranspiración :	0.7000	H 2 Agua en superficie (mm) :	0.0000
FC 3 Infiltración :	0.3968	H 3 Almacenamiento gravitac (mm):	10.0000
FC 4 Escorrentía directa :	1.5000	H 4 Nivel del acuífero (mm) :	50.0000
FC 5 Percolación :	0.0009	H 5 Cauce a sección llena (%) :	0.0000
FC 6 Interflujo :	1.9512	H 6 Intercepción por la vegeta (%) :	0.0000
FC 7 Perdidas Subterráneas :	4.4282		
FC 8 Flujo subterráneo :	0.2538		
FC 9 Velocidad en los cauces :	1.0000		
Factor interpolación PPT (mm m ⁻¹)	0.0000		

Fuente: Autor.

Se realizó la validación del evento de 2003 en las zonas donde hubo mayor aproximación del caudal simulado con el observado y se trabajó con los parámetros obtenidos para el año de calibración de 2007 consiguiendo un índice de Nash-Sutcliffe de 0.22 para la modelación del año 2003. Es de precisar que tanto la calibración como validación están basadas en la descripción de eventos máximos, condición que el modelo logró representar en ambos casos (Figura 25).

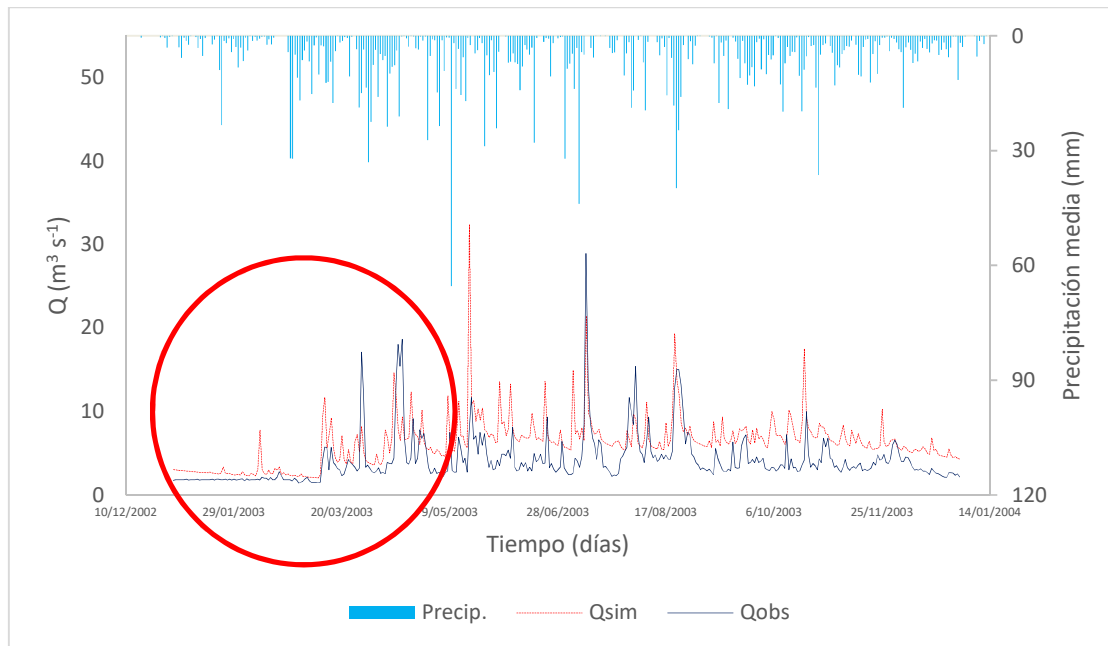


Figura 25. Validación evento 2003.

Fuente: Autor.

Finalmente, se simuló la hidrología de la cuenca con las series de precipitaciones y evapotranspiración correspondientes a los años 1971 al 2015 y se observó como resultado (Figura 26) que las coberturas con baja permeabilidad presentan los picos más altos, mientras que las coberturas boscosas que son más permeables y con una mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, presentan los caudales más bajos en el periodo simulado lo cual coincide con lo expuesto por Peña et al (2016).

Los caudales obtenidos mediante simulación para las coberturas vegetales de 2007, presentaron un comportamiento intermedio entre los caudales de pastos y cultivos. De manera que los caudales del escenario de pastos fueron un 27.79% mayores a los registrados en el escenario con coberturas de 2007 registrando un promedio de caudales máximos de $25.78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Así mismo, los cultivos son 0.45% menores al igual que los bosques los cuales fueron un 23.29% más bajos que los caudales de la simulación con las coberturas de 2007 presentando caudales de $20.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $15.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente, por lo que se encontró similitud en el resultado encontrado por Stehr et al. (2010) quienes

en su estudio observaron aumentos en el caudal al trabajar con usos de suelo agrícola mientras que disminuían al emplear cobertura de bosques.

En este caso, resulta evidente que las coberturas con almacenamiento estático Hu alto como los bosques, permiten un mayor almacenamiento de agua en el suelo (A. Alaoui, Caduff, Gerke, & Weingartner, 2011), lo cual contribuye a la atenuación de la magnitud de las crecidas (Hundecha & Bárdossy, 2004). De la misma manera, coberturas con alta impermeabilidad o baja capacidad de infiltración como los pastos, describen menor almacenamiento de agua en el suelo y en consecuencia, se facilita la generación de altos volúmenes de escorrentía directa, lo cual produce el incremento de las crecidas (Figura 26) y confirma lo reportado por Mao & Cherkauer (2009).

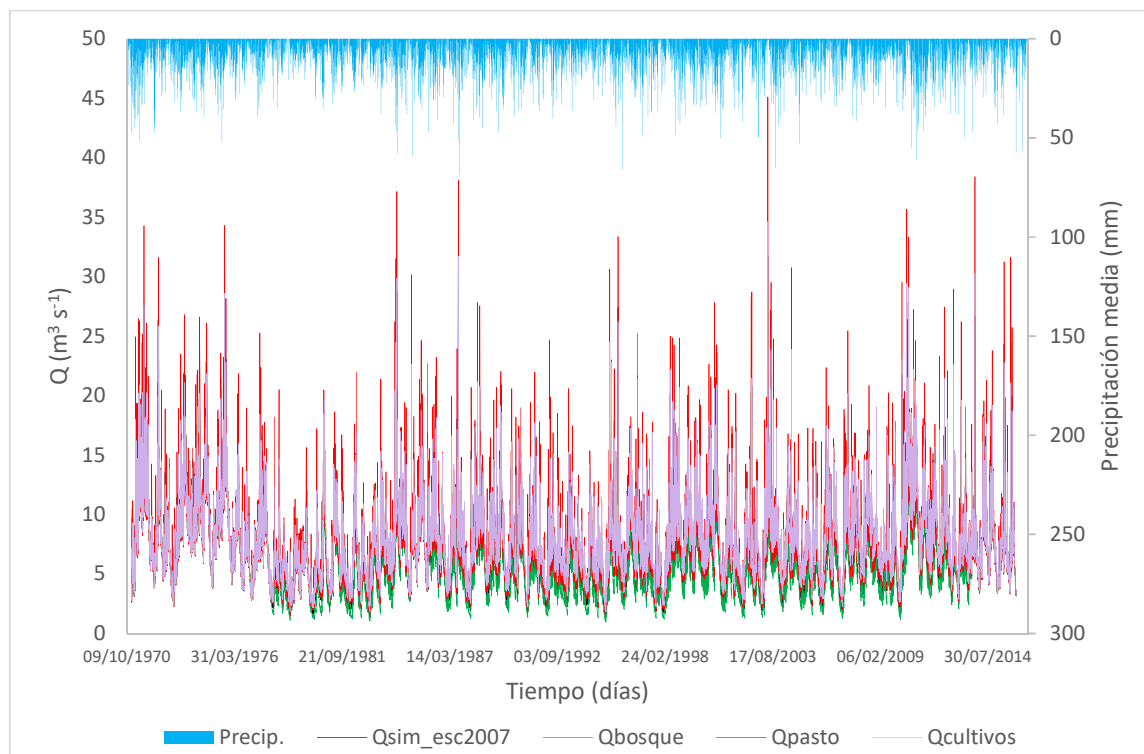


Figura 26. Caudales simulados para los escenarios de 2007, bosque, pasto y cultivo registro de 44años.

Fuente: Autor.

3.3 Calibración sub-modelo de sedimentos

El submodelo de sedimentos del TETIS se alimenta con los factores C, K y P de la USLE así como de la información de la cantidad de arena, limo y arcilla presentes en la cuenca del Río Combeima (Figura 27).

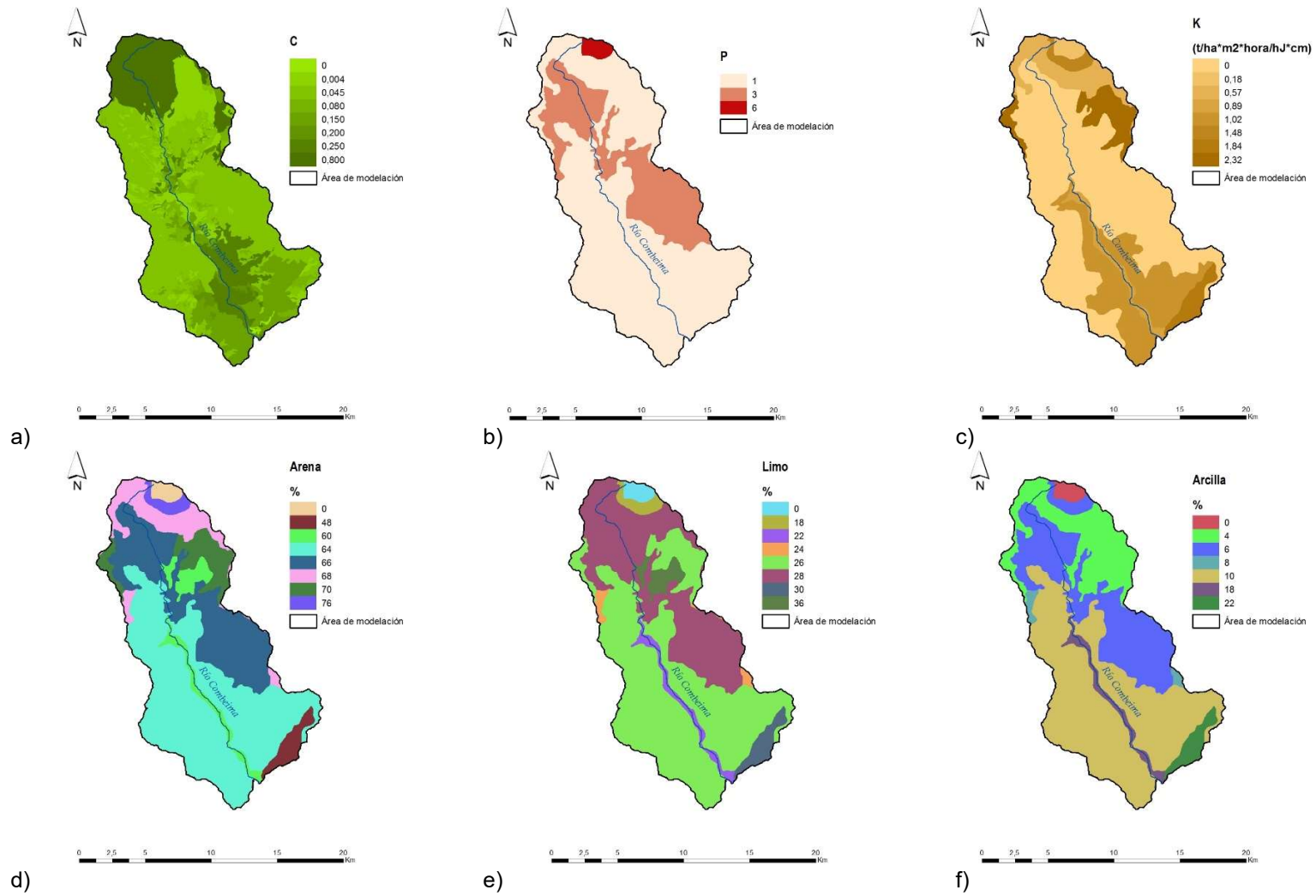


Figura 27. Mapas de C, P, K, arena, limo y arcilla en la cuenca del Río Combeima. a) C. b) P. c) K. d) Arena. e) Limo. f) Arcilla.

Fuente: Autor.

El proceso de calibración del sub modelo de sedimentos en TETIS (Figura 28) se realizó mediante análisis gráfico del caudal sólido observado teniendo en cuenta el aforo de sedimentos a escala mensual proporcionado por el IDEAM para el año de 2007 (periodo en que fue posible obtener registro continuo de información cercano a la condición de uso de suelo de 2007) y el caudal simulado en la cuenca para ese mismo periodo de tiempo.

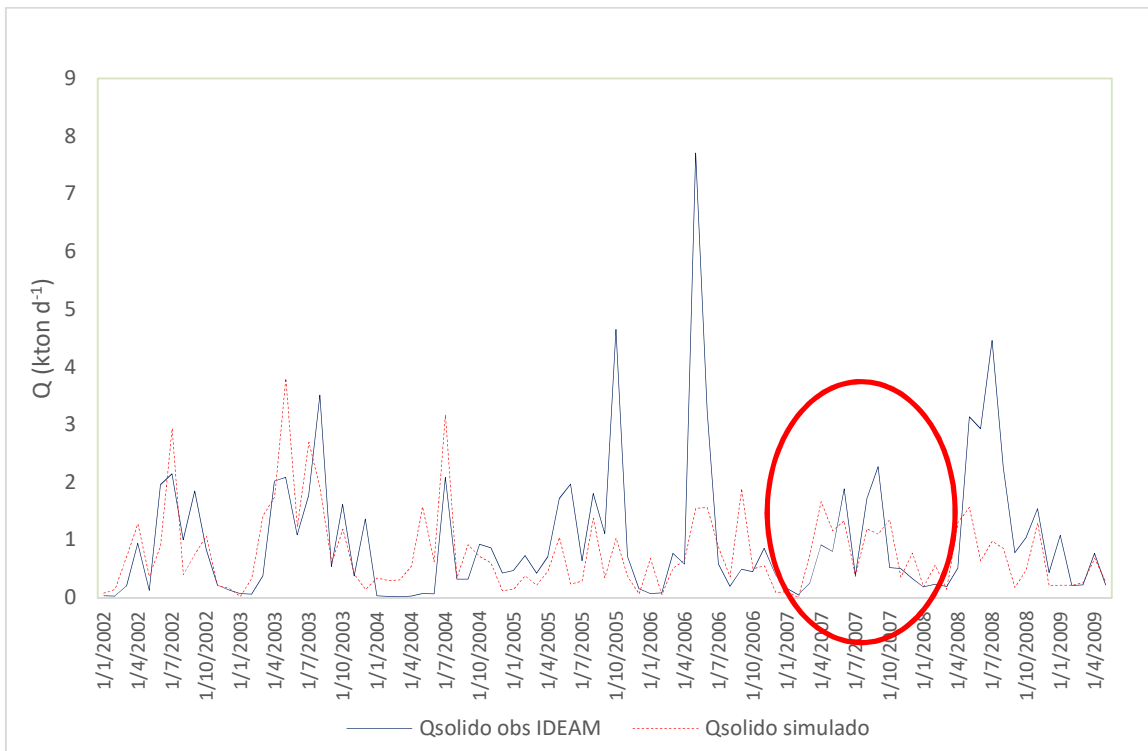


Figura 28. Calibración de caudal sólido.

Fuente: Autor.

Del proceso anterior se evidenció que el modelo hace una buena aproximación de los picos de caudal sólido por lo que se obtienen los parámetros de calibración del submodelo de sedimentos mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24. Parámetros de Calibración del submodelo de sedimentos para el evento de 2007.

Factores correctores submodelo de sedimentos:	
FCsed 1 Capacidad de transporte en ladera :	0.007
FCsed 2 Capacidad de transporte en cárcavas:	0.005
FCsed 3 Capacidad de transporte en cauces:	0.01

Fuente: Autor.

Se observó que la calibración del submodelo de sedimentos tuvo índice de Nash-Sutcliffe (NSE) de -0.41 (Figura 28) y una validación del periodo 2002 en la que se obtuvo un Nash de -0.22 (Figura 29), encontrando que el modelo busca representar el comportamiento del caudal sólido registrado por el IDEAM.

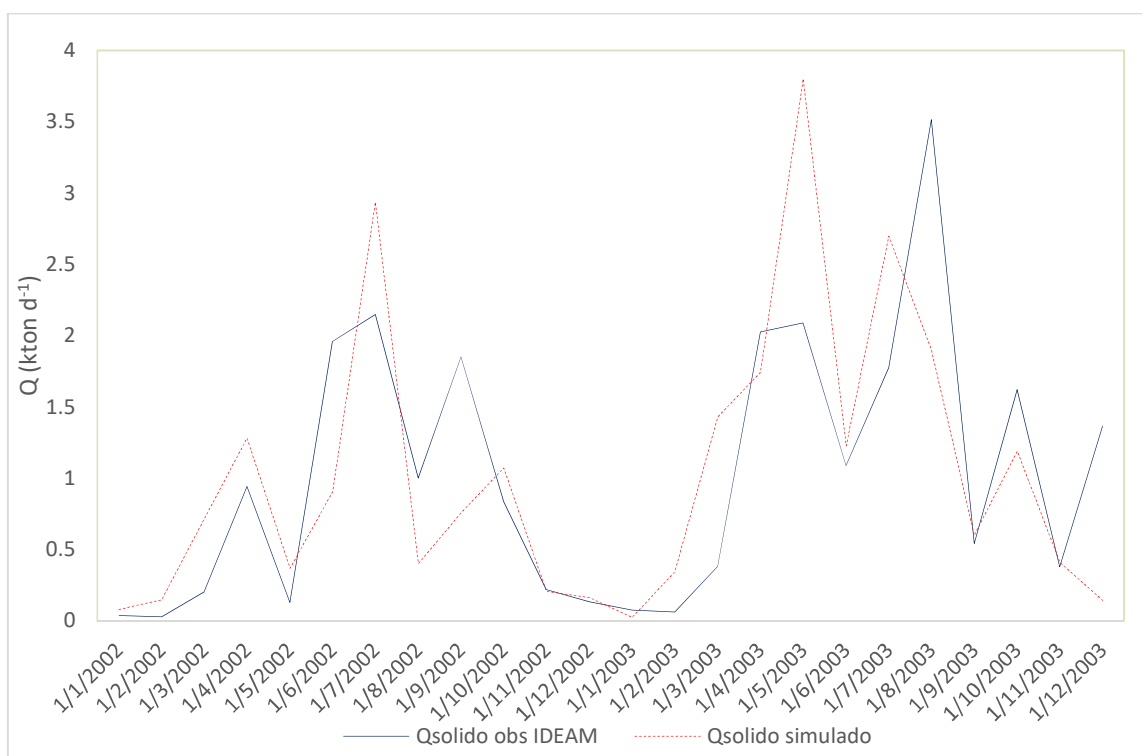


Figura 29. Validación de caudal sólido.

Fuente: Autor.

3.4 Evaluación de la producción de sedimentos en cambios de uso del suelo

Luego de realizar la simulación en el submodelo de sedimentos del TETIS para la evaluación de la producción de sedimentos en los escenarios 2007, pastos, cultivos y bosques se obtienen los resultados presentados en la Figura 30 donde puede observarse que el escenario en el que se tiene la mayor cantidad de sedimentos producidos corresponde a la cobertura de uso de suelo de pastos, seguida de la de 2007, cultivos y finalmente la de bosques en cuyo caso se encontró el menor volumen de sedimentos producidos en la cuenca.

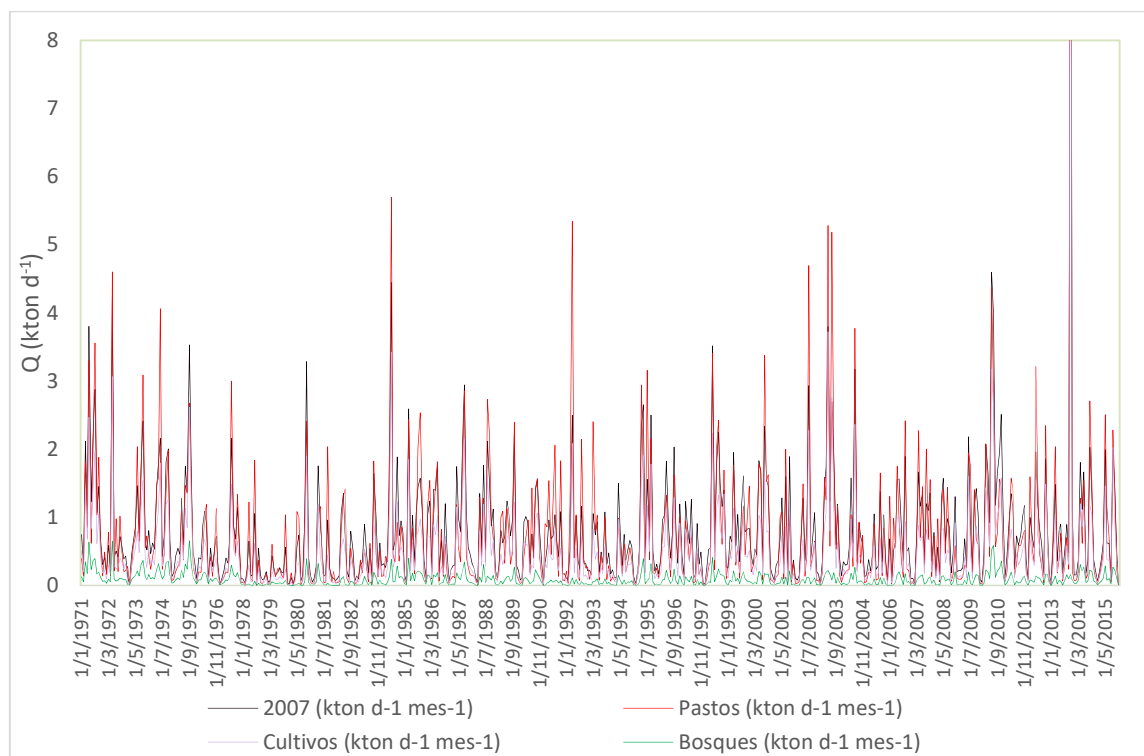


Figura 30. Estimación de sedimentos producidos en todos los escenarios de cambio de uso del suelo.

Fuente: Autor.

Se observó que la cantidad de sedimentos aportados cuando se simula la cobertura pastos es 69.14% mayor a la cobertura de 2007. De igual forma se observó que la cantidad de sedimentos producidos con la simulación del escenario de cultivos es 27.97% menor

respecto de la cobertura de 2007 al igual que los bosques que mostraron ser un 88.77% menores.

Lo anterior permite ver que la variación de los porcentajes de pérdida de suelo entre las coberturas de pastos, cultivos y bosques puede estar relacionada con la capacidad de infiltración y con los factores adoptados en cada cobertura para el cálculo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (Ec. 64), en donde el factor C es un factor sensible que se relaciona con la capacidad de la cobertura para proteger el suelo (Almorox et al., 1994).

De ahí que si se tienen suelos con alta capacidad de infiltración, se produce menor pérdida de suelo debido a que el mayor volumen de precipitación es almacenado en el suelo antes de producirse el escurrimiento superficial, el cual junto con el tipo de suelo y la pendiente generan la pérdida de material. Este efecto es mayor en coberturas como los pastos, los cuales presentan una menor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y por tanto una mayor generación de escorrentía directa, lo que concuerda con Pirastru et al (2013) quienes encontraron que el almacenamiento de agua H_u en la cobertura de bosques supera el de pastos en tensiones de agua de -50cm y quienes afirman también que los suelos con coberturas de pastos son más débiles que los bosques ante la erosión.

Igualmente a partir de la simulación hidrológica y de sedimentos, se trabajó con los caudales líquidos y caudales sólidos de 44 años de simulación, en los diferentes escenarios de cambios de uso del suelo, cuyos resultados permiten identificar que el caudal líquido más sólido de los pastos es superior al de todos los usos de suelo simulados, así mismo, se encontró que los cultivos registran valores cercanos a los de la cobertura de 2007 y la cobertura de bosques es la que proporciona los menores caudales líquidos más sólidos en general (Figura 31), lo cual coincide con el estudio realizado por M. Yang et al., (2012) en las subcuencas Heishui y Zhenjianguan donde se encontró que en ambos casos la tasa de erosión producida por pastizales fue mayor que la de cultivos y la más baja fue conseguida con coberturas de bosques.

De igual manera, los altos valores de caudal líquido más sólido presentados por la cobertura de cultivos puede deberse a que la estructura del suelo donde se realiza la siembra de los

cultivos se encuentra suelta por el proceso de labrado al que se somete el terreno, haciendo que aumente su porosidad, infiltración y capacidad de almacenamiento de agua (Lipiec et al., 2006) además de favorecer la pérdida de material por erosión hídrica en comparación con la de los suelos sin labrar (Bogunovic et al., 2018).

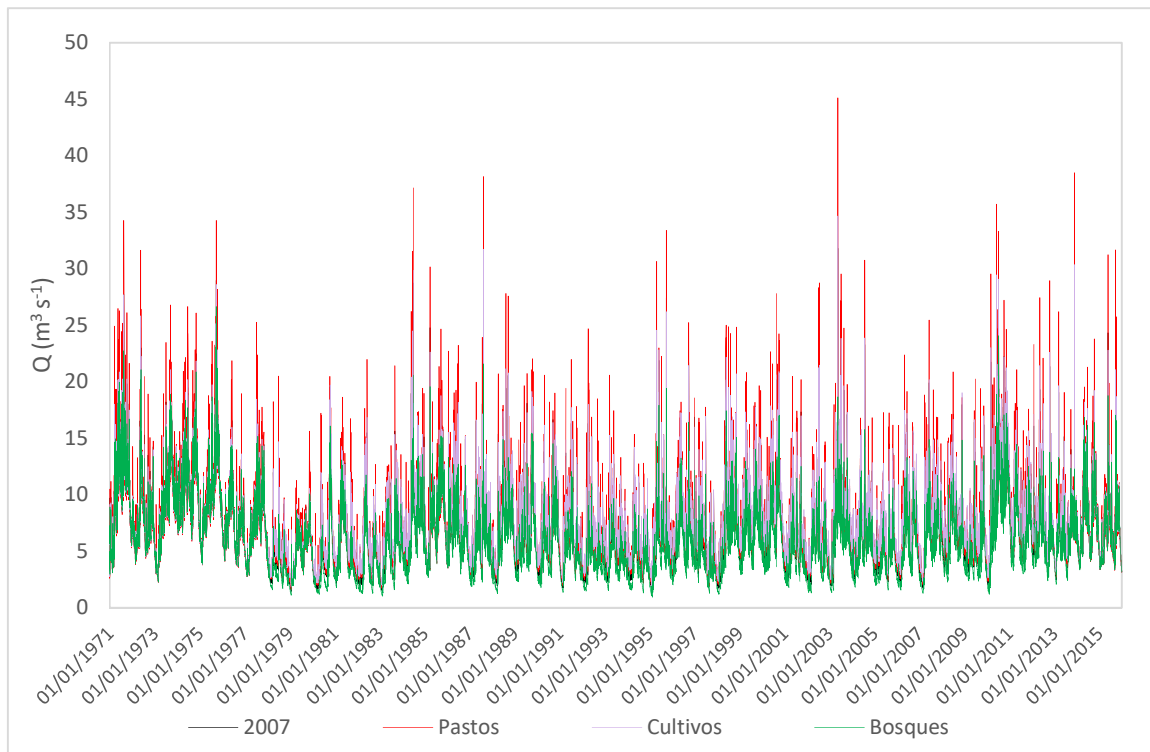


Figura 31. Caudales líquidos + sólidos en todos los escenarios de cambio de uso del suelo.

Fuente: Autor.

De lo anterior se observa que los cambios de uso del suelo produce variaciones en la producción de sedimentos donde se ha encontrado resultados similares en estudios como el de Wolman, (1967) quien identificó que los suelos con áreas de bosques en su etapa de precultivo producían $100 \text{ t m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ mientras que las zonas con cultivos producen entre 300 y $800 \text{ t m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, observando que la erosión es alta particularmente en áreas de agricultura intensiva (Bakker et al., 2008), de igual forma Kosmas et al., (1997) en García-Ruiz, (2010) encontraron tasas de erosión altas en suelos agrícolas en comparación con parcelas de cultivos abandonados.

Para la simulación hidráulica en el HEC RAS se introduce la información del levantamiento batimétrico realizado en el tramo juntas a la bocatoma de la ciudad de Ibagué obtenidos de los trabajos realizados por Benavides et al. (2018) y Lizcano & Muñoz (2018) tomando una totalidad de 149 secciones dentro de las cuales 14 son estructuras en el tramo de estudio, a estas se les asignó la nomenclatura enunciada en la Tabla 25 para facilidad de ubicación a la hora de realizar el análisis de la dinámica del río en interacción con las mismas.

Tabla 25. Nomenclatura de las estructuras.

Nombre de la sección	Descripción	Coordenadas X, Y	
E1	Muro de contención No 1 (Juntas)	861817.37	995426.50
E2	Muro de contención No 2 (Juntas)	861915.95	995305.76
E3	Puente vehicular No 1 (Villa Restrepo)	863138.23	992387.62
E4	E4 Bocatoma (Pico de Oro)	863804.42	991195.91
E5	Puente vehicular No 2 (Pico de Oro)	863798.60	991161.85
E6	Muro de contención gaviones recubierto en concreto (Pico de Oro)	863619.16	991111.18
E7	Puente peatonal No 1 (Pico de Oro)	864028.72	990675.04
E8	Puente peatonal No 2 (Pico de Oro)	864574.67	990192.06
E9	Puente peatonal No 3 (Pico de Oro)	864865.02	989799.54
E10	Muro de contención en gaviones y bocatoma sede IBAL	865894.82	987685.32
E11	Puente vehicular No 4 (Montezuma)	865702.08	987519.17
E12	Muro de contención en gaviones (Montezuma)	866004.60	987365.50
E13	Puente peatonal No 3 (Tres esquinas)	865790.73	987065.95
E14	Puente vehicular No 5 (B. Libertador)	869284.26	984128.90

Fuente: Autor.

Así mismo, se establecen como puntos de mayor interés las secciones en las que se encuentra localizada la estructura de captación además de otras obras hidráulicas y de contención al margen del río como se muestra en la Figura 32.

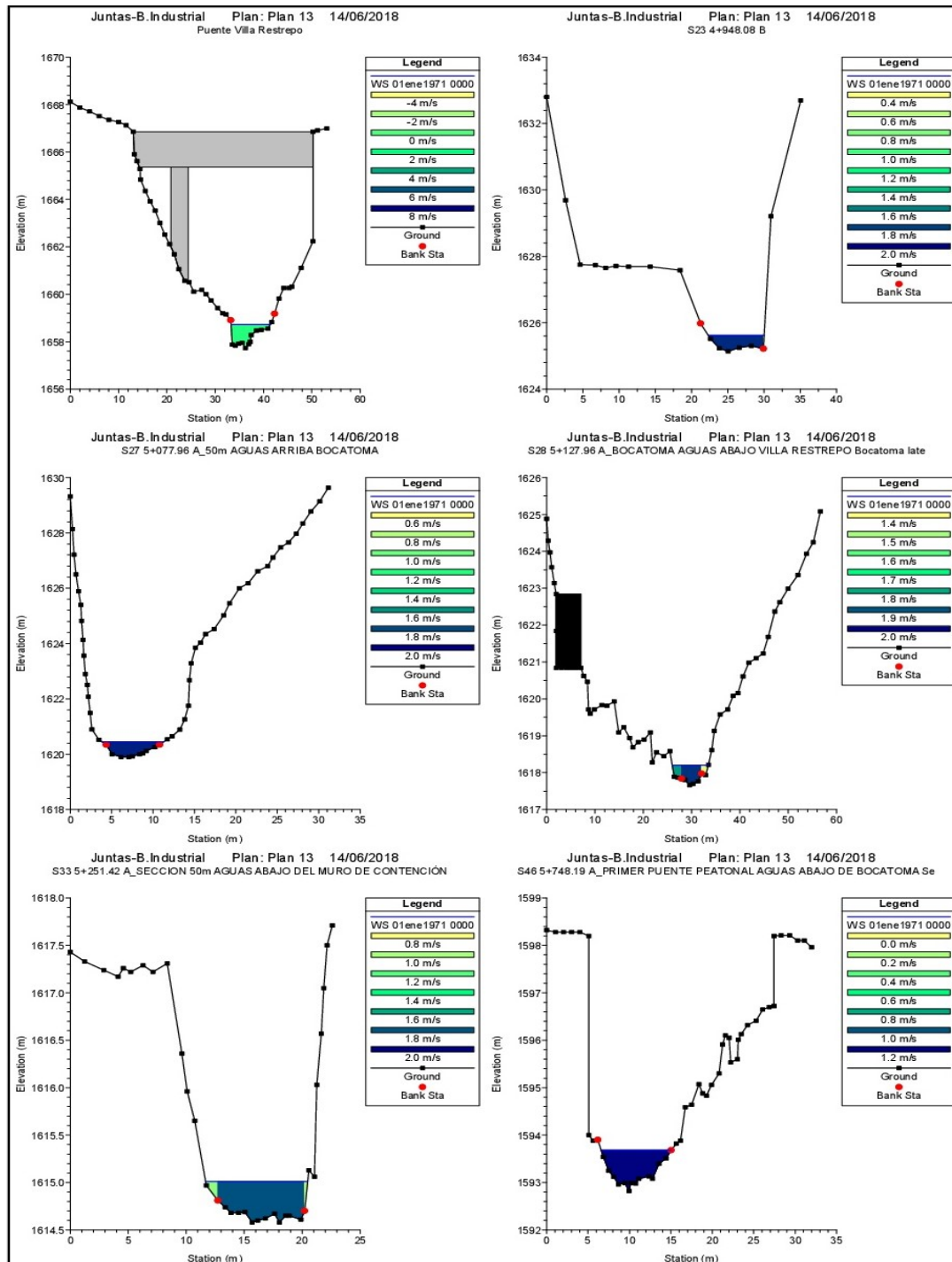


Figura 32. Presentación de algunas secciones transversales modeladas en el sector de estudio.

Fuente: Autor.

Los coeficientes de rugosidad empleados en el modelo varían desde 0.03 hasta 0.06 y fueron definidos mediante identificación visual de la cobertura vegetal en los márgenes izquierda, centro y derecha del canal del Río Combeima en el tramo de estudio, según recomienda el MDAS, (2018b).

Por otra parte, con el fin de caracterizar el del lecho del río se introduce en el modelo cuasi estático del HEC RAS la información correspondiente a trece granulometrías realizadas a material de fondo por parte del IDEAM en la estación Montezuma y Juntas y se hace reclasificación de las partículas de acuerdo a los tamaños de granos definidos por defecto por el HEC RAS mostrados en la Tabla 26 y Tabla 27.

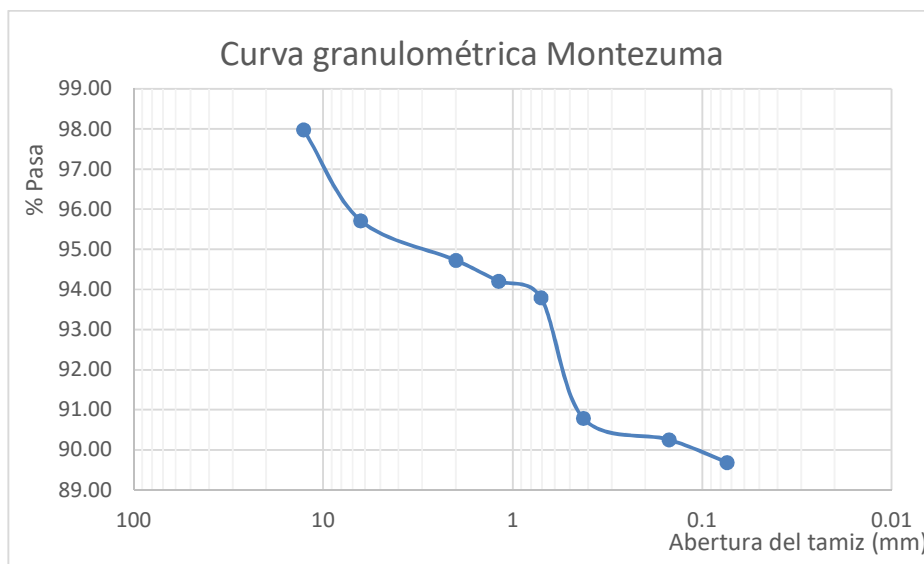
Tabla 26. Tamaño de granos definidos en HEC RAS para modelo cuasi estático.

Clase de grano	Nomenclatura	Diámetro medio (mm)
Arcilla	Clay	0.003
Limo muy fino	VFM	0.006
Limo fino	FM	0.011
Limo medio	MM	0.023
Limo grueso	CM	0.045
Arena muy fina	VFS	0.088
Arena fina	FS	0.177
Arena media	MS	0.354
Arena gruesa	CS	0.707
Arena muy gruesa	VCS	1.41
Grava muy fina	VFG	2.83
Grava fina	FG	5.66
Grava media	MG	11.3
Grava gruesa	CG	22.6
Grava muy gruesa	VCG	45.3

Fuente: (Adaptado de Brunner, 2016).

Tabla 27. Presentación de algunas granulometrías empleadas en la caracterización del lecho del río.

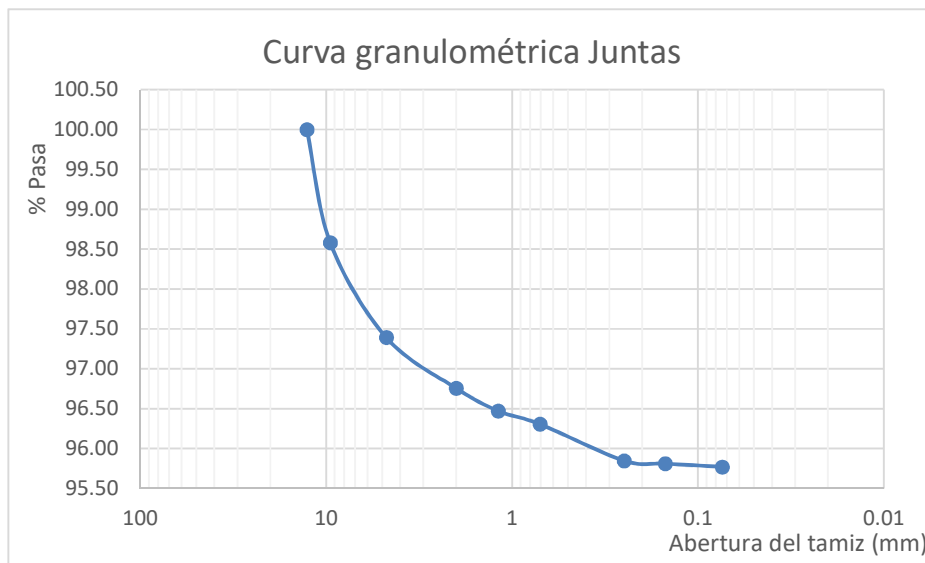
1		Montezuma			
Diámetro (mm)	Clase grano (HEC RAS)	Antes lavado	Después lavado	Finos lavados	
		Cant (g)	%Reten	%Reten acum	%Pasa
		959	98.85	860.15	
12.7	MG	19.3	2.01	2.01	97.99
6.35	FG	21.76	2.27	4.28	95.72
2	VFG	9.47	0.99	5.27	94.73
1.19	VCS	4.98	0.52	5.79	94.21
0.71	CS	3.98	0.42	6.20	93.80
0.425	MS	28.79	3.00	9.21	90.79
0.15	FS	5.16	0.54	9.74	90.26
0.074	VFS	5.41	0.56	10.31	89.69
0.002	Clay	860.15	89.69	100.00	0.00
%Grava: 0		%Arena: 10.31	%P200: 89.69		



Fuente: Autor.

11 Juntas

		Antes lavado	Después lavado	Finos lavados	
		2356	99.66	2256.34	
Diámetro (mm)	Clase grano (HEC RAS)	Cant (g)	%Reten	%Reten acum	%Pasa
12.7	MG	0.00	0.00	0.00	100.00
9.51	MG	33.42	1.42	1.42	98.58
4.76	FG	27.99	1.19	2.61	97.39
2	VFG	15.02	0.64	3.24	96.76
1.19	VCS	6.70	0.28	3.53	96.47
0.71	CS	3.89	0.17	3.69	96.31
0.25	MS	10.83	0.46	4.15	95.85
0.15	FS	0.86	0.04	4.19	95.81
0.074	VFS	0.95	0.04	4.23	95.77
0.002	Clay	2256.34	95.77	100.00	0.00
%Grava: 0		%Arena: 4.23	%P200: 95.77		



Fuente: Autor.

3.5 Frecuencia caudales máximos

A continuación se presentan los valores estadísticos junto con los caudales máximos para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años trabajando con las funciones Gumbel, GEV y LogNormal2, información contenida en la Tabla 28. En este caso se evaluó el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad mediante el criterio de la Máxima Verosimilitud, lo cual permitió identificar que el mejor ajuste se logra con la función GEV para el caso de los caudales máximo en la cuenca del Río Combeima.

Tabla 28. Análisis de Frecuencia Caudales líquidos máximos con punto de cierre en Montezuma

Esc.	Estadísticos	Función	Parámetros	Periodo de retorno (años)						
				5	10	25	50	100	500	
Observados	Media	Gumbel	$\alpha =$	0.10						
			$\beta =$	7.58	35.53	43.09	52.64	59.73	66.77	83.03
			ML =	-138.00						
	Varianza	226.21								
	Desv. Estand.	GEV	$\beta =$	-0.44						
			$\alpha =$	7.88						
			$x_0 =$	18.33	35.06	48.59	73.48	99.94	135.66	275.16
			ML =	-135.82						
	Coef. Asimetría	1.45								
	Coef. Variación	LogNormal2	$\beta =$	3.15						
$\alpha =$			0.51	35.96	44.96	57.06	66.56	76.45	101.18	
ML =			-136.37							
Kurtosis	4.75									
2007	Media	Gumbel	$\alpha =$	0.25						
			$\beta =$	87.20	23.86	26.86	30.65	33.47	36.26	42.71
			ML =	-134.27						
	Varianza	26.19								
	Desv. Estand.	GEV	$\beta =$	0.03						
			$\alpha =$	4.11						
			$x_0 =$	17.92	23.96	26.89	30.51	33.13	35.68	41.39
			ML =	-134.23						
	Coef. Asimetría	0.63								
	Coef. Variación	LogNormal2	$\beta =$	2.98						
$\alpha =$			0.24	24.11	26.84	30.11	32.42	34.66	39.67	
ML =			-134.45							
Kurtosis	2.36									
Pastos	Media	Gumbel	$\alpha =$	0.19						
			$\beta =$	76.54	30.59	34.52	39.49	43.18	46.84	55.29
			ML =	-145.56						
	Varianza	45.26								
Desv. Estand.	GEV	$\beta =$	-0.02							
		$\alpha =$	5.14							

			$x_0 =$	22.67	30.53	34.56	39.77	43.71	47.68	57.13	
	Coef. Asimetría	0.83	ML =	-145.54							
			$\beta =$	3.22							
	Coef. Variación	0.26	LogNormal2	$\alpha =$	0.25	30.79	34.34	38.58	41.60	44.51	51.04
	Kurtosis	2.97	ML =	-145.97							
			$\alpha =$	0.24							
	Media	20.57	Gumbel	$\beta =$	78.61	24.39	27.51	31.46	34.38	37.29	44.00
	Varianza	28.33	ML =	-135.69							
			$\beta =$	0.04							
	Desv. Estand.	5.32	GEV	$\alpha =$	4.28						
	Coef. Asimetría	0.79	ML =	-135.62	18.24	24.48	27.47	31.12	33.75	36.28	41.89
			$\beta =$	2.99							
	Coef. Variación	0.26	LogNormal2	$\alpha =$	0.25	24.58	27.41	30.80	33.21	35.53	40.75
	Kurtosis	2.92	ML =	-135.83							
			$\alpha =$	0.29							
	Media	15.45	Gumbel	$\beta =$	52.66	18.63	21.19	24.42	26.82	29.20	34.71
	Varianza	17.30	ML =	-125.75							
			$\beta =$	0.08							
	Desv. Estand.	4.16	GEV	$\alpha =$	3.49						
	Coef. Asimetría	0.62	ML =	-125.57	13.66	18.61	20.88	23.56	25.42	27.17	30.87
			$\beta =$	2.70							
	Coef. Variación	0.27	LogNormal2	$\alpha =$	0.26	18.64	20.93	23.70	25.67	27.59	31.92
	Kurtosis	2.77	ML =	-125.58							

Fuente: Autor.

A partir del análisis de frecuencia, se encontró que la Máxima Verosimilitud se asocia con la función General Extreme Values, de manera que se adoptaron los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno según la aplicación de dicha función. De acuerdo a lo anterior se presentan los resultados obtenidos mediante la implementación de la función GEV para los diferentes escenarios de uso de suelo ubicando el punto de cierre de la simulación en Montezuma como se muestra en la Figura 33. De allí se observó que la cobertura que presenta mayores caudales líquidos en el análisis de frecuencia es la del escenario de pastos, seguida de los cultivos quienes tienen un comportamiento parecido al de la cobertura de 2007 y finalmente quien presenta los menores caudales es la cobertura de bosques.

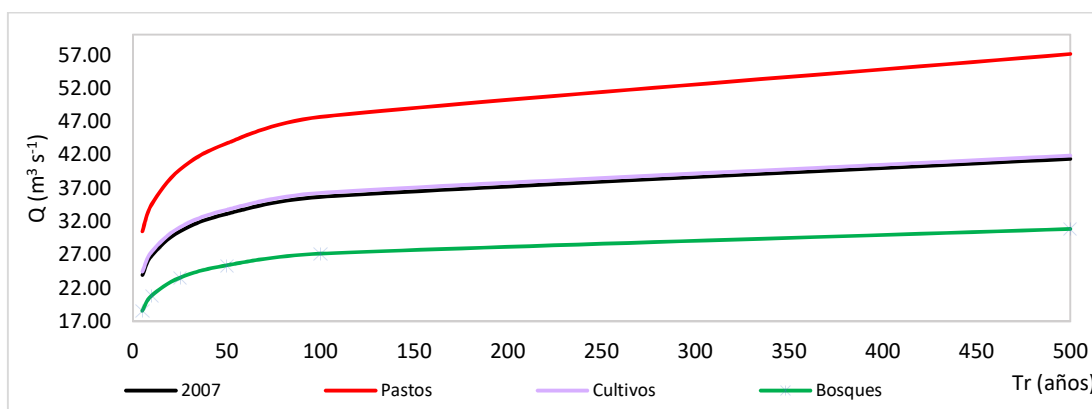


Figura 33. Representación de la función GEV para todos los escenarios de uso con punto de cierre en Montezuma

Fuente: Autor.

Luego de la modelación hidráulica en el HEC RAS se identifica la variación en las profundidades, velocidades, coeficientes de Manning y esfuerzos cortantes con lo que fue posible realizar del tránsito de caudales en escenarios de cambio de uso del suelo en el sector de la bocatoma de Ibagué (Figura 36, Figura 37 y Figura 38), los resultados del tramo aguas arriba de la estructura de captación se encuentran en los anexos.

En la Figura 34 se observó que entre las secciones S62 y S51 tanto para el escenario de la condición de 2007, pastos y bosques el centro del canal del río presenta coeficientes de Manning bajos entre 0.030 y 0.0417 probablemente relacionados con la presencia de material fino, respecto al escenario de cultivos se determinó coeficientes entre 0.0417 y 0.0476 encontrando una mayor rugosidad en comparación con los tres escenarios anteriores.

Así mismo se observó que los márgenes derecho e izquierdo del Río Combeima (secciones entre S62 y S42) presentan valores de n entre 0.0476 y 0.0534 con lo que pudo inferirse que corresponde a sectores donde se depositan rocas de gran tamaño.

Se tienen n de Manning bajos para caudales altos en las crecidas, lo que puede corroborarse con la ecuación general de Manning la cual depende del área de la sección transversal, el radio hidráulico, la energía de la pendiente y el caudal, los tres primeros factores permanecen constantes durante la modelación sin embargo el caudal varía de acuerdo los valores obtenidos para cada uso del suelo. De igual forma se conoce que si se presentan aumentos en el valor del n de Manning disminuye la velocidad y aumenta la lámina de agua. (Las demás secciones relacionadas con los mapas de Manning se presentan en el Anexo A).

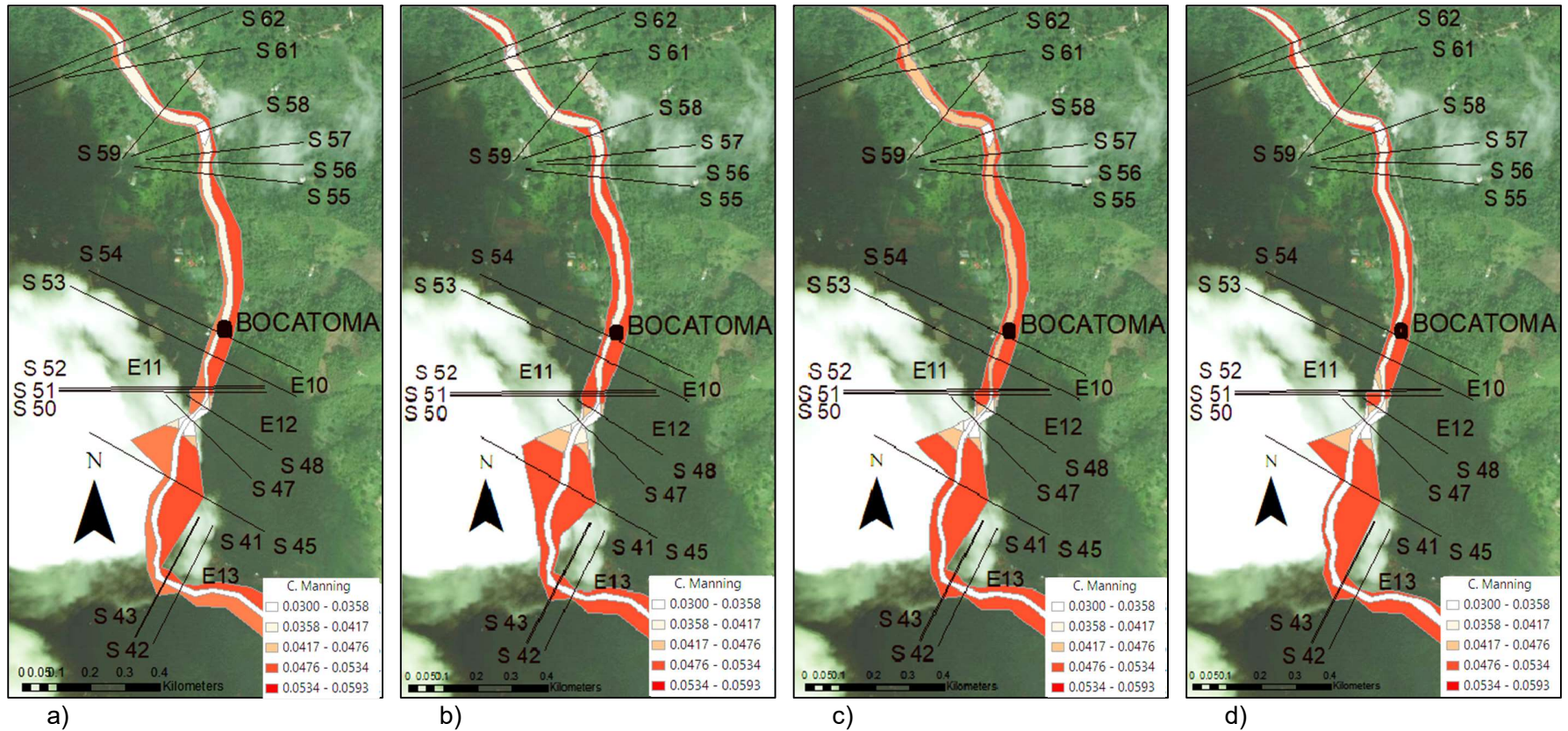


Figura 34. Mapa de coeficientes de rugosidad en el cauce del tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante simulación hidráulica con HEC RAS se observó que hay una variación de la magnitud de la altura de lámina de agua de la cobertura de 2007 con respecto a los usos de suelo homogéneos de pastos, cultivos y bosques, encontrando que las mayores láminas de agua son alcanzadas con la cobertura de pastos y las menores con la de bosques. De la misma manera se evidenció que los valores más altos de tirante de agua en todos los escenarios fue encontrado en la sección S54 donde se registró 1.32 m en la cobertura de 2007, 1.5 m en el escenario de pastos, 1.33 m en el de cultivos y 1.16 m con el de bosques (Figura 36).

Lo anterior puede relacionarse con modificaciones en el ciclo hidrológico de la cuenca dados por el incremento de áreas con permeabilidad baja o impermeables (Shuster et al., 2005), lo cual disminuye el volumen de infiltración, además de aumentar la escorrentía superficial y los caudales máximos (Yang et al., 2018), por lo que las coberturas de menor capacidad de infiltración como las de pastos proporcionan una mayor retención de agua en superficie haciendo que el tirante de agua sea mayor en comparación con la de bosques.

En contraste con esto estudios como el desarrollado por de Moel & Aerts, (2011) encontraron que la cobertura de cultivos alcanza una profundidad de inundación de 2 m en comparación con la de pastos y bosques que son de 1.8 m y 1 m respectivamente para el mismo factor de daño (Figura 36).

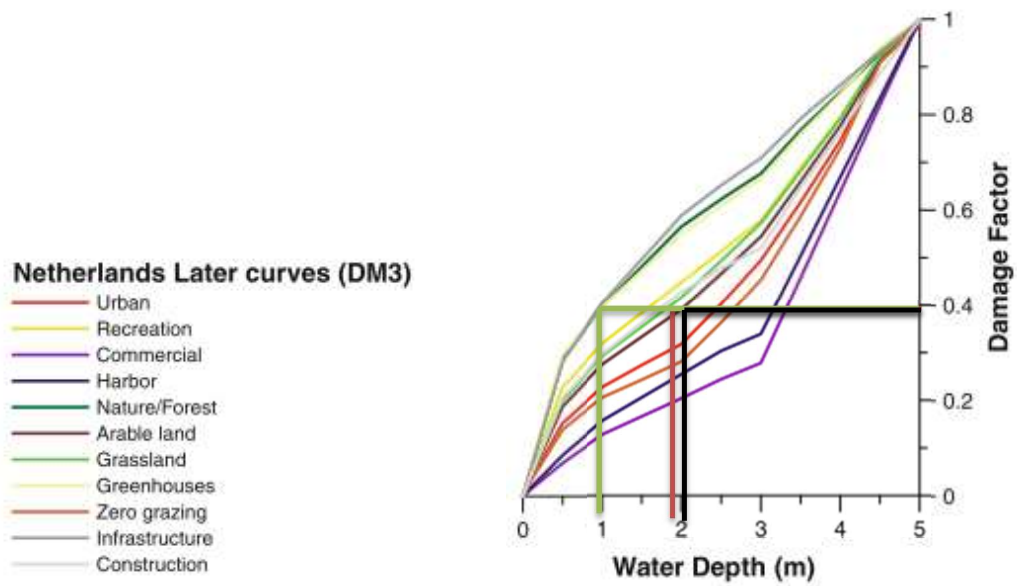


Figura 35. Curvas factor de daño y profundidad de agua “Netherlands Later” (Klijn et al. 2007)

Fuente: Tomado de (de Moel & Aerts, 2011).

(Las demás secciones relacionadas con los mapas de profundidad se presentan en el Anexo B).

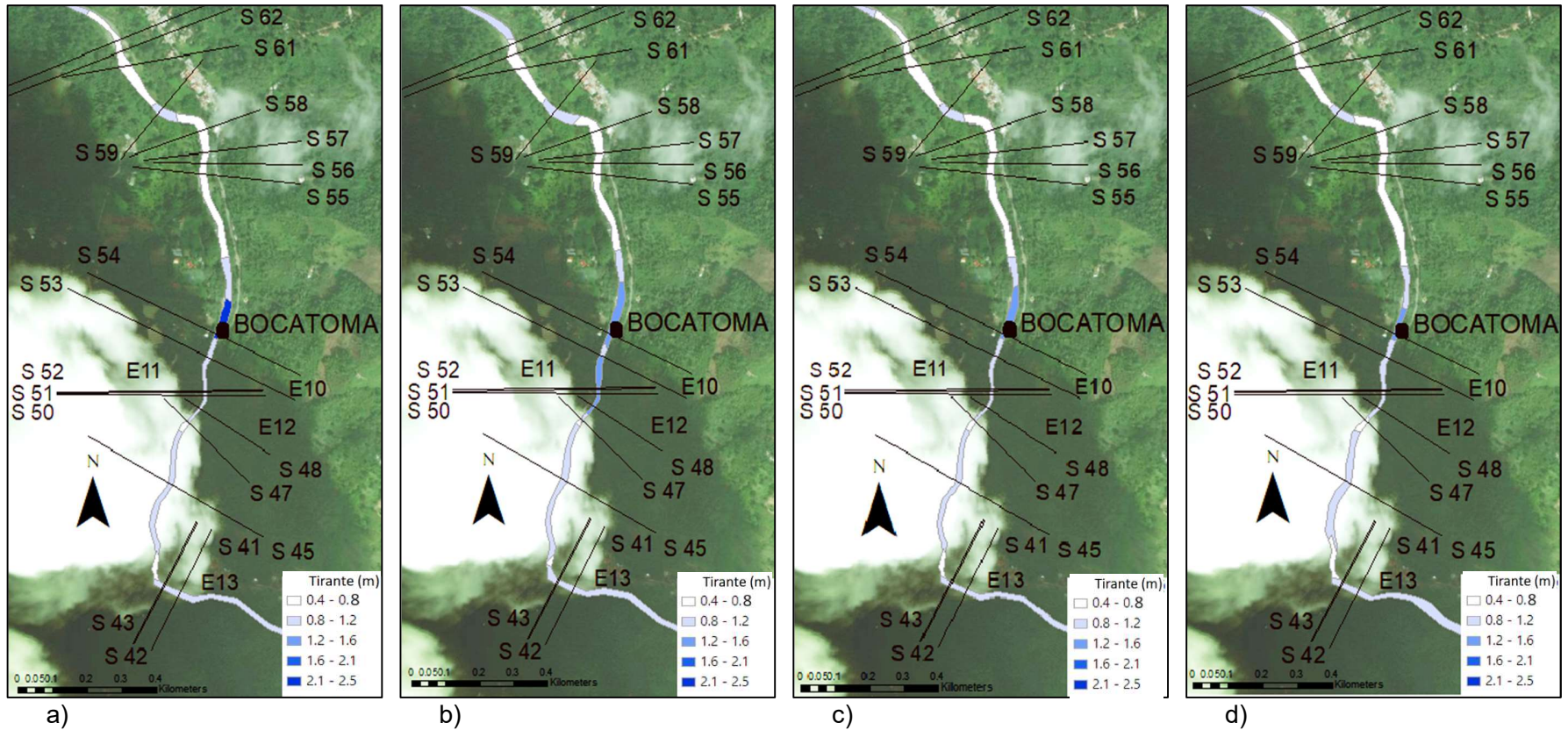


Figura 36. Altura de la lámina de agua en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

En la Figura 37 se encontró cambios en la velocidad en todos los escenarios entre las secciones S62 y S58 posiblemente ocasionados por la cercanía a estructuras como muros de contención, puentes peatonales, además de la estructura de captación, de igual forma se identificó mayores velocidades en el tramo aguas abajo desde la sección S47 a S41 para todos los escenarios de uso de suelo lo cual puede estar influenciado con los cambios de pendiente que se presentan en la cuenca.

Así mismo, se observó que las velocidades conseguidas en la cobertura de pastos en la sección S54 donde se localiza la bocatoma es un 14% mayor a la cobertura de 2007 (2.29 m s^{-1}) donde en el escenario de pastos mostró una velocidad de 2.6 m s^{-1} , por otra parte las velocidades en los escenarios de cultivos y bosques son menores respecto de la de 2007 en 0.43% con un valor de 2.3 m s^{-1} y en 11.80% con velocidad de 2.02 m s^{-1} respectivamente.

Teniendo en cuenta que el registro de velocidades altas y láminas de agua altas, como es el caso de la cobertura de pastos supone una mayor exposición al riesgo (Vélez et al., 2003) en contraste con los demás escenarios de uso del suelo.

Las demás secciones del mapa de velocidad se presentan en el Anexo C.

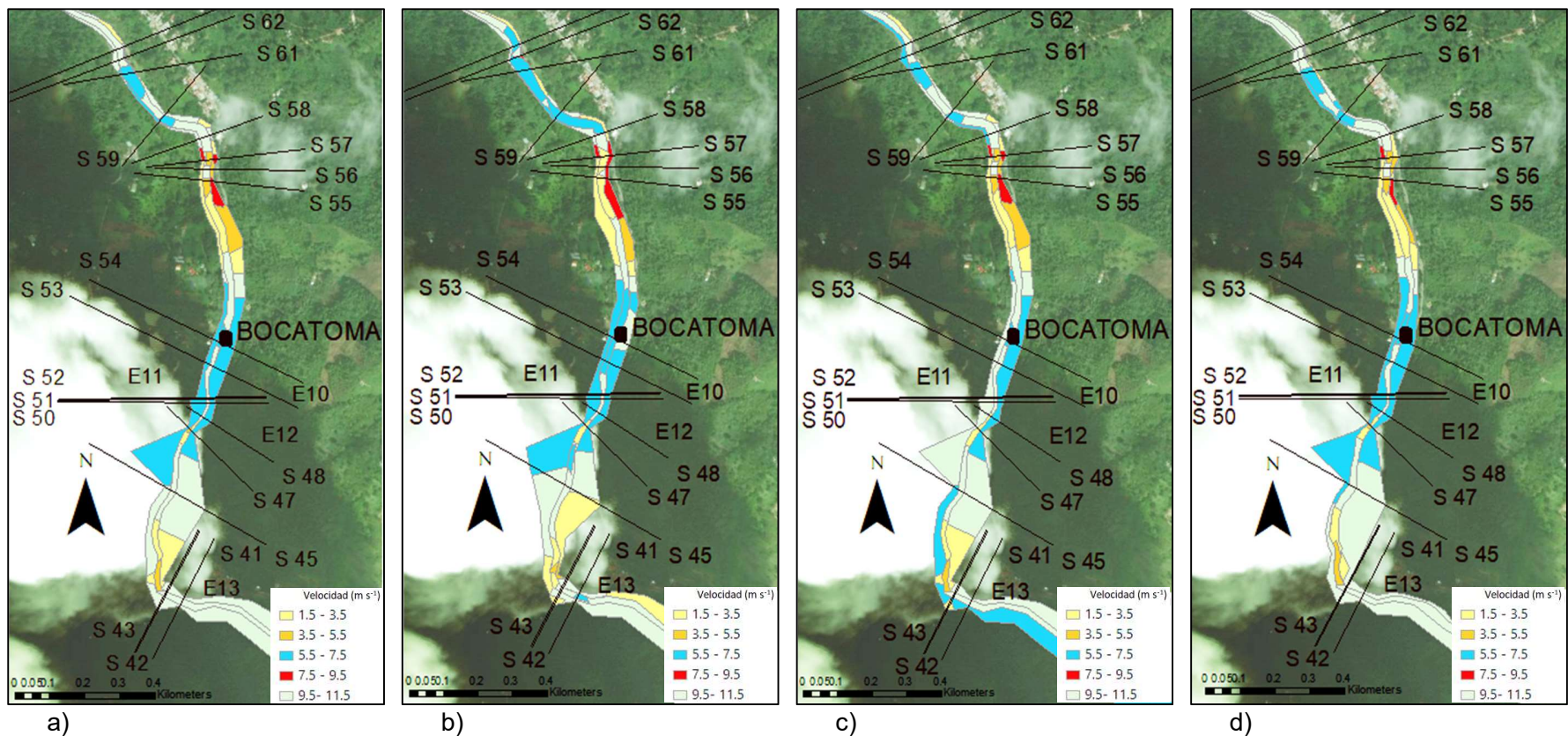


Figura 37. Velocidades en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

En la Figura 38 se observó aguas arriba de la bocatoma entre las secciones S58 y S54 registró altos valores de esfuerzo cortante en el margen izquierdo en el sentido aguas abajo donde ocurren procesos de socavación y así mismo su deposición en el margen derecho donde los esfuerzos pese a tener magnitudes altas son inferiores a las de la margen izquierda. Entre la sección S45 y S43 se presentó mayores valores de esfuerzos cortantes en el margen izquierdo aguas abajo de la bocatoma para el escenario de pastos en comparación con los demás usos de suelo, se observó también que para esa misma sección los esfuerzos son mayores en el escenario de 2007 seguido del escenario de cultivos y finalmente el de bosques.

De igual forma, se observó que los esfuerzos cortantes determinados en la cobertura de pastos en la sección S54 donde se ubica la bocatoma es un 2% menor a la cobertura de 2007 con un esfuerzo de $1234.79 \text{ kN m}^{-2}$, así como en el caso del escenario de cultivos quien muestra ser un 0.03% menor que el de la cobertura 2007 con un valor de $1252.83 \text{ kN m}^{-2}$ y finalmente la de bosques 3.09% con esfuerzos de $1291.98 \text{ kN m}^{-2}$.

Lo anterior permite inferir que la cobertura de pastos al generar mayor escorrentía directa produce incrementos en el caudal, mayor pérdidas de suelo lo cual se relaciona con el incremento en los esfuerzos cortantes y la velocidad del flujo, que aunado a la lámina del agua altas incrementan el riesgo (J. Vélez et al., 2003)

Las demás secciones relacionadas con los mapas de esfuerzos cortantes se presentan en el Anexo D.

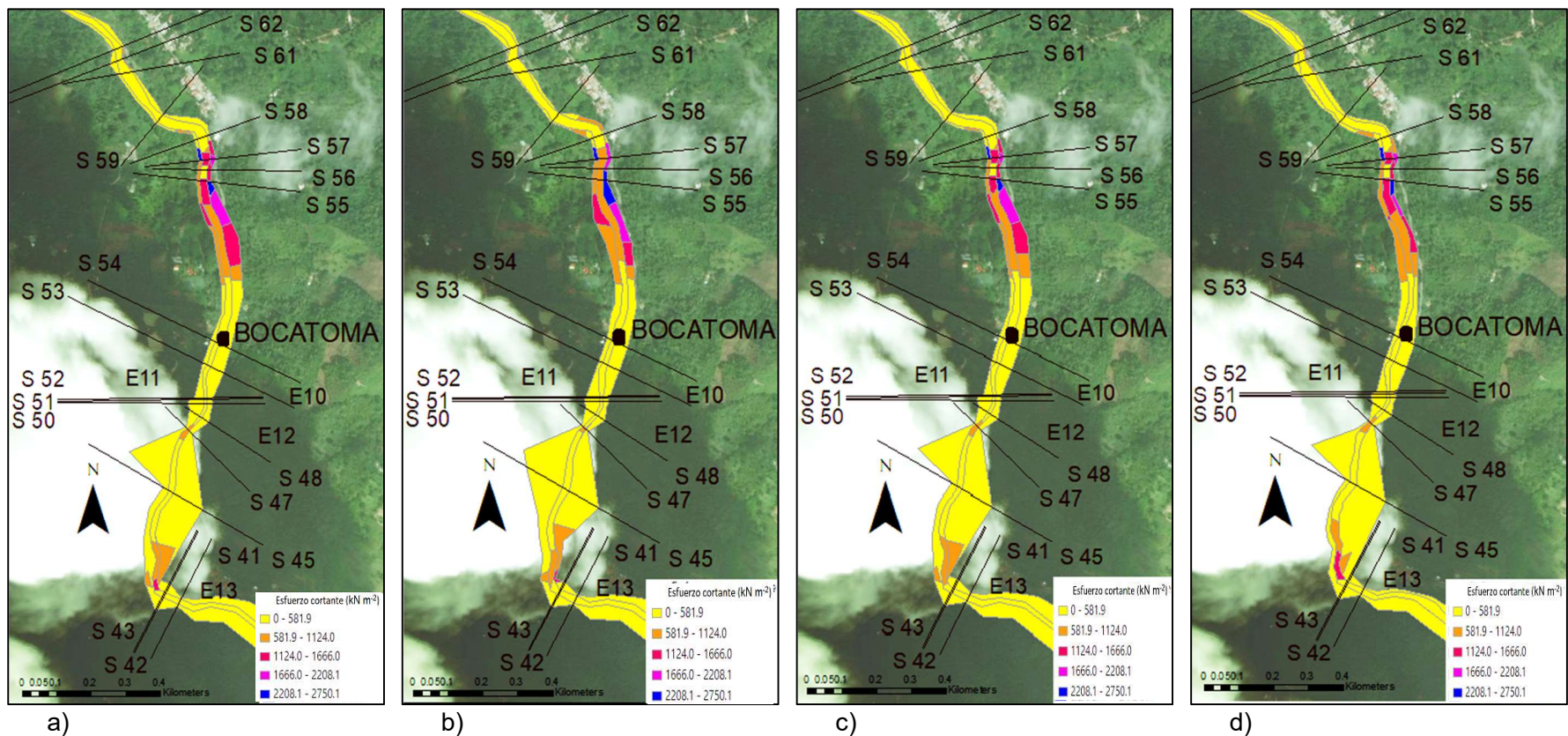


Figura 38. Esfuerzos cortantes en el tramo analizado en diferentes escenarios de cambios de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

3.6 Evaluación del riesgo por crecidas e inundaciones

3.6.1 Estimación de la amenaza por crecidas e inundaciones

En la Figura 39 se observó que el tirante de agua más alto se consiguió en la cobertura de pastos seguido del encontrado en el uso de suelo de cultivos los cuales mostraron un comportamiento parecido al escenario de 2007; finalmente se observó que el tirante más bajo se consiguió con la cobertura de bosques.

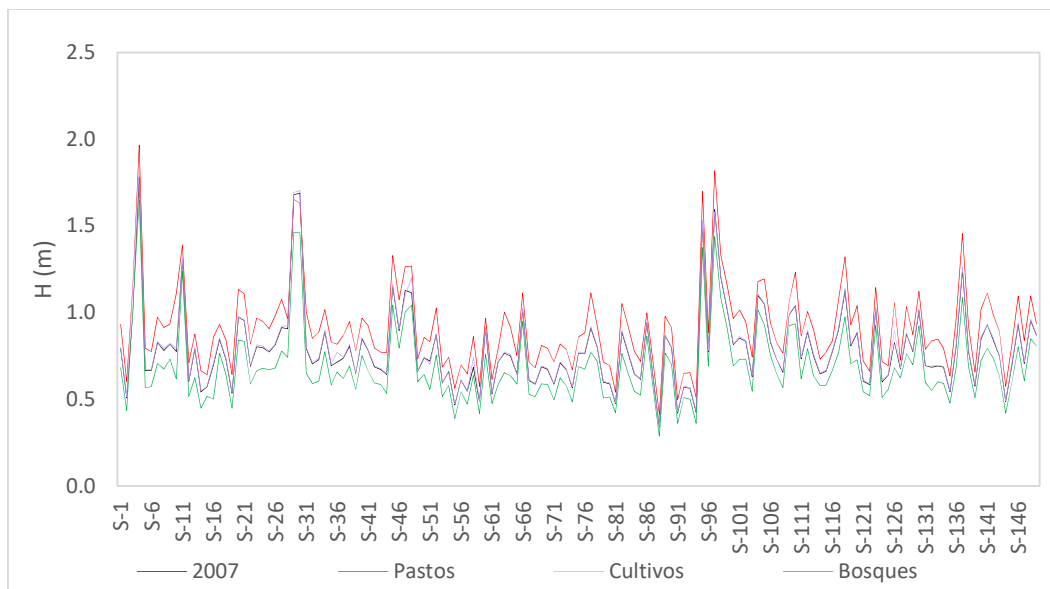


Figura 39. Profundidad efectiva en los escenarios de uso de suelo para TR 100 años. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

Se encontró en la Figura 40 que la máxima concentración de sedimentos se da en la cobertura de uso de suelo de 2007 seguido del encontrado en cultivos, pastos y finalmente bosques.

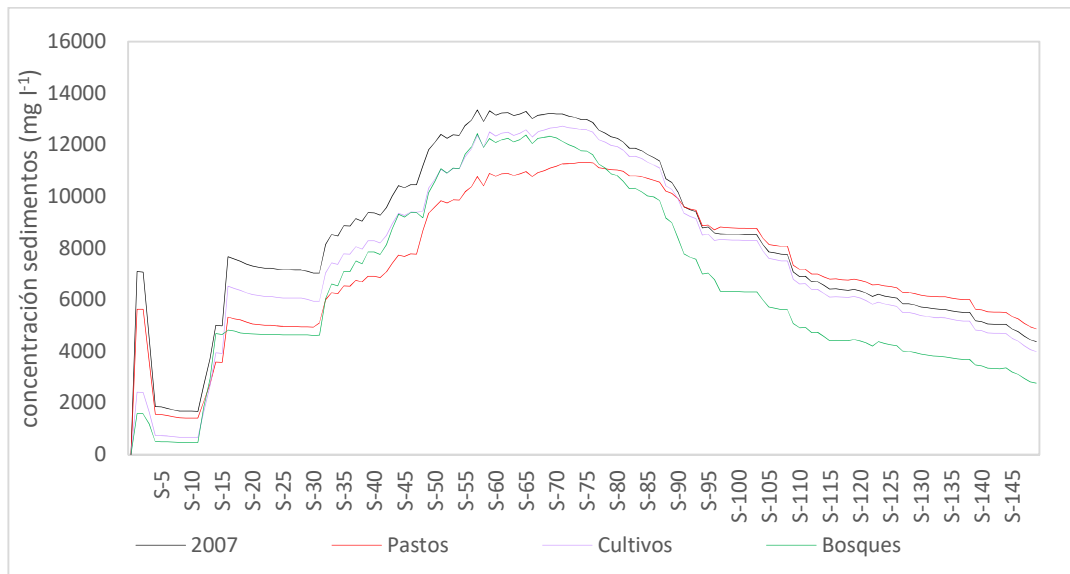


Figura 40. Concentración de sedimentos en los escenarios de uso de suelo para TR 100 años. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

En la Figura 41 se observó que entre las secciones S62 y S61 se registró una zona de amenaza por crecida alta en el escenario de pastos, así mismo el escenario de cultivos presentó entre la sección S58 y S42 niveles de amenaza medio en el borde izquierdo en el sentido aguas abajo del río, mientras que en los escenarios de 2007 y de bosques se presentaron niveles de amenaza por crecida bajo en todo el tramo.

Se evidenció que entonces en el escenario de pastos crece el área de amenaza respecto de la de 2007 un 18% mostrando anchos de lámina de agua de 14 m, así mismo la cobertura de cultivos fue 0.8% mayor que la de 2007 con ancho de lámina de agua de 13 m y finalmente la de bosques mostró ser menor 15% que la de la condición de 2007 con anchos de lámina de agua de 12 m, por lo que se corroboró que el uso de cobertura de bosques disminuye los picos de caudal (Szwagrzyk et al., (2018); Guzha et al., (2018))

Las demás secciones relacionadas con los mapas de amenaza por crecida se presentan en el Anexo E.

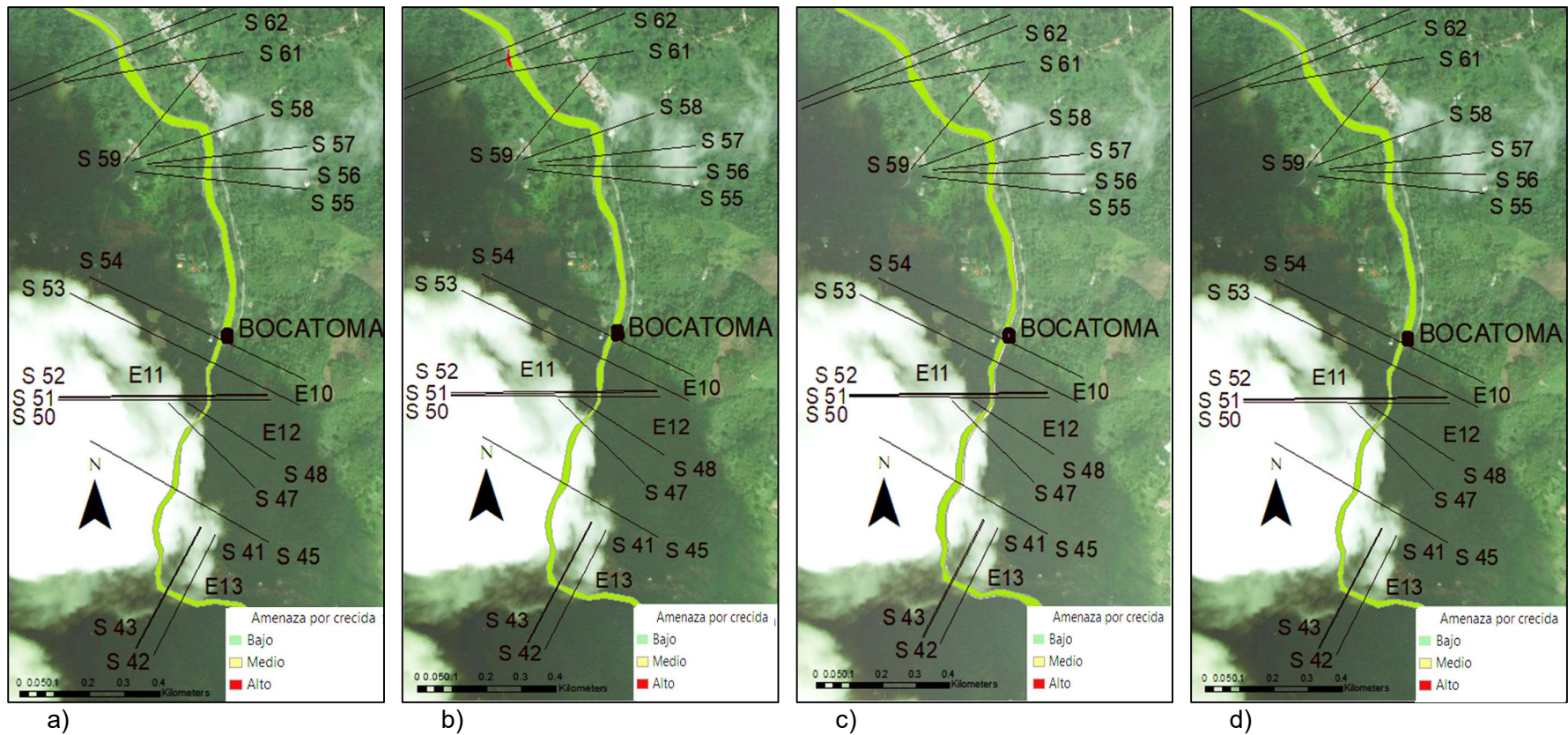


Figura 41. Amenaza por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

3.6.2 Estimación de la vulnerabilidad física por crecidas e inundaciones

En la Figura 42 se observó que el escenario de pastos es quien muestra mayores zonas de vulnerabilidad alta, lo cual puede tener relación con los altos valores de lámina de agua y velocidades expuestos anteriormente. De igual forma se constató que entre las secciones S62 y S45 en los escenarios de 2007 y cultivos se presenta un comportamiento similar por lo que la vulnerabilidad en esas zonas es parecida, mostrando niveles de vulnerabilidad medio en los márgenes derecho e izquierdo de río mientras que el canal evidencia zonas de vulnerabilidad alto dentro del que se encuentra la ubicación de la estructura de captación del acueducto de Ibagué entre las secciones S45 y S41 para esos mismos escenarios se destaca que la cobertura de cultivos presenta mayores zonas de vulnerabilidad alto en comparación con la cobertura de 2007.

Se observó que la cobertura de bosques es la que presenta menor situación de vulnerabilidad en comparación a los demás usos de suelo puesto que de la totalidad de la cuenca el 1.61% presentó nivel bajo, el 10.24% nivel medio y 28.15% nivel alto. En el caso del escenario de cultivos el 0.04% presentó nivel bajo, 56.38% medio y 43.58% alto; los pastos por su parte expusieron un 0.014% nivel bajo, 39.10% medio y 60.88% nivel de vulnerabilidad alto, finalmente el uso de suelo de 2007 mostró un 0.04% de la totalidad de la superficie un nivel bajo, 59.64% medio y 40.31% vulnerabilidad física por crecida alto.

De lo anterior se observa que el escenario que representa mayor vulnerabilidad es la cobertura de pastos, esto puede tener relación con la capacidad de infiltración del suelo, donde las superficies impermeables favorecen el aumento de los picos de las crecidas y en donde se evidencia que la escorrentía directa y los cambios de uso del suelo influyen en la ocurrencia de inundaciones (Du et al., 2015).

Las demás secciones relacionadas con los mapas de vulnerabilidad física por crecida se presentan en el Anexo F.

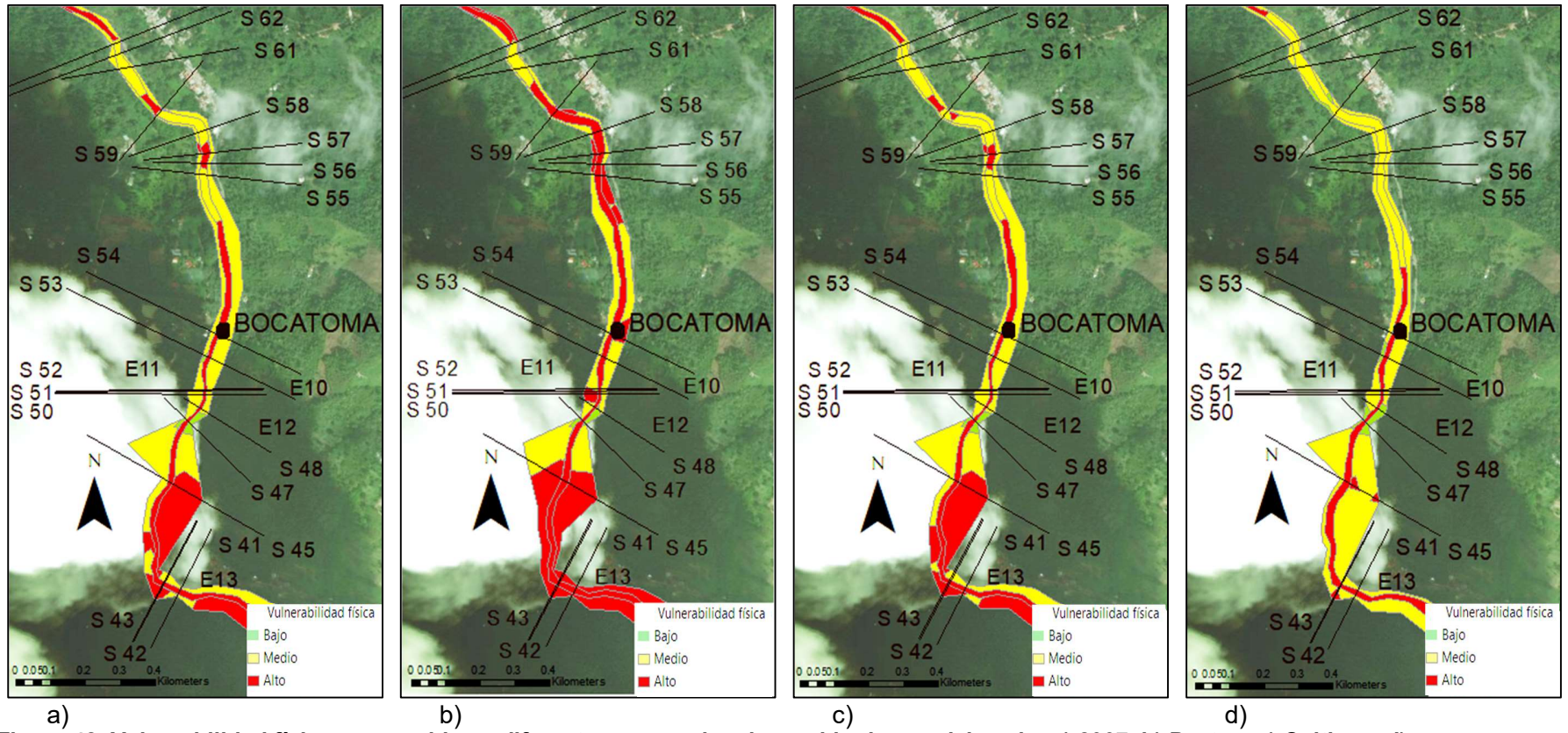


Figura 42. Vulnerabilidad física por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

3.6.3 Estimación de la vulnerabilidad de desabastecimiento por producción de sedimentos

En la Figura 43 se presenta la vulnerabilidad de desabastecimiento hídrico, lo anterior entendiendo el desabastecimiento como la interrupción en el servicio de suministro de agua potable. Se encontró que el uso de suelo de 2007 mostró que el 36.09% de la totalidad de la superficie presenta un nivel bajo de vulnerabilidad de desabastecimiento por producción de sedimentos, un 15.23% medio y 48.68% nivel alto. De igual manera se encontró que los pastos por su parte expusieron un 33.82% nivel bajo, 8.61% medio y 57.56% nivel de vulnerabilidad alto. En el caso del escenario de cultivos el 35.64% presentó nivel bajo, 14.28% medio y 50.08% alto y finalmente el escenario de bosques presenta que de la totalidad de la cuenca el 46.76% presentó nivel bajo, el 8.67% nivel medio y 44.56% nivel alto, observando que el escenario más desfavorable es la cobertura de pastos.

Las demás secciones relacionadas con los mapas de vulnerabilidad de desabastecimiento se presentan en el Anexo G.

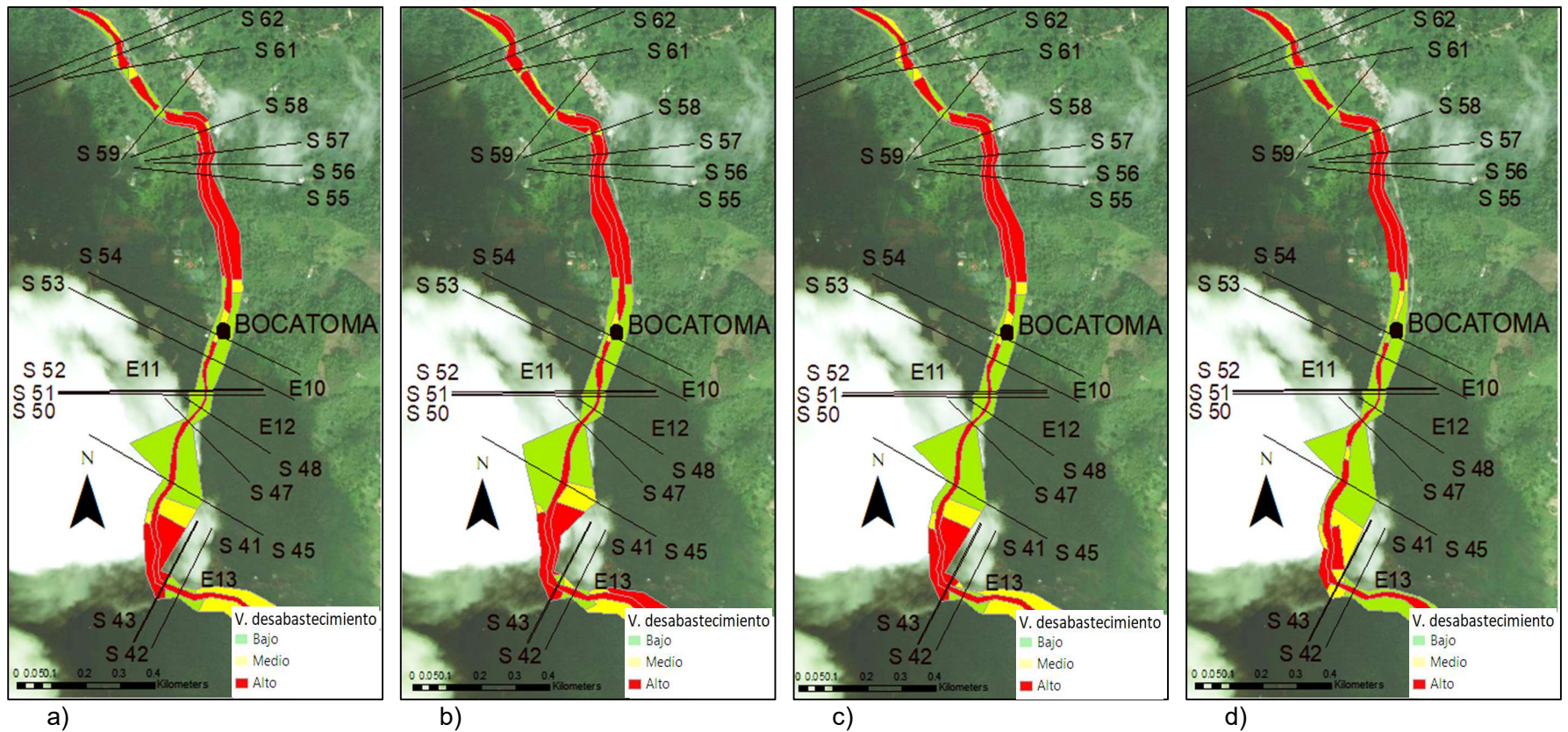


Figura 43. Vulnerabilidad de desabastecimiento en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor

De igual manera se realizó la superposición de cada uno de los mapas de textura de suelo y el mapa de pendientes de la cuenca del Río Combeima empleando ArcGIS para identificar la localización de partículas de tamaño arena, limo y arcilla susceptibles de desprenderse.

Se pudo identificar en la Figura 44 que el desprendimiento de partículas de tamaño arena se da en pendientes superiores al 25% lo cual tiene relación con el ángulo de resistencia interna de las partículas de material, pues es bien sabido que la máxima inclinación a la que puede conformarse un talud sin que se produzca deslizamiento es su ángulo de reposo. Así mismo en la Figura 44a se observó que en taludes con pendientes entre el 50 y 75% es más común el desprendimiento de arenas a lo largo de toda la cuenca del Río Combeima en comparación con la cantidad de material que se desprende de taludes con pendientes mayores al 75% (Figura 44b)

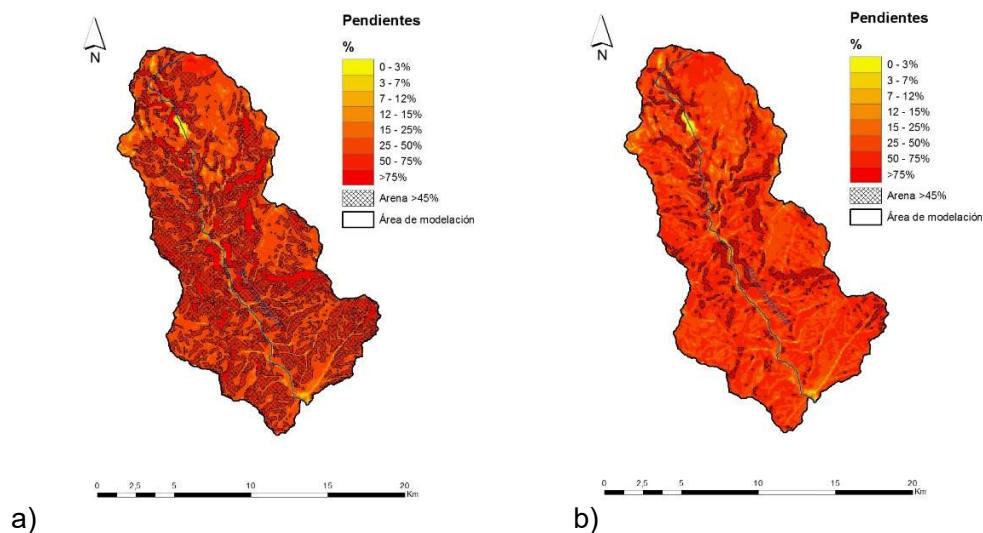


Figura 44. Sedimentos tamaño arena en cantidades mayores a 45% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) cantidad de arena >45% en pendientes de 50-75%. b) cantidad de arena >45% en pendientes >75%

Fuente: Autor.

En las Figura 45a y Figura 45b se observó que más del 30% de las partículas de tamaño limo se desprenden de taludes con pendientes entre el 50 y 75%, mientras que en pendientes superiores al 75% no hay mucho aporte de este material.

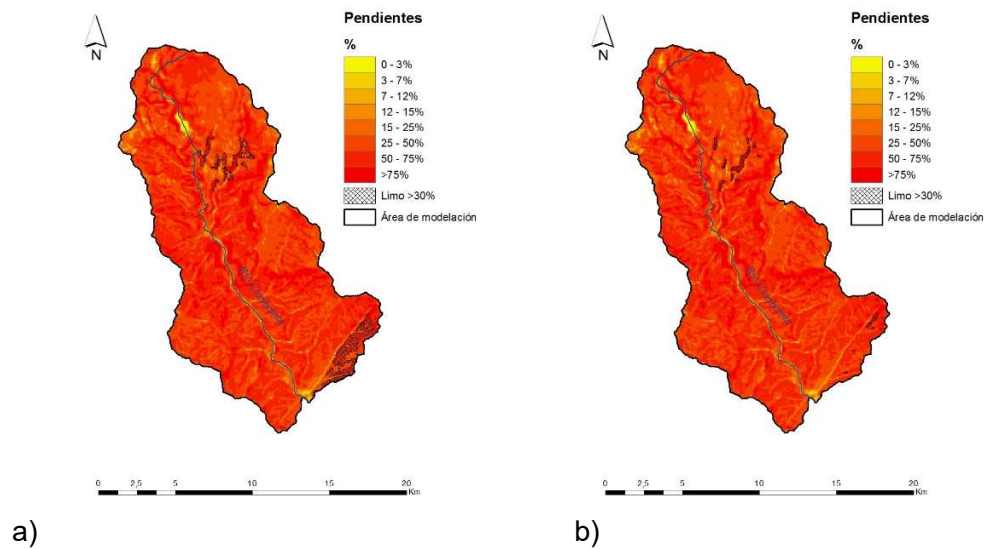


Figura 45. Sedimentos tamaño limo en cantidades mayores a 30% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) Limo >30% pendientes de 50-75%. b) Limo >30% pendientes >75%

Fuente: Autor.

En la Figura 46 se evidenció que en taludes con pendientes entre el 50 y 75% es más común el desprendimiento de arcillas en la parte baja de la cuenca del Río Combeima en comparación con la cantidad de material desprendido en pendientes mayores al 75% (Figura 46b)

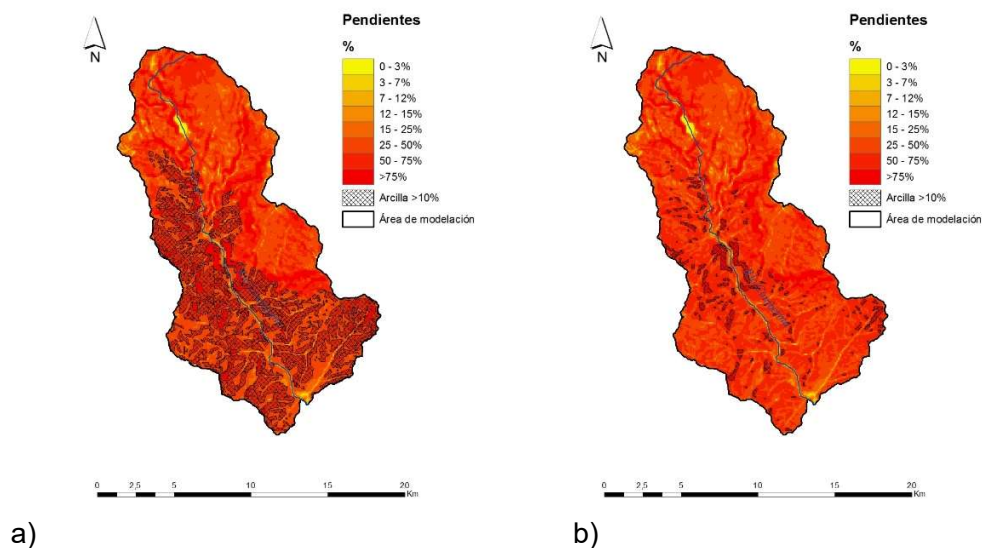
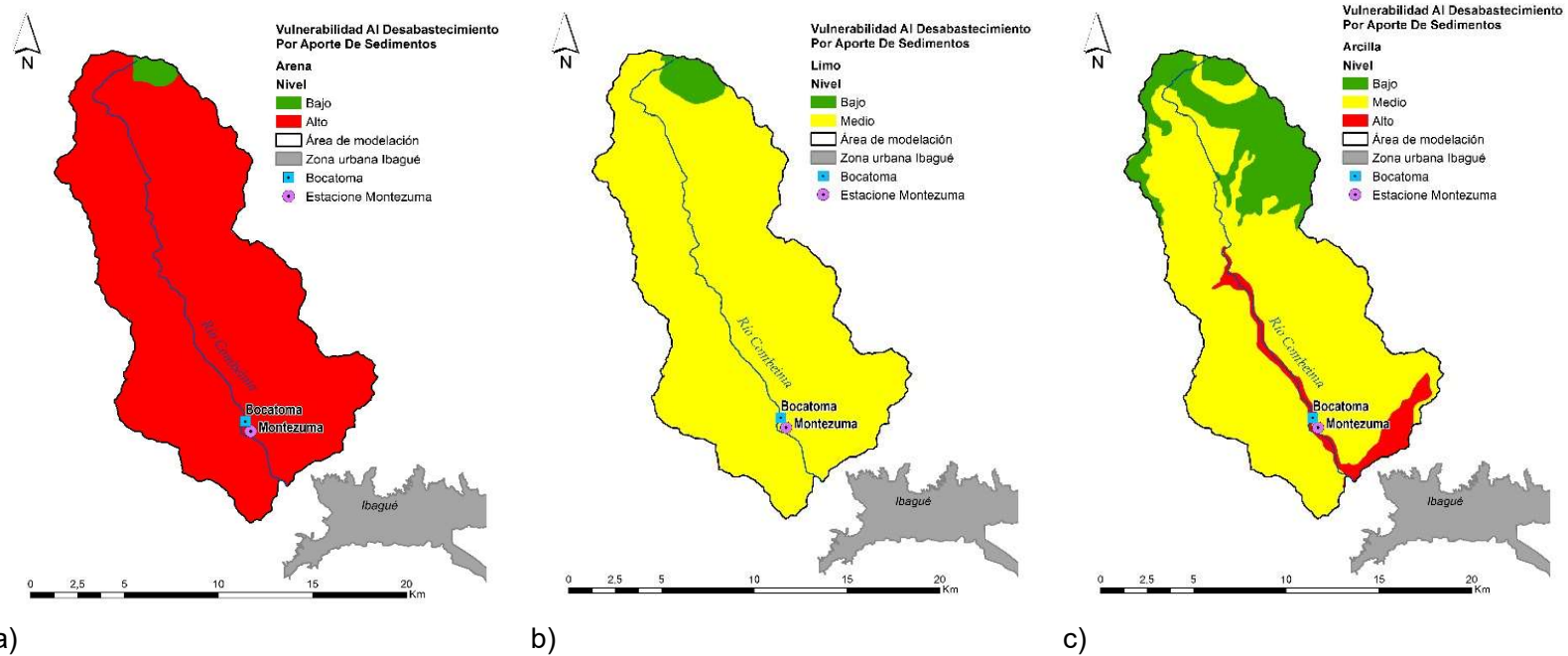


Figura 46. Sedimentos tamaño arcilla en cantidades mayores a 10% aportados en la cuenca por desprendimiento en diferentes pendientes. a) Arcilla >10% pendientes de 50-75%. b) Arcilla >10% pendientes >75%

Fuente: Autor.

Finalmente de manera generalizada se observó de las Figura 44, Figura 45 y Figura 46, que el mayor aporte de sedimentos producidos en la cuenca del Río Combeima corresponde a partículas de tamaño arena, seguido de arcillas y finalmente de partículas limosas, de igual forma reportó Bertol et al., (2010) que los sedimentos transportados por escorrentía tienen tendencia a aumentar la cantidad de partículas gruesas y a disminuir las partículas finas.

En la Figura 47a se observó que la cuenca del Río Combeima presenta una vulnerabilidad alta por un aporte generalizado de arena, de igual forma se observó que la cuenca del Río Combeima tiene una vulnerabilidad media al desabastecimiento por aporte de limos (Figura 47b) y finalmente una vulnerabilidad media – alta por aporte de partículas de arcilla (Figura 47c), encontrando que el arrastre de partículas es posible debido a la velocidad que toma la escorrentía (Bertol et al., 2010)



a) b) c)
Figura 47. Vulnerabilidad de desabastecimiento por aporte de arenas, limo y arcilla en la cuenca del Río Combeima. a) Vulnerabilidad por aporte de arenas. b) Vulnerabilidad por aporte de limo. c) Vulnerabilidad por aporte arcilla

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta la cantidad de arena, limo y arcilla producidos en el Combeima, se observó que pese a que la cuenca tiene una mayor propensión al desprendimiento de arena en comparación con la cantidad de arcilla y limo, este material no impide el suministro de agua a la ciudad puesto que el sistema de acueducto cuenta con cuatro unidades desarenadoras que funcionan para retirar dichas partículas mientras que el aporte de finos al cauce (limo y arcilla) aumentan los niveles de turbiedad por lo que se interrumpe el servicio.

3.6.4 Estimación del riesgo por crecidas e inundaciones

En la Figura 48 se observó que el uso de suelo de 2007 presentó un 53.65% de la totalidad de la superficie un nivel bajo de riesgo por crecidas, un 13.66% medio y 32.69% nivel alto. De igual manera se encontró que los pastos por su parte expusieron un 49.67% nivel bajo, 17.57% medio y 32.76% nivel de riesgo alto. En el caso del escenario de cultivos el 53.33% presentó nivel bajo, 13.97% medio y 32.69% alto y finalmente el escenario de bosques presenta que de la totalidad de la cuenca el 63.47% presentó nivel bajo, el 5.04% nivel medio y 31.48% nivel alto.

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta el escenario de bosques como la cobertura que permite unos menores niveles de riesgo por crecida en comparación con los demás usos de suelo, motivo por el que autores como Thieken et al., (2016) proponen la adopción de medidas no estructurales como la reforestación por ejemplo en la que se reduce un 30% el riesgo de inundaciones.

Las demás secciones relacionadas con los mapas de riesgo por crecida se presentan en el Anexo H.

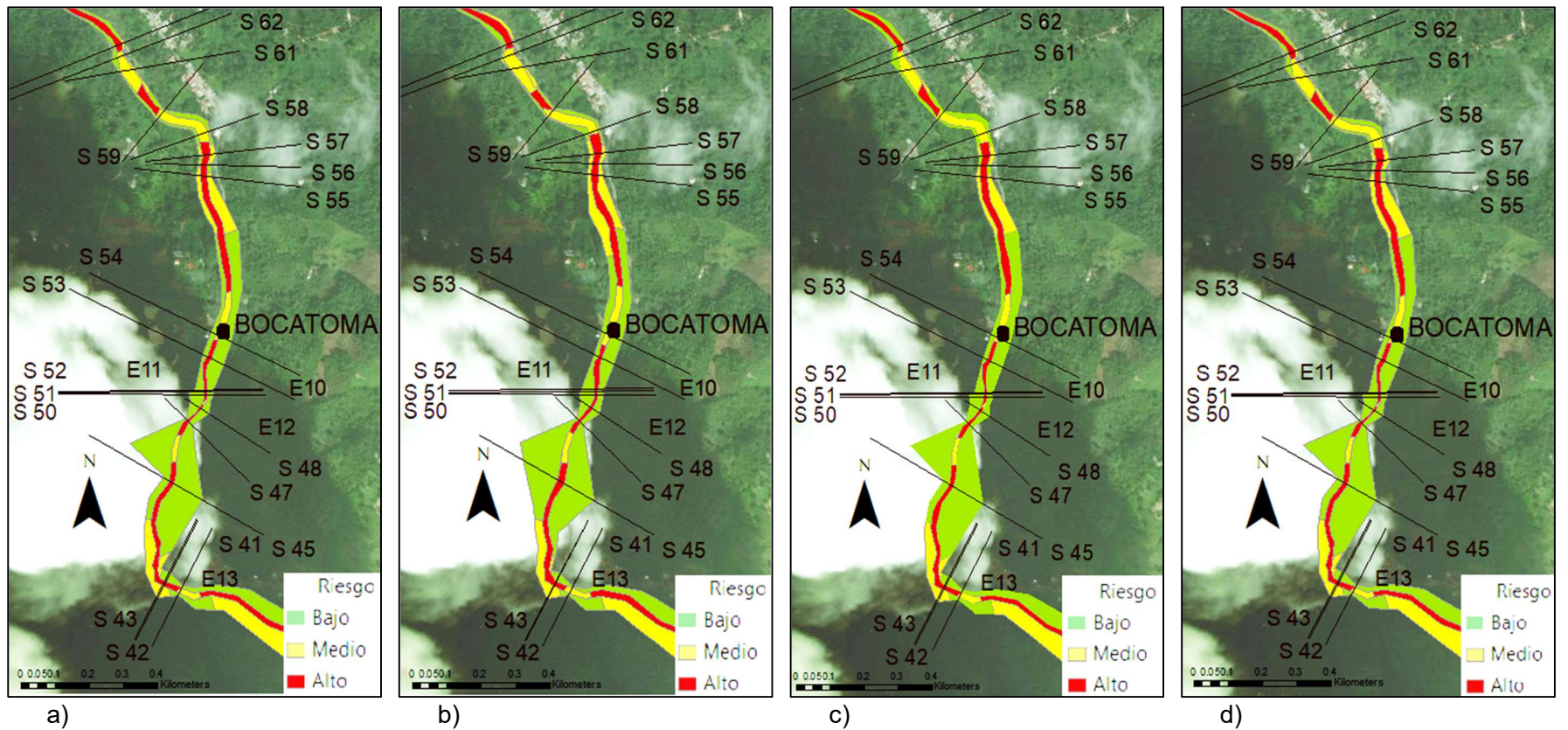


Figura 48. Riesgo por crecida en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. a) 2007. b) Pastos. c) Cultivos. d) Bosques.

Fuente: Autor.

3.7 Evaluación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento por aumento en los niveles de turbiedad por procesos erosivos

3.7.1 Estimación de la amenaza por concentración de sólidos en suspensión

En la Figura 49 se observa que para la misma magnitud de concentración de sólidos en suspensión (CSS) se presentan valores de turbidez diferentes lo cual corrobora lo evidenciado por autores como Hui, et al., (2011); así mismo se observa que aumentos en la concentración de partículas en suspensión lleva al aumento de la turbiedad del agua (Teixeira & Caliar, 2005).

Se evidenció que las mediciones de concentración de sólidos realizadas por el IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, (2019b) para el periodo de tiempo con información disponible se encuentra entre 2086 y 1203930 mg l⁻¹ y que los valores de turbiedad estuvieron entre 4 y 18848 UNT.

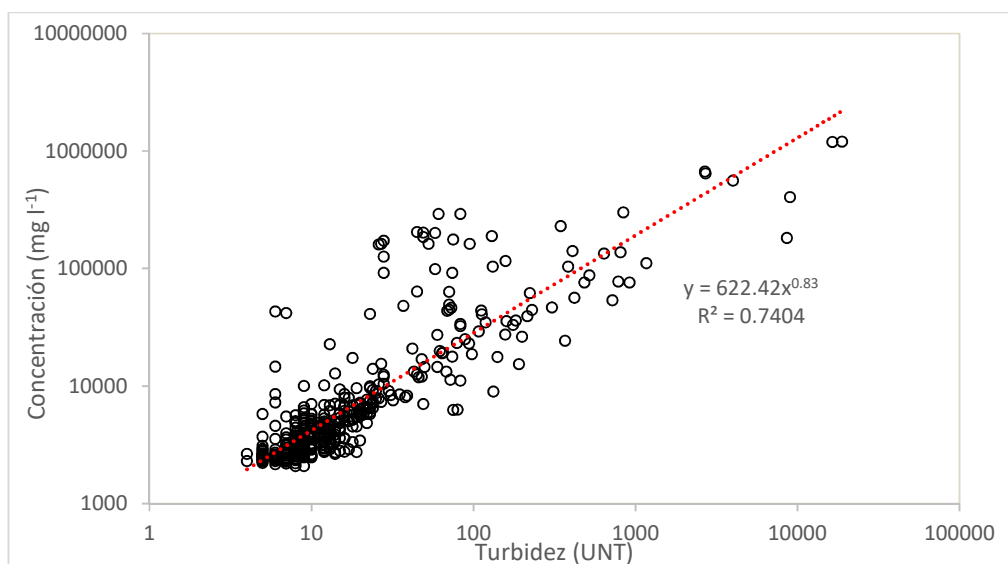


Figura 49. Valores de Concentración de sólidos en suspensión vs turbidez.

Fuente: Autor con base en IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL, (2019b)

3.7.2 Estimación de la vulnerabilidad de operación de la planta de tratamiento

La Tabla 29 presenta los niveles de amenaza definidos según los valores de la concentración de sólidos en suspensión obtenidos de la simulación hidráulica con HECRAS para cada escenario de cambio de uso del suelo y periodos de retorno. Así mismo, la Tabla 30 presenta la vulnerabilidad de operación de la planta de tratamiento partir de los valores de turbiedad obtenidos mediante la relación Concentración Sólidos en suspensión y turbiedad (Figura 45).

Tabla 29. Amenaza por concentración de sólidos en suspensión

Escenarios	CSS	Nivel de amenaza
2007med	10220581	Medio
2007 (5 años)	10220581	Medio
2007 (10 años)	8084916	Medio
2007 (25 años)	7729575	Medio
2007 (50 años)	7342796	Medio
2007 (100 años)	6718673	Medio
Bosque (5 años)	9430179	Medio
Bosque (10 años)	8822094	Medio
Bosque (25 años)	8192045	Medio
Bosque (50 años)	8020781	Medio
Bosque (100 años)	7812009	Medio
Cultivo (5 años)	8186052	Medio
Cultivo (10 años)	7980883	Medio
Cultivo (25 años)	6262864	Bajo
Cultivo (50 años)	6165234	Bajo
Cultivo (100años)	5554639	Bajo
Pastos (5 años)	7185217	Medio
Pastos (10 años)	6997912	Medio
Pastos (25 años)	6307411	Bajo
Pastos (50 años)	5596167	Bajo
Pastos(100 años)	5035508	Bajo

Fuente: Autor.

Tabla 30. Vulnerabilidad de la planta ante diferentes escenarios y periodos de retorno.

Escenarios	UNT	Nivel de vulnerabilidad
2007med	11792.75298	Medio
2007 (5 años)	11792.75298	Medio
2007 (10 años)	9576.045422	Medio
2007 (25 años)	9201.246663	Medio
2007 (50 años)	8791.091034	Medio
2007 (100 años)	8124.075989	Medio
Bosque (5 años)	10979.03323	Medio
Bosque (10 años)	10347.83188	Medio
Bosque (25 años)	9688.676296	Medio
Bosque (50 años)	9508.536934	Medio
Bosque (100 años)	9288.36295	Medio
Cultivo (5 años)	9682.379874	Medio
Cultivo (10 años)	9466.509905	Medio
Cultivo (25 años)	7632.582004	Bajo
Cultivo (50 años)	7526.797611	Bajo
Cultivo (100años)	6860.816785	Bajo
Pastos (5 años)	8623.301945	Medio
Pastos (10 años)	8423.324621	Medio
Pastos (25 años)	7680.788383	Bajo
Pastos (50 años)	6906.361689	Bajo

Fuente: Autor.

3.7.3 Estimación del riesgo de la captación del acueducto de Ibagué ante desabastecimiento

Para la evaluación del riesgo de desabastecimiento en diferentes escenarios de uso del suelo se realizó la verificación de los niveles de amenaza y vulnerabilidad obtenidos en cada caso (Tabla 31), encontrando que todos los escenarios a excepción de la cobertura de cultivo y pastos para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años representan un nivel de riesgo medio mientras que estos últimos

constituyen un nivel de riesgo bajo de desabastecimiento de agua potable al presentar altos valores de turbiedad.

Tabla 31. Riesgo de desabastecimiento ante diferentes escenarios y periodos de retorno.

Escenarios	Amenaza	Vulnerabilidad	Riesgo
2007med	Medio	Medio	Medio
2007 (5 años)	Medio	Medio	Medio
2007 (10 años)	Medio	Medio	Medio
2007 (25 años)	Medio	Medio	Medio
2007 (50 años)	Medio	Medio	Medio
2007 (100 años)	Medio	Medio	Medio
Bosque (5 años)	Medio	Medio	Medio
Bosque (10 años)	Medio	Medio	Medio
Bosque (25 años)	Medio	Medio	Medio
Bosque (50 años)	Medio	Medio	Medio
Bosque (100 años)	Medio	Medio	Medio
Cultivo (5 años)	Medio	Medio	Medio
Cultivo (10 años)	Medio	Medio	Medio
Cultivo (25 años)	Bajo	Bajo	Bajo
Cultivo (50 años)	Bajo	Bajo	Bajo
Cultivo (100años)	Bajo	Bajo	Bajo
Pastos (5 años)	Medio	Medio	Medio
Pastos (10 años)	Medio	Medio	Medio
Pastos (25 años)	Bajo	Bajo	Bajo
Pastos (50 años)	Bajo	Bajo	Bajo
Pastos(100 años)	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Autor.

La turbidez y dureza total del agua varían con relación a los cambios en la cobertura vegetal (Wright, Churchill, & Stevens, 1976), donde las partículas finas de suelo (limo, arcilla) depositadas a los cuerpos de agua luego de un proceso de erosión se encuentran como sedimentos en suspensión afectando la calidad de agua de la fuente (Wijesiri et al., 2018). Estudios como el efectuado por Ngoye & Machiwa, (2004) en el que se evaluó la influencia

del cambio de uso de suelo en la turbiedad de la cuenca del Río Ruvu en Tanzania permitió evidenciar variaciones entre 3.0 ± 0.6 a 840 ± 69.3 UTN, lo cual corrobora la importancia que tiene el aporte de finos a los cuerpos de agua y por ende en el abastecimiento de agua a la población.

Capítulo IV. Conclusiones

Luego de evaluar los resultados del test Mann Kendall aplicado por Peña et al (2016) a las series hidroclimatológicas de la cuenca del Río Combeima se observó que las series de precipitación y temperatura no presentan tendencia lo que permite deducir que no se evidencia influencia del cambio climático en dichas variables, sin embargo se evidenció que la serie de caudales presenta tendencia decreciente, lo cual podría estar asociado a cambios de uso del suelo en el área de la cuenca.

Los resultados obtenidos de la modelación hidrológica muestran que la utilización de bosques como cobertura vegetal reduce un 88.77% la cantidad de sedimentos producidos por erosión laminar en la cuenca del Río Combeima en comparación con la cobertura de uso de suelo de 2007. De igual forma se encontró que quien presenta menor resistencia a la erosión son los pastos cuya cantidad de sedimentos producidos fue 69.14% mayor a la cobertura de 2007.

Luego de la modelación de sedimentos se observa que una transición en el uso del suelo para la condición 2007 a una de bosques puede reducir el volumen y el caudal máximo de sedimentos producidos, lo cual puede reducir riesgo de inundación en la cuenca.

De igual forma se observa que la presencia de vegetación con raíces profundas como los bosques, mejoran la capacidad de infiltración del suelo además de disminuir los volúmenes de escorrentía superficial a diferencia del uso de coberturas de raíces menores como los pastos, encontrando así que el cambio de uso del suelo influye en los picos de crecidas y en la producción de sedimentos puesto que la mayor cantidad de partículas desprendidas por erosión laminar fueron dadas en coberturas vegetales con zonas radicales poco profundas.

El mayor aporte de sedimentos está relacionado con partículas de tamaño arena seguido de arcillas y limos, identificando que la zona de donde proviene la mayor cantidad de partículas corresponde de la vertiente occidental de la cuenca del Río Combeima (Figura 44, Figura 45 y Figura 46).

De igual manera puede concluirse que si se modifica el uso del suelo de las subcuencas por coberturas de bosques puede reducirse la pérdida de suelo y el aporte de sedimentos que causan aumentos en la turbiedad en la cuenca del Río Combeima.

Se realizó la estimación de riesgo por desabastecimiento teniendo en cuenta el aporte de limo y arcilla más no de arena puesto que la variación de los niveles de turbiedad ocurren por el transporte de partículas coloidales y limos, en el caso de la arena estas partículas son evacuadas a través de las unidades desarenadoras del sistema de acueducto.

Es así como se logró identificar que el cambio de uso del suelo produce efectos en la producción de sedimentos a escala de cuenca, lo cual se relaciona estrechamente con el comportamiento de la turbiedad en la captación del acueducto para la ciudad de Ibagué.

Se contó con periodos de registro horario de la turbiedad del agua en la bocatoma de Ibagué sin embargo se recomienda la medición continua de la concentración de sólidos en suspensión en la fuente debido que de esta variable la empresa de acueducto y alcantarillado no realiza mediciones, siendo esto fundamental para la descripción del comportamiento de la variación de la turbiedad en la fuente.

Dentro de los aportes de este proyecto de grado se destaca la contribución a la generación de conocimiento útil para la toma de decisiones en la región debido que en este trabajo fueron determinadas las zonas con mayor producción de sedimentos al río que influyen en el desabastecimiento de la ciudad de Ibagué, así mismo como aporte al conocimiento científico se resalta el desarrollo de una propuesta de evaluación del riesgo que se fundamenta en la utilización de metodologías para la estimación de volúmenes de sedimentos aportados por erosión laminar y los producidos en el cauce del río teniendo en cuenta la influencia de los cambios de uso del suelo en una cuenca hidrográfica.

Como recomendación a futuras investigaciones se propone identificar y relacionar mediante ensayos de hidrometría cuales son las partículas en porcentaje que influyen en el desabastecimiento de agua potable. Así mismo se sugiere realizar un la caracterización del suelo, levantando información a escala 1:25000 de la cuenca del Río Combeima o el

desarrollo de investigaciones en las que se definan las funciones de pedotransferencia para los suelos del Tolima, con el fin de obtener mejores calibraciones del modelo hidrológico.

Capítulo V. Referencias

- Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., & Wagan, B. (2015). Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*, 2015, 15. <https://doi.org/10.1155/2015/431860>
- Aksoy, H., & Kavvas, M. L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64(2–3), 247–271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>
- Alansi, A.W. & Amin, M & Ghazali, Abdul & Shafri, Helmi & Thamer, A.M. & Waleed, A.R.M. & Wayayok, Aimrun & Ezrin, M. (2009). The effect of development and land use change on rainfall-runoff and runoff-sediment relationships under humid tropical condition: Case study of Bernam watershed Malaysia. *European Journal of Scientific Research*, 31(1), 88–105.
- Alaoui, A., Caduff, U., Gerke, H. H., & Weingartner, R. (2011). A Preferential Flow Effects on Infiltration and Runoff in Grassland and Forest Soils. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 367. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0076>
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., & Blöschl, G. (2018). Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, 557(December), 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>
- Alcaldía municipal de Ibagué. (2016). *Plan de Desarrollo 2016 - 2019*. Ibagué, Tolima. Retrieved from www.alcaldiadeibague.gov.co/portal/admin/archivos/.../14024-PLA-20160502.pdf%0A
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. N. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (2011). Landscape and Urban Planning Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 102(4), 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.05.006>
- Almorox, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz, M., & Gascó, J. (1994). *Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica*. (S. A. Editorial Agrícola Española, Ed.). Madrid.
- Angima, S. D., Stott, D. E., O'Neill, M. K., Ong, C. K., & Weesies, G. A. (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97(1–3), 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00011-2)
- APFM, OMM, & Asociación Mundial para el Agua. (2009). *Gestión integrada de crecidas* :

documento conceptual. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial (OMM), Asociación Mundial para el Agua.

Aquabook. (2016). Principios de Dublín. Retrieved from http://aquabook.agua.gob.ar/1054_0

Bakker, M., Govers, G., Doorn, A. van, Quetier, F., Chouvardas, D., & Rounsevell, M. (2008). The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe : The importance of landscape pattern. *Geomorphology*, *98*(3–4), 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.027>

Balica, S. F., Douben, N., & Wright, N. G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology*, *60*(10), 2571–2580. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.183>

Bankoff, G., & Frerks, G. (2004). The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management. In *Mapping Vulnerability* (1ra edició, p. 15). London: Routledge.: Taylor & Francis.

Benavides, J. F., Gaviria, H. A., Lara, J. F., Bustos, G. E., & Rodríguez-Rojas, I. C. (2018). *Proyecto: Levantamiento batimétrico Villa Restrepo – Bocatoma de Ibagué. Código: 17-497-SEM*. Ibagué, Tolima.

Beneš, B., Těšínský, V., Hornyš, J., & Bhatia, S. K. (2006). Hydraulic erosion. *Computer Animation and Virtual Worlds*, *17*(2), 99–108. <https://doi.org/10.1002/cav.77>

Bertol, I., Zoldan Junior, W. A., González, A. P., Barbosa, F. T., & Werner, R. D. S. (2010). Sediment transport in runoff on rugous soil surface submitted to simulated rainfall. *Scientia Agricola*, *67*(5), 591–597.

Blain, G. C. (2013). Acta Scientiarum The Mann-Kendall test : the need to consider the interaction between serial correlation and trend. *Acta Scientiarum. Agronomy*, *35*(4), 393–402. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i4.16006>

Bogunovic, I., Pereira, P., Kistic, I., Sajko, K., & Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction , erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena*, *160*, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009>

Botero, B. A., & Francés, F. (2010). Estimation of high return period flood quantiles using additional non-systematic information with upper bounded statistical models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, *7*, 5413–5440. <https://doi.org/10.5194/hessd-7-5413-2010>

Bronstert, A., Niehoff, D., & Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, *16*(2), 509–529. <https://doi.org/10.1002/hyp.326>

- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (5.0)*. US Army Corps Of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC). Retrieved from www.hec.usace.army.mil
- Bussi, G., Francés, F., José, J., & Julien, P. Y. (2014). Environmental Modelling & Software Distributed sediment yield modelling : Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling and Software*, *58*, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.010>
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J. J., & Julien, P. Y. (2014). Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling and Software*, *58*(58), 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.010>
- Cárdenas, M. A. C., Isaza, J. A. L., Lombana, E. J. C., Almeida, D. G. I., Rañírez, J. H. S., & Naranjo, J. A. O. (2014). Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, cordillera central, Colombia. *Boletín de Geología*, *36* (1), 37–56. <https://doi.org/ISSN: 0120-0283>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters -CRED. (2014). EM-DAT Glossary. Retrieved August 1, 2018, from https://www.emdat.be/Glossary#letter_r
- CEPREDENAC, Embajada de Noruega, & Instituto Noruego de Geotécnia. (2009). Guía la amenaza por deslizamiento o deslave y su vigilancia comunal. Retrieved from www.cepredenac.org
- Cerri, R. I., Reis, F. A. G. V., Gramani, M. F., Giordano, L. C., & Zaine, J. E. (2017). Landslides Zonation Hazard: Relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, *89*(4), 2609–2623. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170224>
- Chau, K. T., Sze, Y. L., Fung, M. K., Wong, W. Y., Fong, E. L., & Chan, L. C. P. (2004). Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers and Geosciences*, *30*(4), 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013>
- Chaudhry, M. H. (2008). Sediment Transport. In *Open-Channel Flow* (Second edi, pp. 453–477). Springer, Boston, MA. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6_16
- Clague, J. J., & Roberts, N. J. (2013). Landslide hazard and risk. *Cambridge University Press*, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.002>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación. (2009). *Documento CONPES 3570*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/boletines/ago2012/3570.pdf>

- Consortio GEOTEC GROUP. (2012). *Capítulo 4. Geología: Estudio de amenazas naturales, vulnerabilidad y escenarios de riesgo en los centros poblados de Villarestrepo, Llanitos, Juntas, Pastales, Pico de oro, Bocatoma Combeima y Cay por flujos torrenciales en las microcuencas del Río Combe*. Ibagué, Tolima.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2007). POMCA Cuenca Coello. Tolima, Colombia: CORTOLIMA.
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18(4), 598–606. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013>
- Daniels, J. P. (2017). Preparedness for natural disasters in Colombia. *The Lancet*, 389(10087), 2363–2364. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)31664-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)31664-1)
- de Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2011). Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards*, 58(1), 407–425. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9675-6>
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES). (2009). Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Retrieved November 20, 2018, from <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>
- Douglas, J. (2007). Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2), 283–288. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-283-2007>
- Du, S., Van Rompaey, A., Shi, P., & Wang, J. (2015). A dual effect of urban expansion on flood risk in the Pearl River Delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation. *Natural Hazards*, 77(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1583-8>
- Duchrow, R. M., & Everhart, W. H. (2011). Turbidity Measurement. *Transactions of the American Fisheries Society*, (April 2015), 682–690. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1971\)100](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1971)100)
- EM-DAT, UCL, & CRED. (2018). *Disaster Trends*. Brussels, Belgium. Retrieved from <http://www.emdat.be>
- EM-DAT, UCL, & CRED. (2019a). *Número de eventos por tipo de desastre periodo entre 1971 y 2019*. Brussels, Belgium. Retrieved from <http://www.emdat.be>
- EM-DAT, UCL, & CRED. (2019b). *Número de muertos y personas afectadas por tipo de desastre periodo entre 1971 y 2019*. Brussels, Belgium. Retrieved from <http://www.emdat.be>
- Endress + Hauser. (2018). *Operating Instructions Turbimax CUS51D Sensor Sensor for*

turbidity and solids content - Turbimax CUS51D. Endress+Hauser People for process automation. Retrieved from www.addresses.endress.com

- Few, R. (2003). Flooding, vulnerability and coping strategies: local responses to a global threat. *Progress in Development Studies*, 3(1), 43–58.
<https://doi.org/10.1191/1464993403ps049ra>
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, 226–240.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Fuchs, S., Kuhlicke, C., & Meyer, V. (2011). Editorial for the special issue: Vulnerability to natural hazards-the challenge of integration. *Natural Hazards*, 58(2), 609–619.
<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9825-5>
- Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
- Gálvez, M. V. (2002). *Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina : Realidad y Potencial-Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS 2000 - 2002*.
- García-Ruiz, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>
- García, B., Peña, L. E., Barrios, M., & Múnera, J. (2016). Uncertainty of discharge estimation in high-grade Andean streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.02.005>
- Giuliana, B., Simionato, C., Dogliotti, A., & Moreira, D. (2016). Estudio de la relación entre turbidez y concentración de sedimentos en suspensión en función de la granulometría en el Río de la Plata. In *3er Encuentro de investigadores en formación en recursos hídricos* (p. 15). Buenos Aires: IFRH 2016.
- Global Water Partnership (GWP); La Red Internacional de Organismos de Cuenca (INBO). (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídrico en cuencas. Global Water Paternship y Red Internacional of Basin* Retrieved from www.inbo-news.org; www.gwpforum.org
- Global Water Partnership (GWP). (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos* (Vol. 4). Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership. Retrieved from <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/04-integrated-water-resources-management-2000-spanish.pdf>
- Grupo Redhisp. (2014a). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.8*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from

<http://llovvia.dihma.upv.es/EN/software/software.html>

- Grupo Redhisp. (2014b). *Manual del Usuario TETIS 8.3.0*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S., & Nóbrega, R. L. B. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15(May 2017), 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data : The Mann – Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hidrology*, 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hamza, T., & Raghuvanshi, T. K. (2017). GIS based landslide hazard evaluation and zonation – A case from Jeldu District, Central Ethiopia. *Journal of King Saud University - Science*, 29(2), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.002>
- Hannouche, A., Chebbo, G., Ruban, G., Tassin, B., Lemaire, B. J., & Joannis, C. (2011). Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Science and Technology*, 64(12), 2445–2452. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.779>
- Holmes, J. (2005). Hyogo Framework for Action 2005 - 2015: Bulding the resilience of nations and communities to disasters. *International Stratergy for Disaster Reduction (ISDR)*, 6.
- Holz, D. J., Williard, K., Edwards, P. J., & Schoonover Jon E. (2015). Soil Erosion in Humid Regions: A Review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, (154), 48–59.
- Hrissanthou, V. (2002). Comparative application of two erosion models to a basin. *Hydrological Sciences -Journal Des Sciences Hydrologiques*, 47(2)(February), 279–292. <https://doi.org/10.1080/02626660209492930>
- Huabin, W., Gangjun, L., Weiya, X., & Gonghui, W. (2016). GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 473–493. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp462ra>
- Hui, L., Daphne, X., Utomo, H. D., Zhi, L., & Kenneth, H. (2011). Correlation between Turbidity and Total Suspended Solids in Singapore Rivers. *Journal of Water Sustainability*, 1(3), 313–322. Retrieved from http://www.jwsponline.org/uploadpic/magazine/pp_313-322_jws-a013_new.pdf
- Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hidrology*, 292, 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.002>

- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2017a). IBAL invierte más de mil millones en modernización de bocatoma Combeima. Retrieved August 1, 2018, from <https://pazestereo.com/ibal-invertira-mas-mil-millones-bocatoma-combeima/>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2017b). IBAL invierte más de mil millones en modernización de bocatoma Combeima. Retrieved August 1, 2018, from ibal.gov.co/ibal-inverte-m-s-de-mil-millones-en-modernizaci-n-de-bocatoma-combeima%0D
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2017c). *Rendición de cuentas IBAL 2017*. Ibagué, Tolima. Retrieved from <http://www.ibal.gov.co/rendici-n-de-cuentasinformes-de-gesti-n>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2018a). Afectado servicio de agua en la ciudad por fuertes lluvias en la parte alta de la cuenca Combeima. Luego de suspender por turbiedad se captan 300l/s de Cay. (24 de julio de 2018). En Twitter (foto de biografía). Retrieved August 1, 2018, from <https://twitter.com/ibalsocial>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2018b). Continúa en Alerta Roja el río Combeima por crecientes súbitas debido a lluvias. (11 de junio de 2018). En Facebook (foto de biografía). Retrieved August 1, 2018, from <https://www.facebook.com/ibalsocial/photos/a.320904108078975.1073741831.285860244916695/969810606521652/?type=3&theater>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2018c). Se inicia la Fase II del Acueducto Complementario de Ibagué. Retrieved August 1, 2018, from <http://ibal.gov.co/se-inicia-la-fase-ii-del-acueducto-complementario-de-ibagu>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2018d). Search for turbiedad Ibal Reduce Cortes por Problemas en Bocatoma Combeima. Retrieved August 1, 2018, from <http://www.ibal.gov.co/search/node?keys=turbiedad&page=1>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2018e). Suspensión de la captación en Bocatoma Combeima por 38.000 ntu. (24 de julio de 2018). En Facebook (foto de biografía). Retrieved August 1, 2018, from <https://www.facebook.com/ibalsocial/photos/a.320904108078975.1073741831.285860244916695/1013287605507285/?type=3&theater>
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2019a). Condiciones normales de turbiedad. In *Manual de operaciones Bocatoma de Ibagué* (pp. 6–8).
- IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL. (2019b). *Control diario Bocatoma Combeima - registros turbiedad*. Ibagué, Tolima.
- INGEOMINAS. (1999). Geología del Departamento de Tolima. Ministerio de minas y energía República de Colombia.
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana, & Consultoría Colombiana S.A. (2000). *Microzonificación sísmica preliminar de Ibagué*. Retrieved from <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/20.500.11762/19836/1/Microzonifi>

cacionSismicalbague%28UJaveriana_2000%29.pdf

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1989). Descripción de los suelos. In *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Tolima* (pp. 29–110). Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- IUCN. (2006). *Ecosystems, Livelihoods and Disasters: An integrated approach to disaster risk management*. (S.-R. Karen, M. Hillary, R. Ali, & R. Simon, Eds.). IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2011). *A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. The World Bank, GFDRR. Retrieved from www.worldbank.org
- Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2), 577–590. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002>
- Kapucu, N., & Özerdem, A. (2013). Hazards, Vulnerability, and Disaster Risk. In *Managing Emergencies and Crises* (pp. 11–32). United States of America: Jones & Bartlett Publishers. Retrieved from http://samples.jbpub.com/9780763781552/81552_CH02_FINAL.pdf
- Keefer, D. K., & Larsen, M. C. (2007). Geology. Assessing landslide hazards. *Science (New York, N. Y.)*, 316(5828), 1136–1138. <https://doi.org/DOI:10.1126/science.1143308>
- Kelman, I. (2000). *Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal Eastern England*. University of Cambridge, U.K.
- Khabarov, N., Huggel, C., Obersteiner, M., & Ramírez, J. M. (2011). Adaptation capacity of a landslide early warning system to climate change: numerical modeling for the Combeima region in Colombia. In *Journal of Integrated Disaster Risk Management* (Vol. 1, pp. 82–95). <https://doi.org/10.5595/idrim.2011.0019>
- Kim, C. (2016). Land use classification and land use change analysis using satellite images in Lombok Island, Indonesia. *Forest Science and Technology*, 12(4), 183–191. <https://doi.org/10.1080/21580103.2016.1147498>
- Kron, W. (2005). Flood risk = hazard • values • vulnerability. *Water International*, 30(1), 58–68. <https://doi.org/10.1080/02508060508691837>
- Lipiec, J., Kuś, J., Stowińska-Jurkiewicz, A., & Nosalewicz, A. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research*, 89(2), 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.012>
- Liu, J., & Shi, Z. wu. (2017). Quantifying land-use change impacts on the dynamic evolution of flood vulnerability. *Land Use Policy*, 65(October 2016), 198–210.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.012>

- Lizcano Murcia, D. O., & Muñoz Barreto, D. F. (2018). *Modelación de las variables hidráulicas sobre las estructuras existentes en el Río Combeima tramo Juntas – B/Libertador*. Universidad de Ibagué.
- Lopez Cardona, M. C. (2006). *Análisis de Deformación Tectónica en el Piedemonte de las Cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca, Colombia - Contribuciones Paleosísmicas*. Universidad EAFIT.
- Lu, X. X., Ran, L. S., Liu, S., Jiang, T., Zhang, S. R., & Wang, J. J. (2013). Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 28(1), 1–14.
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(13\)60013-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60013-X)
- Mao, D., & Cherkauer, K. A. (2009). Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 71–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.016>
- Messner, F., & Meyer, V. (2005). Flood Damage, Vulnerability and Risk Perception – Challenges for Flood Damage Research. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, 149–167. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4598-1_13
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018a). Cambio climático. Retrieved January 20, 2018, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico/que-es-cambio-climatico/que-es-el-cambio-climatico>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018b). *GUÍA TÉCNICA DE CRITERIOS PARA EL ACOTAMIENTO DE LAS RONDAS HÍDRICAS EN COLOMBIA Bogotá*,. Bogotá D.C. Retrieved from http://www.andi.com.co/Uploads/GuiaRondasHid_criteriosdeacotamiento.pdf
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2018). *Informe nacional de calidad del agua para consumo humano INCA 2016*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/ssa-inca-2016.pdf>
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2010). *Título B. Sistemas de Acueducto - Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2da ed.)*. Bogotá D.C. Retrieved from http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOB_030714.pdf
- Montes, N., Velandia, F., Osorio, J., Audemard, F., & Diederix, H. (2005). Interpretación morfotectónica de la falla de Ibagué para su caracterización paleosismológica. *Boletín Geológico de La Universidad Industrial de Santander*, 27(44), 95–114.

- Moreno, M., & Vergara, H. (1992). *Estudio geológico - geotécnico de la cuenca del río Combeima, departamento del Tolima* (Vol. 2). Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moya, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agua*, 3(February 2014), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Murillo, J. M. (2009). Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México). *Boletín Geológico y Minero*, 120(2), 169–184.
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo del Milenio Informe de 2015*. Nueva York. Retrieved from http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/2015/mdg-report-2015_spanish.pdf
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(10), 282–290. <https://doi.org/10.3917/difa.012.0161>
- Ngoye, E., & Machiwa, J. F. (2004). The influence of land-use patterns in the Ruvu river watershed on water quality in the river system. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(15–18), 1161–1166. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.002>
- Niehoff, D., Fritsch, U., & Bronstert, A. (2002). Land-use impacts on storm-runoff generation: Scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, 267(1–2), 80–93. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00142-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00142-7)
- Núñez, A. (2001). Mapa geológico del Departamento del Tolima-Memoria Explicativa. Escala 1:250.000. *Ingeominas*, 101.
- Ola, A., Dodd, I. C., & Quinton, J. N. (2015). Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *Soil*, 1(2), 603–612. <https://doi.org/10.5194/soil-1-603-2015>
- Ongley, E. D., & FAO. (1997). Contaminación provocada por los sedimentos. In *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s04.htm>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible*. Dublín. Retrieved from

<http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/espanol/icwedecs.html>

- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (3era Ed., Vol. 1). Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Ospina-Zúñiga, Ó., García-Cobas, G., Gordillo-Rivera, J., & Tovar-Hernández, K. (2016). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia) Ingeniero(a) civil. Profesor(a) investigador. *Ingeniería Solidaria*, 12(19), 19–36. <https://doi.org/10.16925/in.v12i19.1191>
- Ospina Zúñiga, O. E. (2015). Análisis de la contaminación microbiológica en el río Combeima, municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). *Producción + Limpia*, 10(2), 92–103.
- Ouyang, W., Wu, Y., Hao, Z., Zhang, Q., Bu, Q., & Gao, X. (2018). Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science of the Total Environment*, 613–614, 798–809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.173>
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., & Glade, T. (2011). *Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs*. *Natural Hazards* (Vol. 58). <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9632-4>
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2017). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>
- Pavanelli, D., & Bigi, A. (2005). Indirect Methods to Estimate Suspended Sediment Concentration : Reliability and Relationship of Turbidity and Settleable Solids. *Biosystems Engineering*, 90(1), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.09.001>
- Peña, L. E. (2017). *Escalamiento de propiedades hidráulicas del suelo en el régimen de crecidas a escala de cuenca - Aplicación en la cuenca del Río Combeima (Suramérica)*. Universitat Politècnica de València.
- Peña, L. E., Barrios, M., & Francés, F. (2016). Flood quantiles scaling with upper soil hydraulic properties for different land uses at catchment scale. *Journal of Hydrology*, 541, 1258–1272. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.031>
- Perotto-Baldiviezo, H. L., Thurow, T. L., Smith, C. T., Fisher, R. F., & Wu, X. B. (2004). GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(1), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.10.011>
- Pirastu, M., Castellini, M., Giadrossich, F., & Niedda, M. (2013). Comparing the Hydraulic Properties of Forested and Grassed Soils on an Experimental Hillslope in a Mediterranean Environment. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 341–350.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.039>

Plan de desarrollo. (1994). *Diagnostico Ambiental del Municipio de Ibagué - Tolima*.

Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R. I., ... Quevedo, D. I. (2007). Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 4–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4))

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. Retrieved December 10, 2018, from <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>

Ramesh, A. (2013). *Response of Flood Events to land Use and Climate Change. Analysed by hydrological and statistical modeling in Barcelonnette, France*. (Springer D). New York: Springer Dordrecht Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5527-7>

República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico, & Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título C Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000, 22 De Noviembre § (2000). Colombia. Retrieved from http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf

Restrepo, J. C., & Pierini, J. O. (2012). Medición de la concentración de sedimentos en suspensión mediante dispositivos ópticos y acústicos: aplicación en sistemas tropicales (Delta del río Mira, Colombia). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(1), 153–168. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue1-fulltext-15>

Römken, M. J. M., Helming, K., & Prasad, S. N. (2002). Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 46(2–3), 103–123. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00161-8)

Sadeghi, S. H. R., & Mizuyama, T. (2007). Applicability of the modified universal soil loss equation for prediction of sediment yield in Khanmirza watershed, Iran. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 52(5), 1068–1075. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.1068>

Sajikumar, N., & Remya, R. S. (2015). Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of Environmental Management*, 161, 460–468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.041>

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America*, 1578(70), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

Sedano-Cruz, R. K. (2012). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*.

Universidad Politécnica de Valencia.

- Sedano-Cruz, R. K., Carvajal-Escobar, Y., & Ávila, A. J. (2013). Análisis De Aspectos Que Incrementan El Riesgo De Inundaciones En Colombia. *Luna Azul*, (37), 219–238. Retrieved from <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=853>
- Servicio Geológico Colombiano, & MINMINAS. (2016). *Historia geológica de los Andes colombianos en los alrededores de Ibagué*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Sharma, M., & Kumar, R. (2008). GIS-based landslide hazard zonation : a case study from the Parwanoo area , Lesser and Outer Himalaya , H. P., India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), 1990–1992. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0113-2>
- Shi, Z. H., Ai, L., Fang, N. F., & Zhu, H. D. (2012). Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China. *Journal of Hydrology*, 438–439, 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.016>
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275. <https://doi.org/10.1080/15730620500386529>
- Singh, A. K. (2003). *Modelling land use land cover changes using cellular automata in a geo-spatial environment*. International Institute For Geo-Information Science And Earth Observation Enschede, The Netherlands. Retrieved from https://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/anuj.pdf
- Stehr, A., Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F., & Alcayaga, H. (2010). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1963–1977. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1963-2010>
- Suárez, J. (2001). *Control erosión*. (D. E. y de P. U. I. de Santander, Ed.). Bucaramanga. Retrieved from <http://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>
- Superservicios. (2013). *Informe ejecutivo de gestión empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado, IBAL, S.A E.S.P- OFICIAL*. Bogotá D.C. Retrieved from [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%20alcantarillado y aseo/Acueducto y Alcantarillado/2018/Nov/ev.in_ibal201219.05.14.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%20alcantarillado%20y%20aseo/Acueducto%20y%20Alcantarillado/2018/Nov/ev.in_ibal201219.05.14.pdf)
- Szwagrzyk, M., Kaim, D., Price, B., Wypych, A., Grabska, E., & Kozak, J. (2018). Impact of forecasted land use changes on flood risk in the Polish Carpathians. *Natural Hazards*,

- 94(1), 227–240. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3384-y>
- Tan, C. W., Thishalini, A., Goh, E. G., & Edlic, S. (2017). Studies on turbidity in relation to suspended solid, velocity, temperature, Ph, conductivity, colour and time. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(19), 5626–5635.
- Teixeira, E. C., & Caliar, P. C. (2005). Estimation of the concentration of suspended solids in rivers from turbidity measurement: error assessment. In *Symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly* (Vol. 1, pp. 151–160). Foz do Iguaçu: IAHS. Retrieved from https://iahs.info/uploads/dms/13019.23_151-160_S11-32_Teixeira_&_Caliar.pdf
- Temesgenab, B., Mohammeda, M. U., & Korme, T. (2001). Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(9), 665–675. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00065-4)
- The World Bank, & GFDRR. (2010). *Disaster Risk Management in Latin America and the Caribbean Region: GFDRR Country Notes*. Washington, DC 20433, USA. Retrieved from http://www.gfdr.org/sites/gfdr.org/files/DRM_LAC_CountryPrograms.pdf
- Triana, L. F. (2015). *Informe Estudio de Vulnerabilidad Sismica de la Bocatoma del Municipio de Ibagué*. Ibagué, Tolima.
- Turc, L. (1954). Le Bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, 491–595.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12, 13–49.
- UNEP, & UNISDR. (2007). *Environment and disaster risk*. <https://doi.org/DRR10306>
- UNISDR. (2013). *Implementation of the Hyogo Framework for Action: Summary of reports 2007-2013*. Geneva, Switzerland. Retrieved from https://www.preventionweb.net/files/32916_implementationofthehyogoframeworkfo.pdf
- UNISDR. (2017a). *Flood hazard and risk assessment*. Retrieved from <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/57457>
- UNISDR. (2017b). *Landslide Hazard and Risk Assessment*. Retrieved from <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/57442>
- Uromeihy, A., & MahdaviFar, R. (2000). Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(3), 207–213. <https://doi.org/10.1007/s100640050076>

- US Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS 5.0 Reference Manual.pdf. Davis, CA: US Army Corps Of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC). Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 Reference Manual.pdf>
- van Westen, C., Rengers, N., Terlien, M., & Al., E. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS- based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404–414. <https://doi.org/10.1007/s005310050149>
- Vélez, J., Caballero, H., Arango, A., & Smith, R. (2003). Definición de Retiros en Cuencas Urbanas del Valle de Aburrá. *Revista Avances En Recursos Hidráulicos*, 10(65), 7 – 16.
- Vélez, J. J., Puricelli, M., López Unzu, F., & Francés, F. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 229–246. <https://doi.org/10.5194/hess-13-229-2009>
- Wang, J., & Peng, X. guo. (2009). GIS-based landslide hazard zonation model and its application. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1198–1204. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.184>
- Weichselgartner, J. (2001). Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 10(2), 85–95. <https://doi.org/10.1108/09653560110388609>
- Wheater, H., & Evans, E. (2009). Land use, water management and future flood risk. *Land Use Policy*, 26(SUPPL. 1), 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.019>
- Wheater, H. S., Ballard, C., Bulygina, N., McIntyre, N., & Jackson, B. M. (2017). Modelling Environmental Change: Quantification of Impacts of Land Use and Land Management Change on UK Flood Risk. In *System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design* (Vol. 2017, pp. 449–481). Springer-Verlag London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-974-1_22
- Wijesiri, B., Deilami, K., & Goonetilleke, A. (2018). Evaluating the relationship between temporal changes in land use and resulting water quality. *Environmental Pollution*, 234, 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.096>
- Wolman, M. G. (1967). A Cycle of Sedimentation and Erosion in Urban River Channels. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 49(2–4), 385–395. <https://doi.org/10.1080/04353676.1967.11879766>
- Worku, T., Khare, D., & Tripathi, S. K. (2017). Modeling runoff–sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6883-3>

- Wright, H. A., Churchill, F. M., & Stevens, C. (1976). Effect Water Juniper of Yield , Prescribed and in Burning Quality Texas on Sediment, from Dozed Water Central Lands. *Journal of Range Management*, 29(4), 294–298.
- Wu, L., Liu, X., & Ma, X. (2016). Application of a modified distributed-dynamic erosion and sediment yield model in a typical watershed of a hilly and gully region, Chinese Loess Plateau. *Solid Earth*, 7(6), 1577–1590. <https://doi.org/10.5194/se-7-1577-2016>
- Yang, M., Li, X., Hu, Y., & He, X. (2012). Assessing effects of landscape pattern on sediment yield using sediment delivery distributed model and a landscape indicator. *Ecological Indicators*, 22, 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.023>
- Yang, S. Y., Chan, M. H., Chang, C. H., & Hsu, C. T. (2018). A case study of flood risk transfer effect caused by land development in flood-prone lowlands. *Natural Hazards*, 91(3), 863–878. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3130-x>
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann \pm Kendall and Spearman ' s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hidrology*, 259, 254–271.
- Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, 67(June), 558–572. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028>
- Zhang, W., Xu, Y., Wang, Y., & Peng, H. (2014). Modeling Sediment Transport and River Bed Evolution in River System. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(2), 175–179. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2014.V2.117>
- Zope, P. E., Eldho, T. I., & Jothiprakash, V. (2016). Impacts of land use – land cover change and urbanization on flooding : A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena*, 145, 152. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.009>
- Zorn, M., & Komac, B. (2013). Encyclopedia of Natural Hazards. In Bobrowsky P.T. (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. (pp. 3–4). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_120
- Zuo, D., Xu, Z., Yao, W., Jin, S., Xiao, P., & Ran, D. (2016). Science of the Total Environment Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, The, 544, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.060>

Anexo A. Mapas coeficientes de Manning

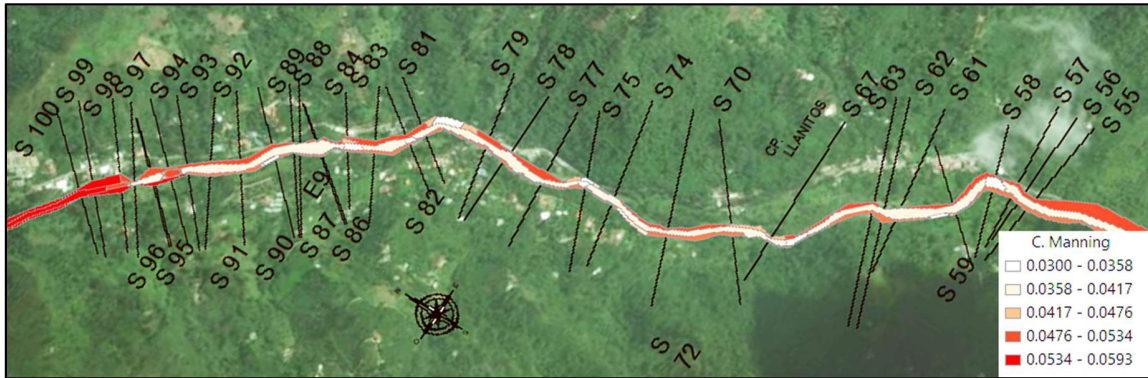


Figura 50. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario 2007

Fuente: Autor.

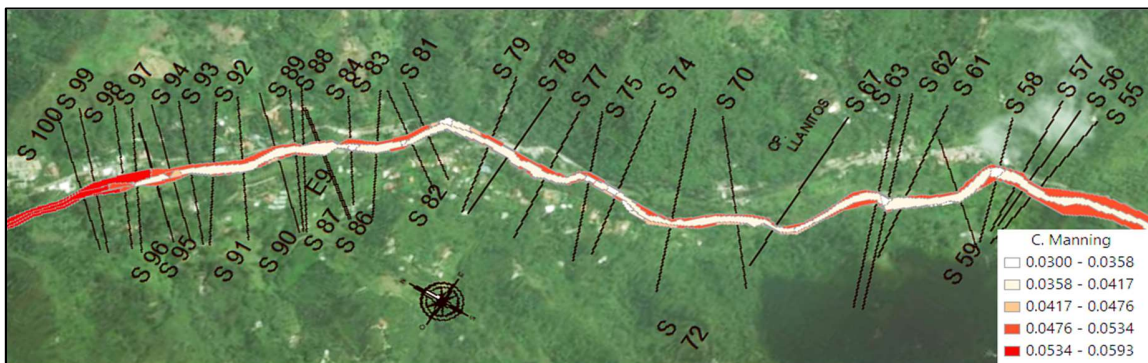


Figura 51. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

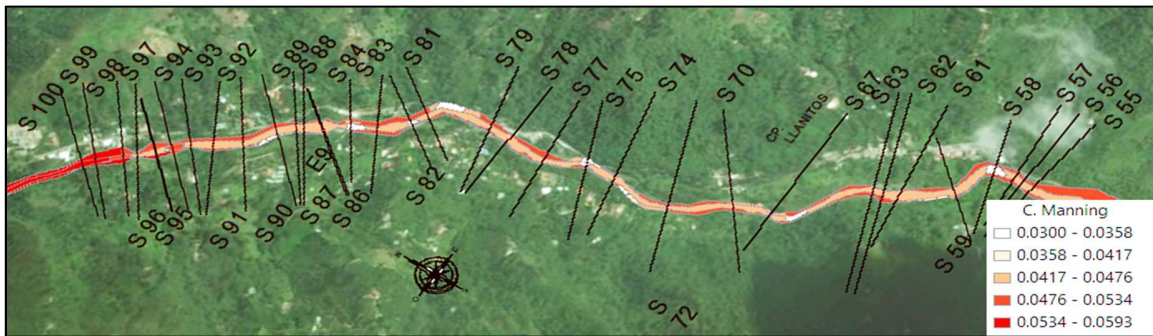


Figura 52. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

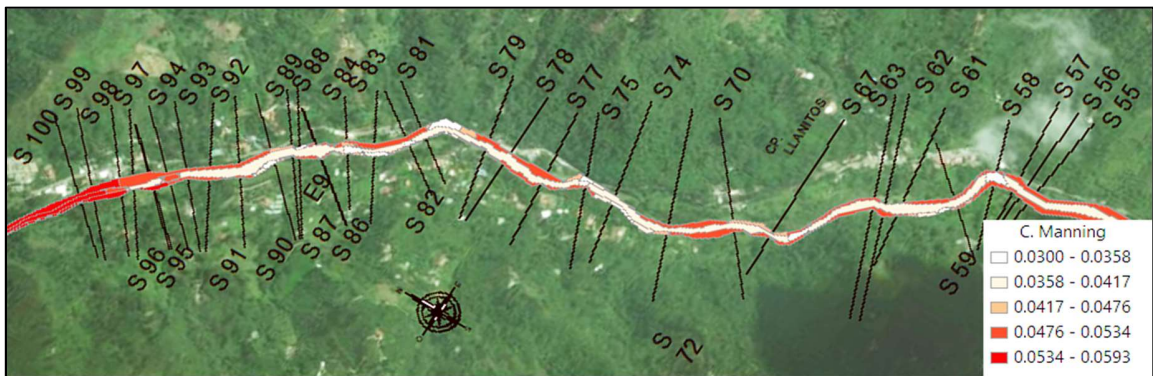


Figura 53. Mapa de coeficientes de Manning secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo B. Mapas profundidad del flujo en escenarios de cambios de uso del suelo

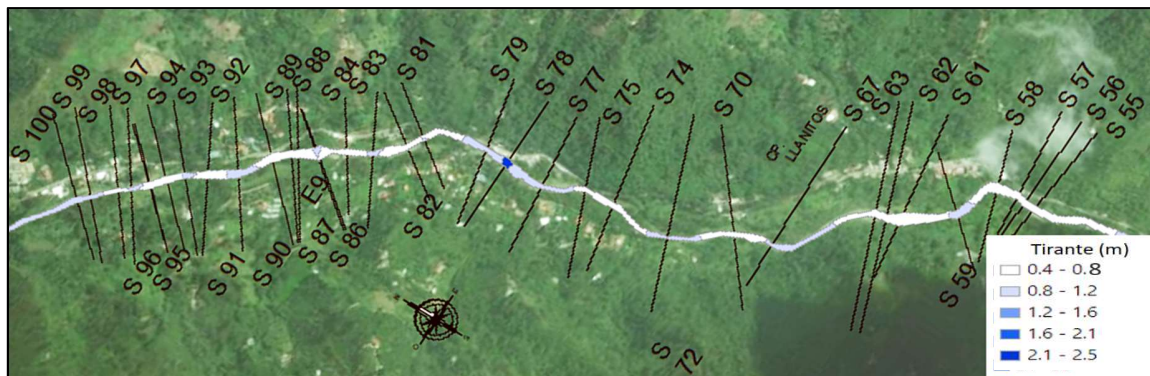


Figura 54. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario 2007

Fuente: Autor.

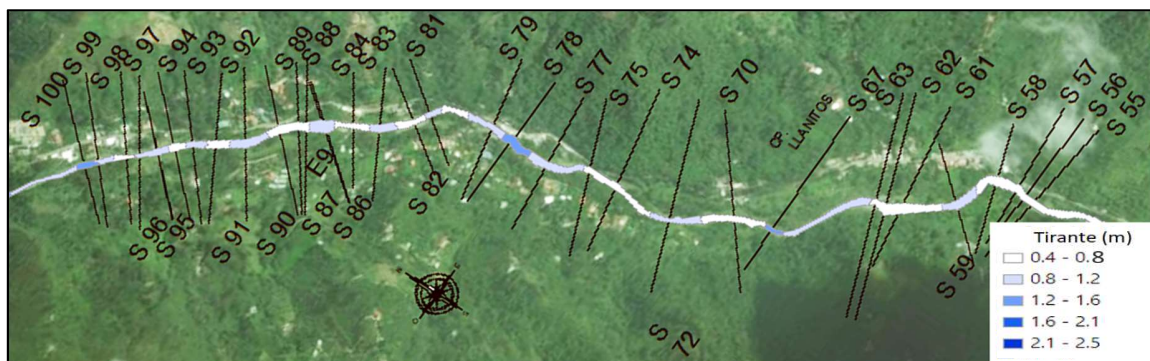


Figura 55. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Pastos

Fuente: Autor.

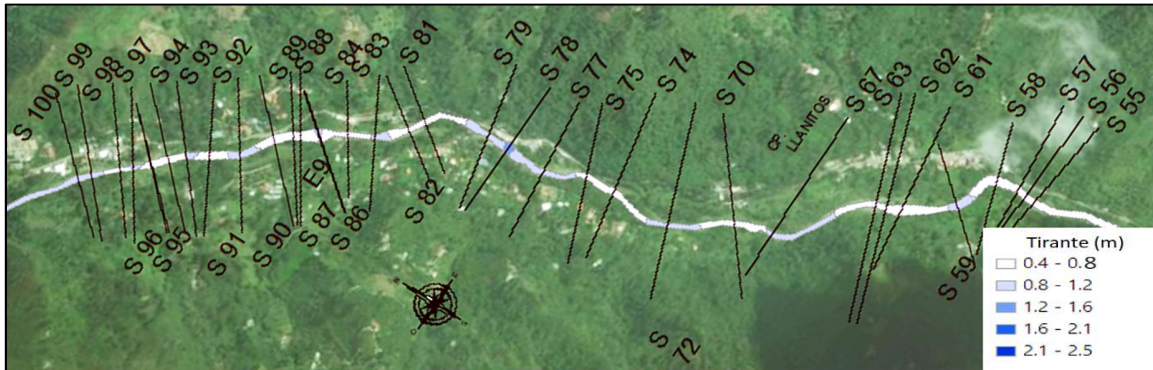


Figura 56. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Cultivos

Fuente: Autor.

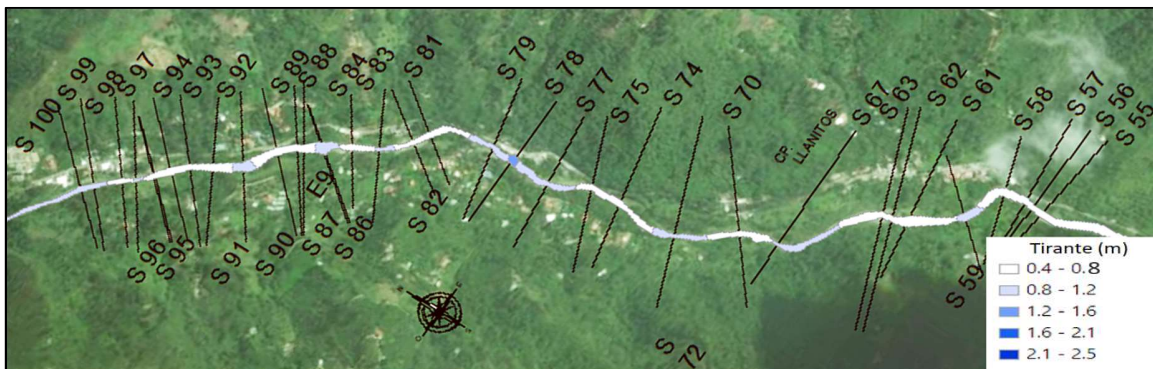


Figura 57. Profundidad de flujo secciones S100 a S 55 en escenario Bosques

Fuente: Autor.

Anexo C. Mapas velocidad del flujo en escenarios de cambios de uso del suelo

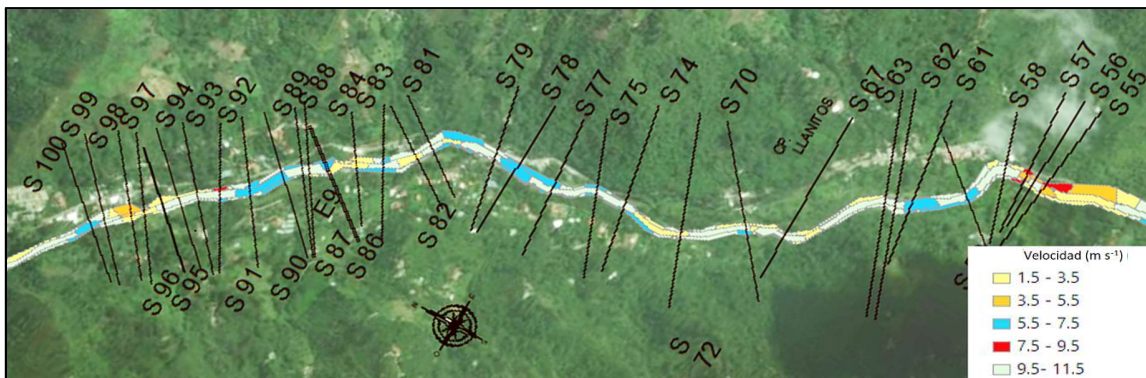


Figura 58. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

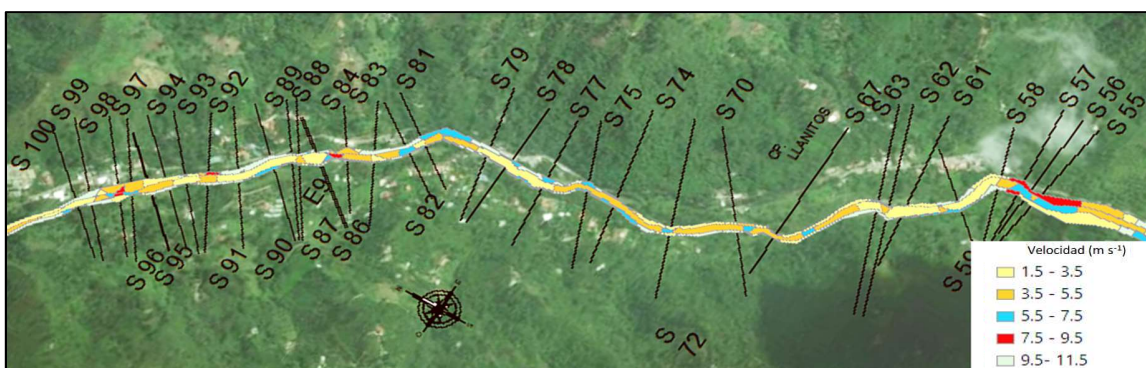


Figura 59. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.



Figura 60. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.



Figura 61. Velocidades en el cauce secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo D. Mapas esfuerzos cortantes en escenarios de cambios de uso del suelo

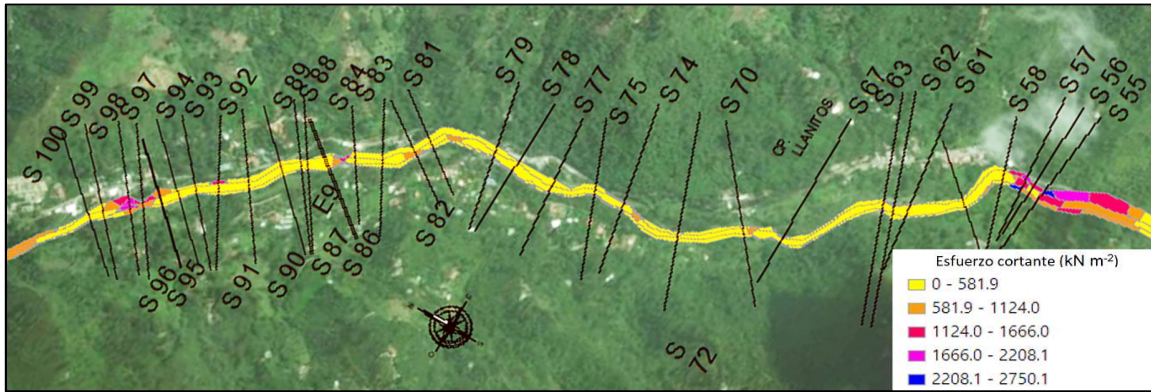


Figura 62. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

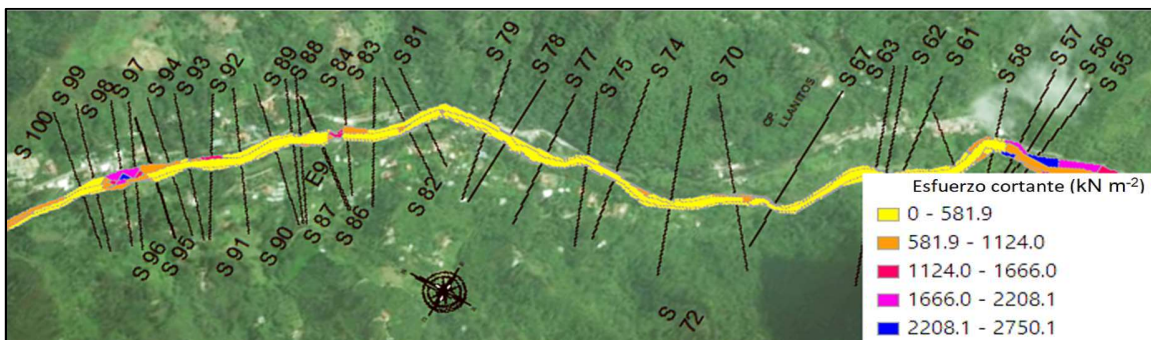


Figura 63. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

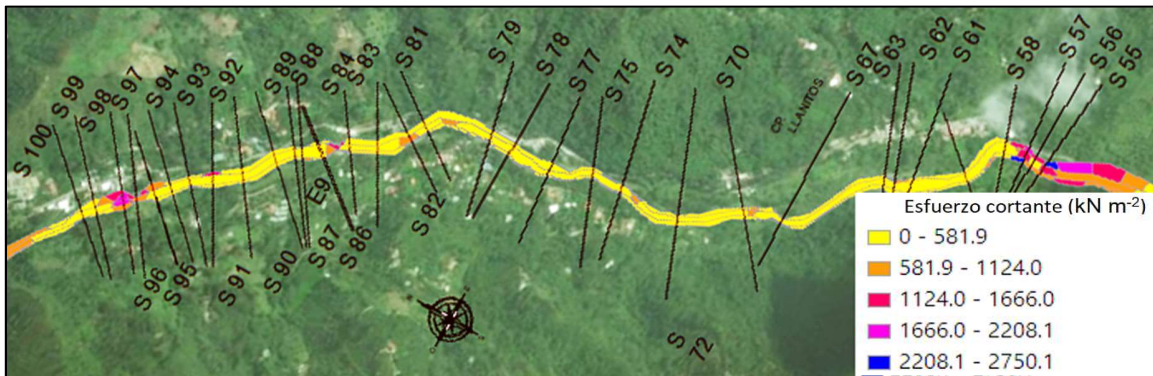


Figura 64. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

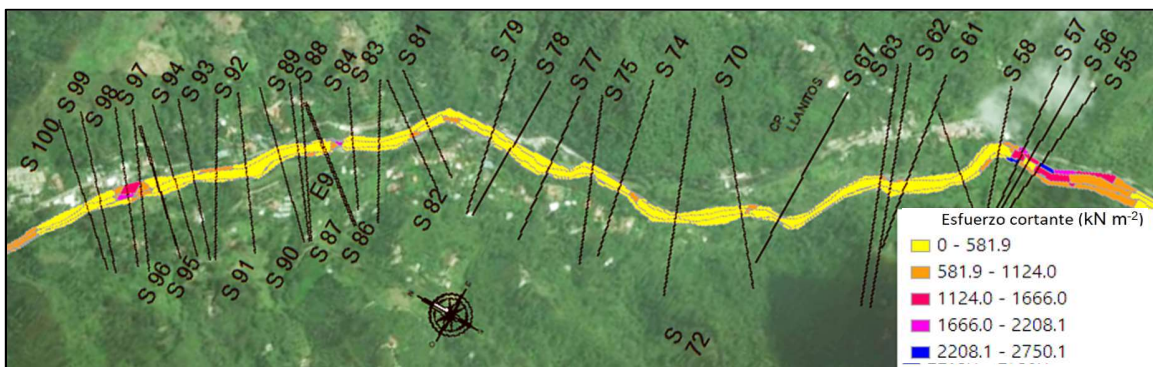


Figura 65. Esfuerzos cortantes en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo E. Mapas Amenaza por crecidas en escenarios de cambios de uso del suelo

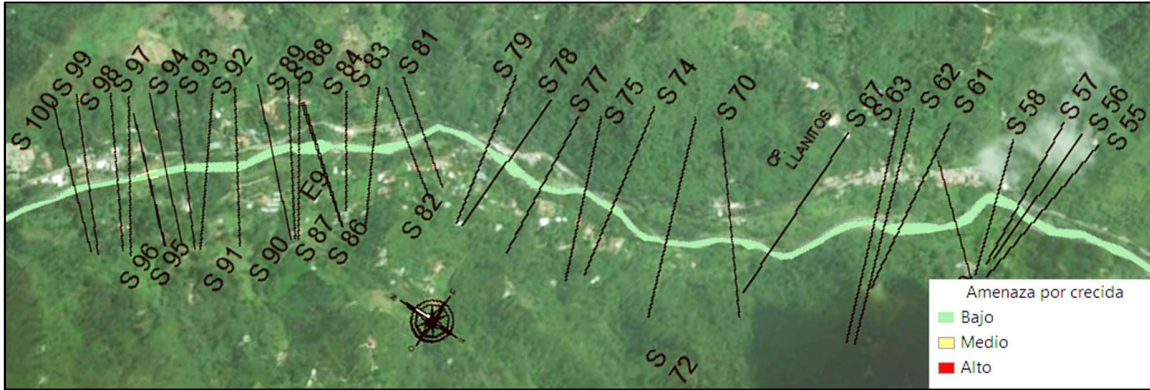


Figura 66. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

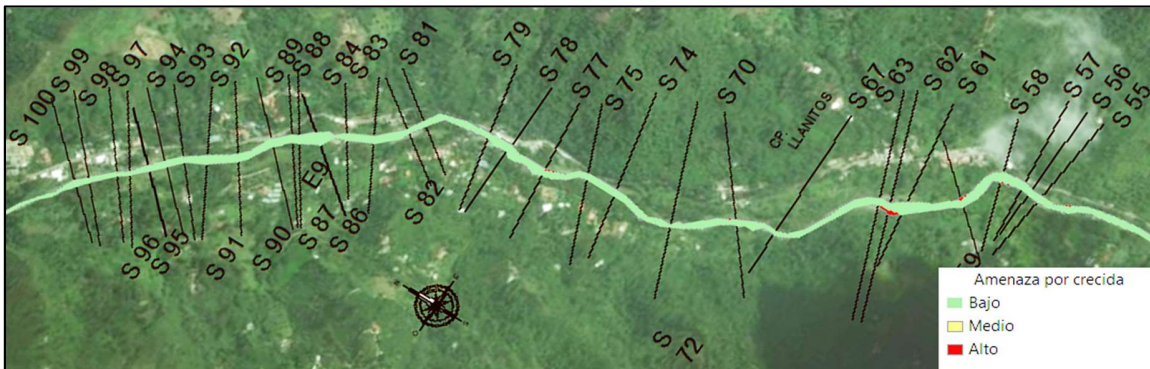


Figura 67. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

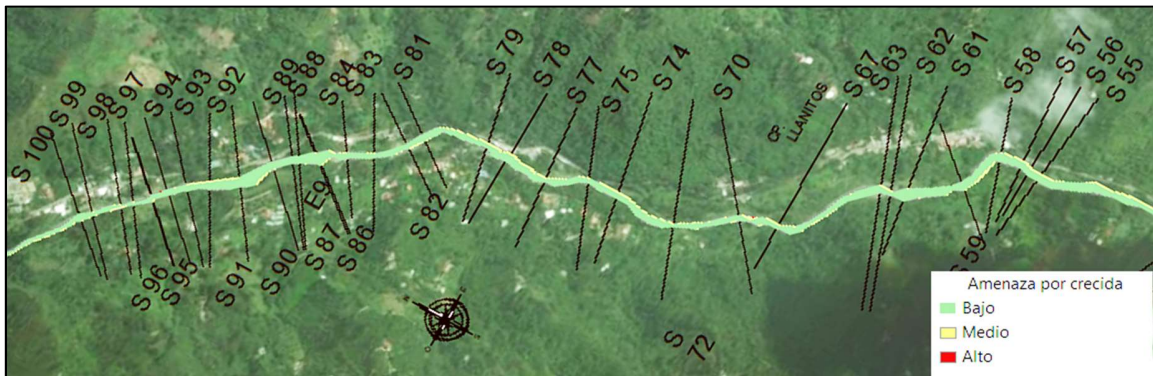


Figura 68. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

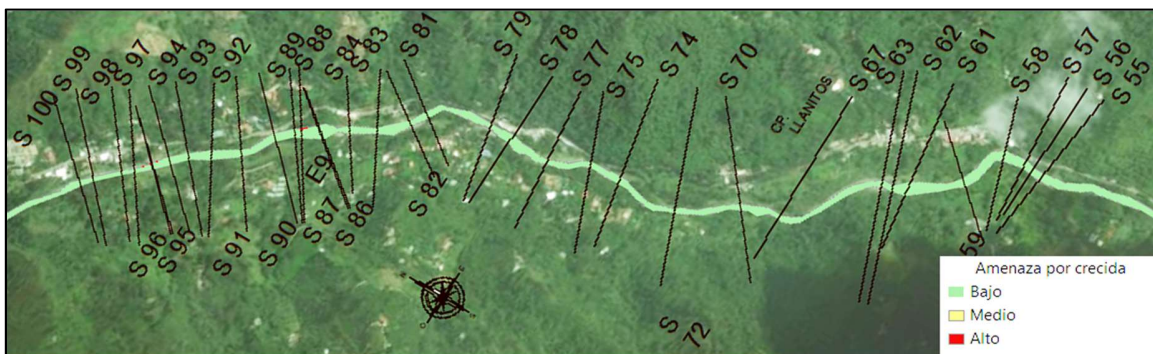


Figura 69. Amenaza por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo F. Mapas Vulnerabilidad física en escenarios de cambios de uso del suelo

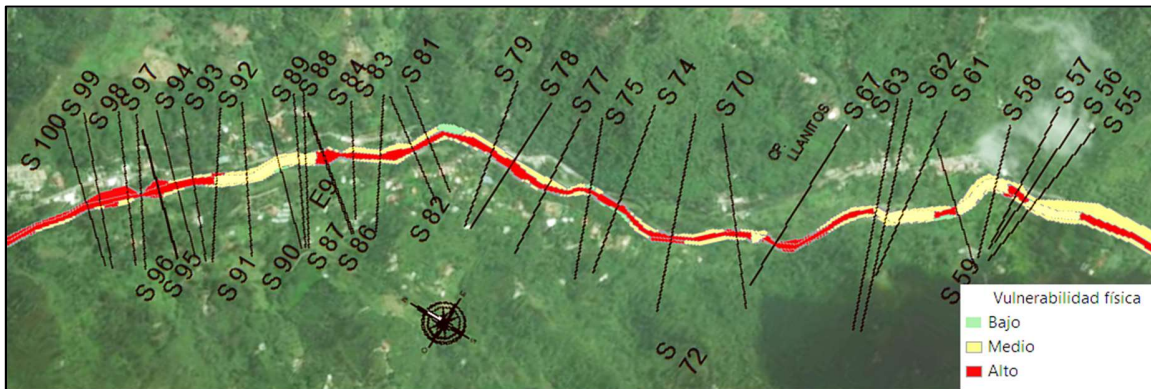


Figura 70. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

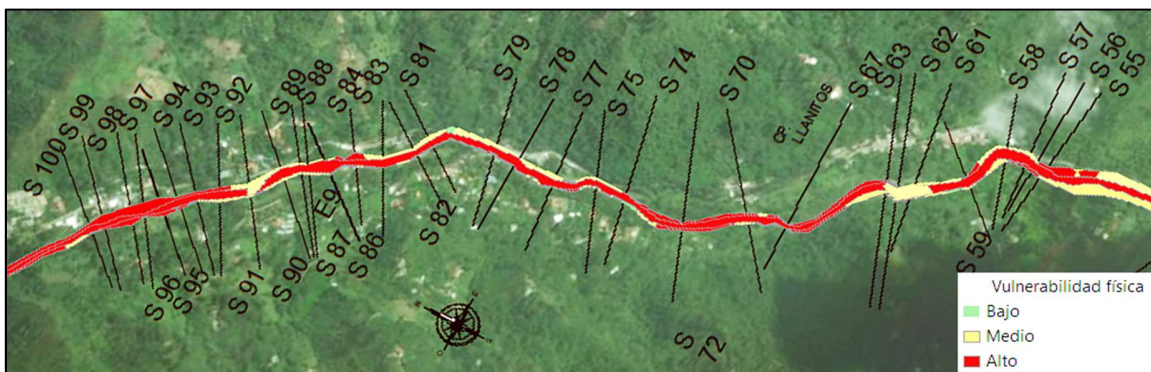


Figura 71. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

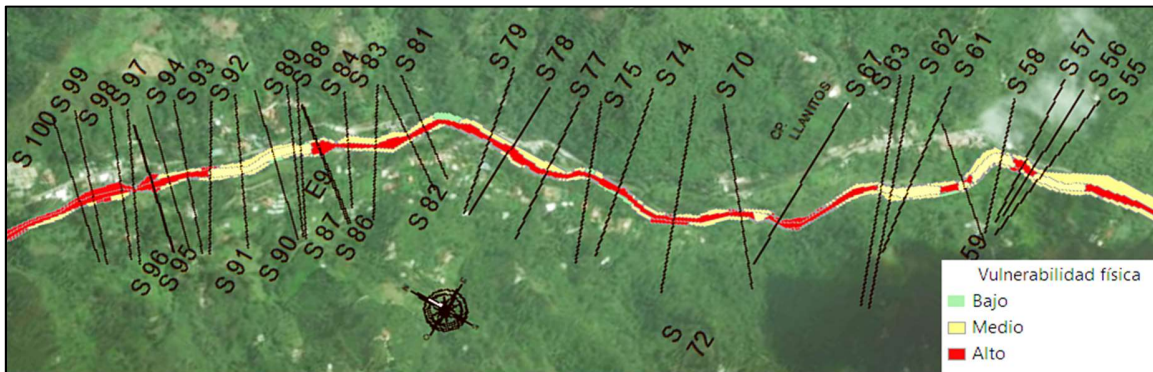


Figura 72. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

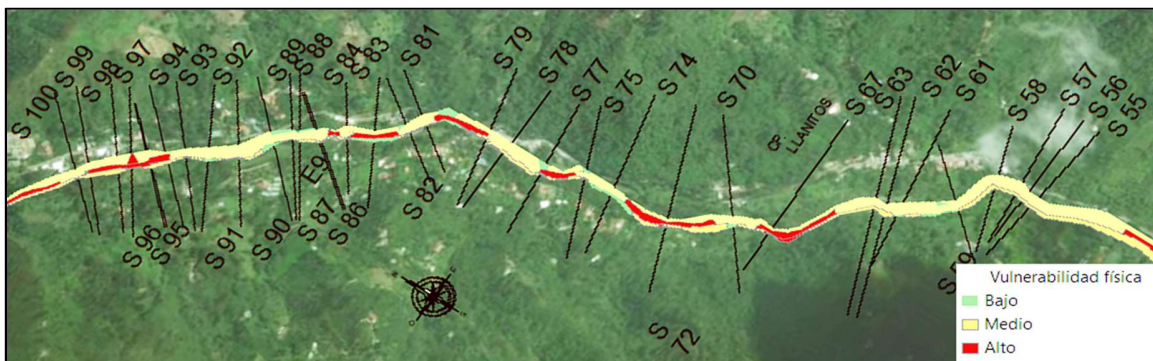


Figura 73. Vulnerabilidad física por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo G. Mapas Vulnerabilidad por desabastecimiento en escenarios de cambios de uso del suelo

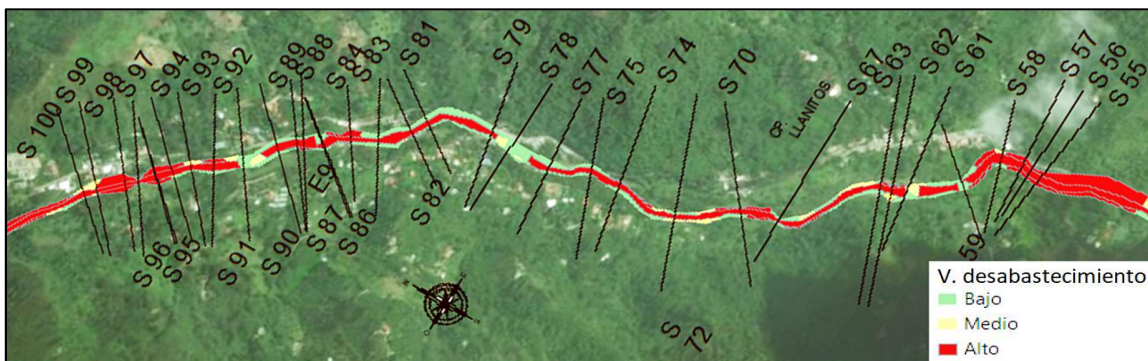


Figura 74. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

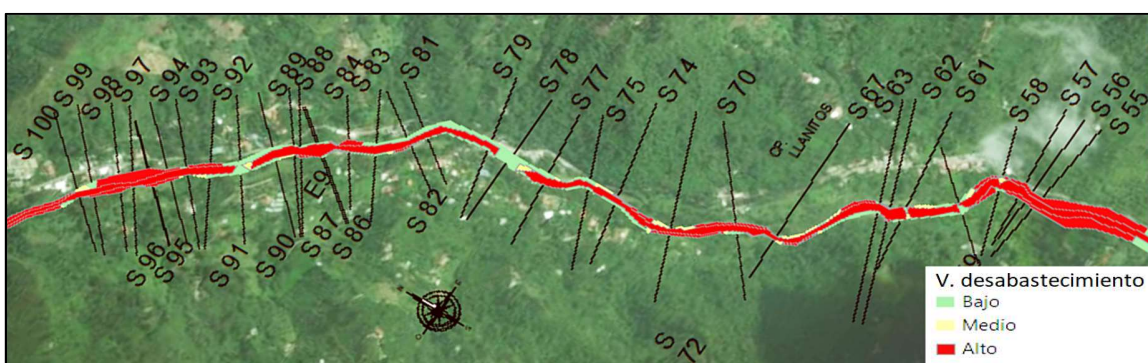


Figura 75. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

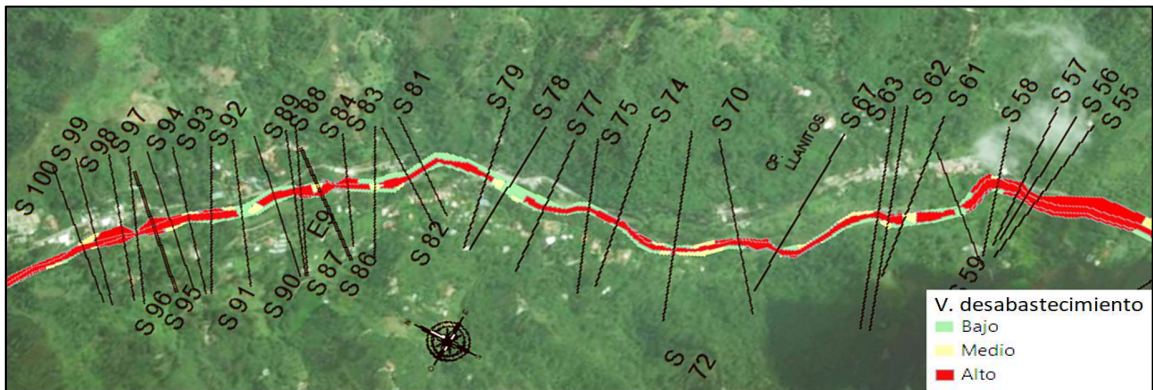


Figura 76. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

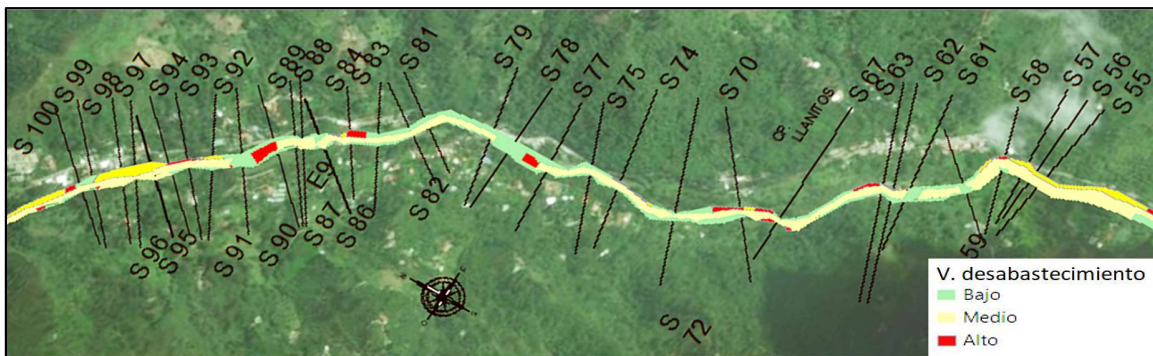


Figura 77. Vulnerabilidad de desabastecimiento en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.

Anexo H. Mapas riesgo de crecidas en escenarios de cambios de uso del suelo

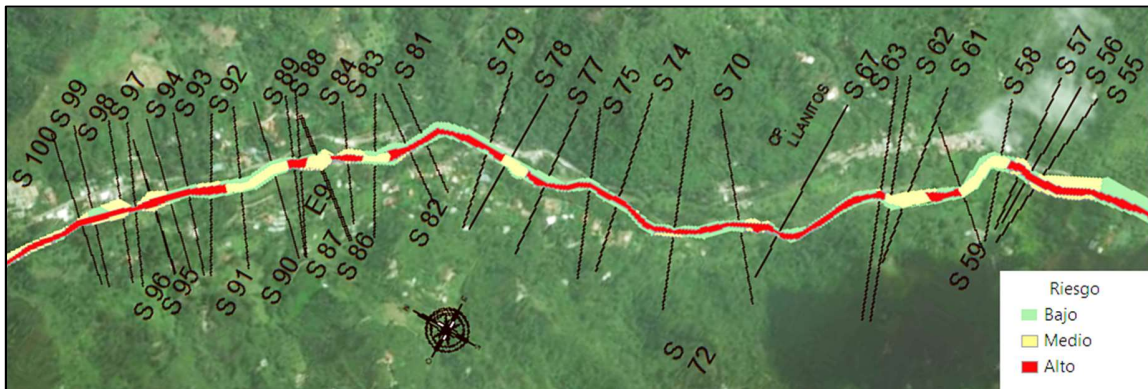


Figura 78. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de 2007

Fuente: Autor.

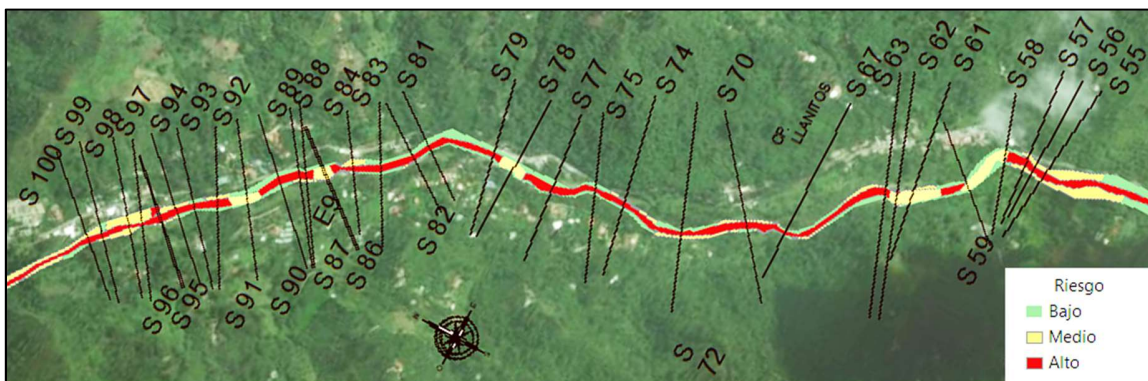


Figura 79. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Pastos

Fuente: Autor.

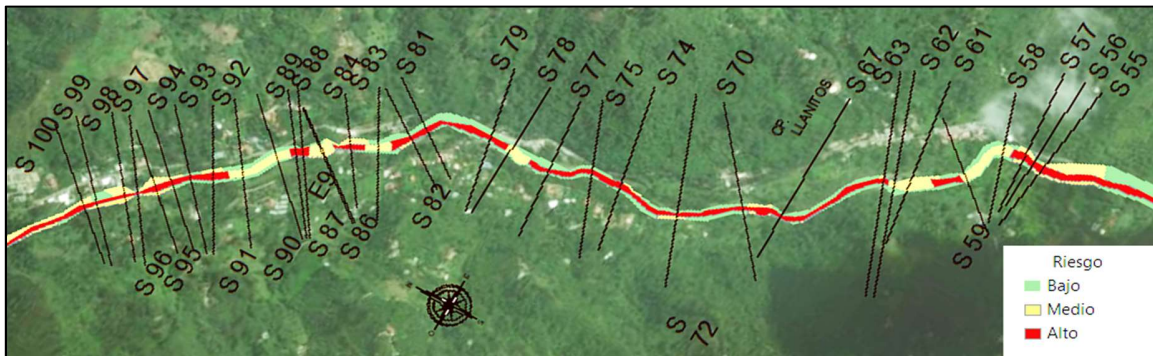


Figura 80. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Cultivos

Fuente: Autor.

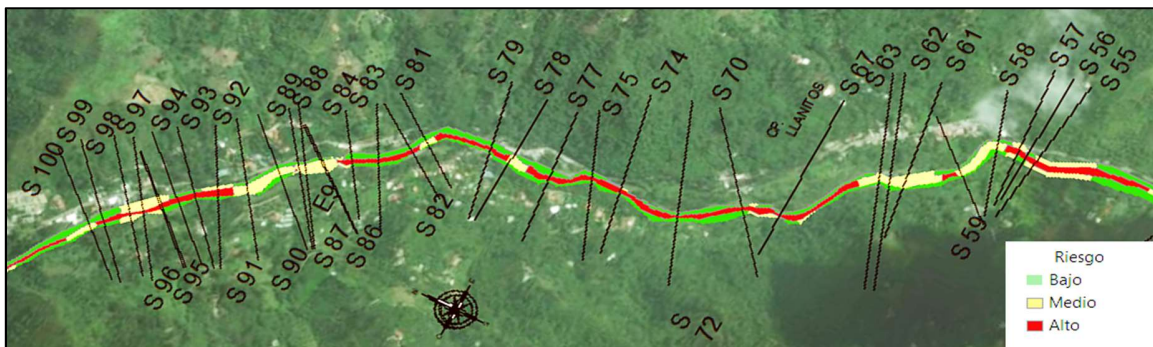


Figura 81. Riesgo por crecida en secciones S100 a S 55 en escenario de Bosques

Fuente: Autor.