

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

SEDE RODRIGO FACIO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

PROYECTO DE GRADUACIÓN

MODELACIÓN Y MAPEO DE FLUJO DE LODOS Y DETRITOS EN LA CUENCA DEL
RÍO ZAPOTE

Trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en

Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Sebastián José Fallas Salazar

2020

“Modelación y mapeo de flujo de lodos y detritos en la cuenca del río Zapote”

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.



Sebastián Fallas Salazar

Candidato



Ing. Alejandra Rojas González, Ph.D

Directora de Tesis



Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D

Miembro del Comité Asesor



Dr. George Govaere Vicaroli, Ph.D

Miembro del Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D

Presidente, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

Al Dios santo, único merecedor de honor y gloria, quien, en su infinita gracia, por medio su Hijo Jesús me ha dado el regalo de salvación y me ha permitido llegar hasta aquí.

“Colosenses 3 23: Hagan lo que hagan, trabajen de buena gana, como para el Señor y no como para nadie en este mundo...”

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano, por este acompañamiento durante mi carrera universitaria, donde me han dado un apoyo incondicional y ser parte fundamental de este proceso.

A la profesora Alejandra Rojas González, quién me ha dado su ayuda y guía en los últimos años de carrera y por poner su confianza en mi persona.

A mis lectores, Georges Govaere y Alberto Serrano, por su guía y ayuda en este proceso de tesis.

A Reiner Sibaja y Alberto Coto, gracias por siempre ofrecerme su ayuda. A Hellen Brenes, Natalia Solano y Eduardo Artavia, quienes compartimos mucho en los últimos años, amigos que me ha dejado la Universidad.

A la Universidad de Costa Rica y la Escuela de Ingeniería de Biosistemas que me brindaron la ayuda para poder participar en el curso de FLO-2D en California, USA.

A Karen O'Brien, soporte técnico del software FLO-2D, quien me brindó mucho de su ayuda para generar buenos resultados.

A las instituciones que brindaron los datos necesarios para el desarrollo de la tesis.

A mis amigos, que estuvieron conmigo atentos durante este proceso de elaboración de tesis.

ÍNDICE GENERAL

Tabla de contenido

Índice de figuras.....	6
Índice de cuadros	8
Resumen.....	10
Capítulo 1. Contexto	12
1.1 Justificación y planteamiento de resolución del problema	12
1.2 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo General.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
Capítulo 2. Antecedentes	18
2.2 Aplicaciones del modelo bidimensional con flujo de detritos.	44
Capítulo 3. Metodología	48
3.1 Modelación hidrológica	51
3.2 Modelación hidráulica	55
Capítulo 4. Resultados	61
4.1 Delimitación de subcuencas y caracterización fisio-climática.....	61
4.2 Características de los suelos y cobertura de la zona	67
4.3 Modelación hidrológica	80
4.3.1 Análisis de la Precipitación.....	83
4.3.2 Comparación hidrológica de los escenarios simulados.....	87
4.4 Modelación hidráulica	92
4.4.1 Análisis agua limpia.....	97
4.4.2 Análisis de flujo de detritos	99
Capítulo 5. Conclusiones	115
Capítulo 6. Recomendaciones.....	119
Anexos.	121
Anexo 1. Distribución granulométrica de las muestras de suelo tomadas en el lugar.	121
Anexo 2. Hidrogramas de salida de la modelación hidrológica en HEC-HMS.....	127
Anexo 3. Pruebas de laboratorio.....	131
Bibliografía.....	149

Índice de figuras

Figura 1. Rastros de un flujo de detritos en una casa de Upala. [5].....	13
Figura 2. Deslizamientos en el Volcán Miravalles provocados por el huracán Otto. [7]	14
Figura 3. Mapa de amenazas naturales de Upala del 2003. [8].....	15
Figura 4. Representación de la curva hipsométrica. [14].....	19
Figura 5. Representación del ciclo hidrológico. [16].....	20
Figura 6. Ejemplo de un hidrograma [20].....	21
Figura 7. Muestra de las variables en el método de NRCS [17].	22
Figura 8. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación de varios fluidos. [30].....	25
Figura 9. Flujo de detritos en California. [40]	28
Figura 10. Diferencia entre flujo de detritos y una avalancha de rocas. [44] [45].....	29
Figura 11. Descripción de cada zona de un flujo de detritos. [46].....	30
Figura 12. Componentes que interactúan en el modelo [51].	33
Figura 13. Curva granulométrica.[59].....	42
Figura 14. Ubicación de la cuenca alta del Río Zapote.....	48
Figura 15. Microcuencas de la Subcuenca Alta del Río Zapote.	61
Figura 16. Mapa de pendientes de la cuenca alta.....	62
Figura 17. Curva hipsométrica de la cuenca.	63
Figura 18. Frecuencia de altitudes de la cuenca.....	64
Figura 19. Temperaturas de la zona de estudio, datos del WorldClim.	66
Figura 20. Vapor de agua, datos del WorldClim.	66
Figura 21. Precipitación promedio de la zona de estudio, datos del WorldClim.	67
Figura 22. Tipos de suelo en la cuenca de estudio.....	68
Figura 23. Mapa de uso de suelo de la zona de estudio.	69
Figura 24. Porcentajes de cobertura de suelo en la zona.....	70
Figura 25. Deslizamientos que afectaron la zona de estudio.	73
Figura 26. Deslizamientos que afectaron de manera directa el cauce del río.	74
Figura 27. Deslizamientos observados desde Bijagua.	75
Figura 28. Deslizamiento del cual se tomó la muestra para el análisis.....	76
Figura 29. Distribución granulométrica del suelo del deslizamiento.....	77
Figura 30. Hietograma del huracán Otto para la estación de Bijagua.....	83
Figura 31. Distribución de la lluvia en Bijagua.	85
Figura 32. Distribución de los puntos del Hydro-Estimator.	87
Figura 33. Gráfico del hidrograma de salida de la cuenca para el huracán Otto con 5 minutos de intervalo.	88
Figura 34. Hidrograma de salida para 100 años de período de retorno.	89
Figura 35. Hidrograma del Hydro-Estimator para el huracán Otto.	90
Figura 36. Área de modelación hidráulica y caudales de entrada.....	93
Figura 37. Cuadrícula de la modelación hidráulica.	94
Figura 38. Comparación con la bibliografía para la selección de n de Manning.....	96
Figura 39. Mapa de valores de N de Manning de zona de modelaje.	97
Figura 40. Ubicación del puente de abril del 2016. [Fuente: Google Earth]	106
Figura 41. Puente en estado actual.....	107

Figura 42. Altura del nivel del agua antes del puente antiguo.	108
Figura 43. Altura del nivel del agua antes del puente actual.	109
Figura 44. Nivel del agua en la casa de máquinas de la central hidroeléctrica.	110
Figura 45. Altura de alrededor 2 m donde testigos dicen que llegó el agua.	110
Figura 46. Alturas en la planicie de inundación donde testigos dicen que llegó el agua.	111
Figura 47. Verificación de zonas de inundación por mapa.	114
Figura 48. Resultados de la prueba granulométrica para la Toma 2 (Planicie de inundación).	121
Figura 49. Resultados de la prueba granulométrica para el Canal 1 (Toma en el canal del río).	121
Figura 50. Resultados de la prueba granulométrica para el Banco 1 (Banco izquierdo aguas abajo en el río).	122
Figura 51. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 20 (Lecho del río a 20 cm de profundidad).	122
Figura 52. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 30 (Lecho del río a 30 cm de profundidad).	123
Figura 53. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 60 (Lecho del río a 20 cm de profundidad).	123
Figura 54. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 20 (Planicie de inundación en la represa a 20 cm de profundidad).	124
Figura 55. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 30 (Planicie de inundación en la represa a 30 cm de profundidad).	124
Figura 56. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 60 (Planicie de inundación en la represa a 60 cm de profundidad).	125
Figura 57. Resultaos de la prueba granulométrica para la Toma 4 (Planicie de inundación).	125
Figura 58. Resultados de la prueba granulométrica para la Toma 3 (Planicie de inundación).	126
Figura 59. Resultados de la prueba granulométrica para el BD2 (Banco derecho aguas abajo).	126
Figura 60. Hidrogramas de salida del Hydro-Estimator.	127
Figura 61. Hidrogramas de salida del huracán Otto.	127
Figura 62. Hidrogramas de salida para 5 años de periodo de retorno.	128
Figura 63. Hidrogramas de salida para 10 años de retorno.	128
Figura 64. Hidrogramas de salida para 25 años de periodo de retorno.	129
Figura 65. Hidrogramas de salida para 50 años de periodo de retorno.	129
Figura 66. Hidrogramas de salida para 100 años de periodo de retorno.	130
Figura 67. Prueba de Bouyoucos para la muestra en el lecho del río a 20 cm.	131
Figura 68. Prueba de Bouyoucos para la muestra BD2.	131
Figura 69. Muestra de suelo de Banco 1 después del último secado en la prueba de granulometría.	132
Figura 70. Separación de muestra en tamiz No. 40.	132
Figura 71. Prueba de límite de Atterberg para la muestra en planicie de inundación de la represa a 60 cm de profundidad.	133
Figura 72. Profundidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.	134
Figura 73. Velocidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.	134
Figura 74. Peligrosidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.	135
Figura 75. Profundidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.	135
Figura 76. Velocidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.	136
Figura 77. Peligrosidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.	136
Figura 78. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.	137

Figura 79. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.....	137
Figura 80. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.	138
Figura 81. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.	138
Figura 82. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.....	139
Figura 83. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.	139
Figura 84. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.	140
Figura 85. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.....	140
Figura 86. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.	141
Figura 87. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.	141
Figura 88. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.....	142
Figura 89. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.	142
Figura 90. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.	143
Figura 91. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.....	143
Figura 92. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.	144
Figura 93. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.	144
Figura 94. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.....	145
Figura 95. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.	145
Figura 96. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.	146
Figura 97. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.....	146
Figura 98. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.	147
Figura 99. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.	147
Figura 100. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.....	148
Figura 101. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.	148

Índice de cuadros

Cuadro 1. Magnitud y movilidad de movimiento de masas [42].	27
Cuadro 2. Concentración de sedimentos para varios tipos de flujos.....	39
Cuadro 3. Fluencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos [60].	40
Cuadro 4. Diámetro de partículas y límites de Atterberg de muestras del programa [61].	41
Cuadro 5. Definición de un evento de agua y detritos según su peligrosidad [63].	44
Cuadro 6. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación.....	57
Cuadro 7. Parámetros de relieve.	65
Cuadro 8. Registro de sismos antes del Huracán Otto. [79]	72
Cuadro 9. Tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad (CU).	79
Cuadro 10. Tiempos de concentración y tiempo de retardo de las subcuencas.	81
Cuadro 11. Períodos de retorno (P.R) para la estación de Bijagua.	84
Cuadro 12. Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos.	91
Cuadro 13. Selección de diferentes n de Manning para el cauce del río ($s/m^{1/3}$).	95
Cuadro 14. Comparación de profundidades de flujo entre agua limpia y concentración de sedimentos. .	104
Cuadro 15. Cambio en las áreas de inundación y en áreas de peligrosidad de los modelos hidráulicos. .	105
Cuadro 16. Resumen de verificación del modelo con visita de campo.....	112
Cuadro 17. Verificación de puntos observables inundados y no inundados por imagen satelital.	114
Cuadro 18. Resumen de resultados para prueba estadística entre concentraciones de sedimento.	149

Cuadro 19. Resumen de resultados para prueba estadística entre el huracán Otto y 100 años de período de retorno..... 149

Resumen

El presente trabajo surgió de la necesidad de desarrollar investigación en un tema poco trabajado en el país como son las inundaciones que se ven agravadas por el material aportado por los deslizamientos en el río, generando un flujo de lodos y detritos. La inestabilidad climática de los últimos años, el aumento de la población y la falta de planes territoriales en el país, han provocado que la población se vea afectada por desastres más intensos, con pérdidas humanas y económicas. Esto, ha hecho que aumente la preocupación por ayudar a la población y generar información de amenazas que se utilicen en los planes de emergencia de las localidades para afrontar mejor estos fenómenos.

El uso de modelos hidráulicos bidimensionales con capacidad de simular flujos concentrados o no newtonianos es necesario y se convierte en una herramienta para generar la información que se necesita para determinar la amenaza o peligrosidad de los flujos de detritos. Anteriormente, en el país se han usado modelos de una dimensión y dos dimensiones con flujo newtoniano, los cuales no pueden simular adecuadamente los cambios en la dirección del flujo en ríos trezados o con meandros y concentraciones volumétricas de sedimentos.

El presente trabajo se desarrolló en la zona de la cuenca alta del Río Zapote en Upala donde se realiza una caracterización fisiogeográfica, una modelación hidrológica utilizando HEC-HMS para obtener los hidrogramas del evento del huracán Otto usando el algoritmo del Hydro-Estimator y la estación meteorológica de Bijagua. Se analizaron los caudales con periodos de retorno de precipitación para 5, 10, 25, 50 y 100 años. Posteriormente, se hizo un análisis de suelos, para obtener la granulometría y los límites plástico y líquido para conocer el tipo de suelo y modelar el flujo de lodos. Finalmente, se realizó la modelación hidráulica bidimensional con

FLO-2D, obteniéndose mapas de velocidad, profundidad de inundación y peligrosidad con diferentes concentraciones de sedimentos.

Se caracterizaron hasta 127 deslizamientos, con un área de 0.96 km² provocados por el Huracán Otto. Se obtuvo que el modelo hidrológico con la información de lluvia del Hydro-Estimator subestima en un 28.61% y 15.67% en el caudal pico y volumen de escurrimiento, respectivamente, con respecto a la estación de Bijagua.

El flujo generado en el huracán Otto se podría calificar que estuvo entre valores de concentración volumétrica de sedimentos (C_v) de 0.45 a 0.55; valores de 0.65 o superiores, ocurrirían con una presencia muy alta de sedimentos, solamente generada por deslizamientos en sitio o avalancha, perdiendo el comportamiento de un flujo de detritos. Se presentaron diferencias de hasta 3.36 metros de altura entre la modelación con un C_v de 0.55 y agua limpia o flujo Newtoniano.

Las alturas de la inundación registradas en campo verifican que la simulación hidráulica del evento de Otto con una concentración volumétrica de 0.45 demuestra que el programa aproximó en buena medida el evento real.

Capítulo 1. Contexto

1.1 Justificación y planteamiento de resolución del problema

Costa Rica es un país que en su relieve predominan las montañas y el cual cuenta con una estación lluviosa que se extiende desde mayo hasta octubre en el Caribe, Zona Norte, Pacífico Norte y Sur y el Valle Occidental, acumulando en la Zona Norte una lluvia promedio de 2.300 mm al año [1]. El huracán Otto ocurrido entre el 21 de noviembre y 26 de noviembre del 2016 ha sido uno de los eventos más extremos registrados en la Zona Norte del país, dejando a su paso gran afectación. El huracán provocó inundaciones en las zonas de Limón, Upala y Guanacaste. Las lluvias en el sector Norte (Pacífico Norte, Zona Norte y Caribe Norte) tuvieron un total entre los 70 mm y los 300 mm, con los mayores acumulados sobre la cordillera de Guanacaste acompañados de deslizamientos importantes. Se registraron afectaciones en infraestructura vial, vivienda, centros educativos, electricidad y telecomunicaciones, distribuciones de agua, diques, cauces de ríos, sector agropecuario y ambiente [2]. El huracán afectó directamente a 10.831 personas, con 10 personas fallecidas, siendo 6 personas de Upala y 4 de Bagaces [3].

El cantón de Upala fue el más afectado ya que no solamente se registraron inundaciones provocados por la lluvia, si no deslizamientos que modifican la concentración de sedimentos en el río incrementando la fuerza destructiva del río y afectando directamente el lugar. Cuatro meses antes del huracán, la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) había alertado acerca de la inestabilidad de los suelos y del peligro de que deslizamientos provocaran un represamiento en los caudales y su rompimiento afectara a los poblados aguas abajo. La CNE informó después del huracán que: “los altos y extremos niveles de precipitación alcanzados en la parte alta de la cuenca del río Zapote, originan un aumento considerable del caudal y una seguidilla de deslizamientos por la saturación del suelo y la pérdida de capacidad de

soporte, que desencadenó así una serie de flujos de lodo y detritos en los ríos contribuyentes del Zapote (Canalete, Bijagua, Higuerón y Zapote), formando una máxima avenida extraordinaria la cual afectó sitios que no poseían un registro histórico de anegamiento y arribo de flujos torrenciales de lodo, escombros y detritos en al menos 350 años” [4].



Figura 1. Rastros de un flujo de detritos en una casa de Upala [5].

Se registró una avalancha que provenía de la pared suroeste del volcán Miravalles y que recorrió más de cuatro kilómetros, dañando 10 viviendas en el distrito de la Fortuna de Bagaces. "En la parte de arriba del Miravalles hubo un deslizamiento, se hizo una presa y eso se vino. Fue algo inesperado, nosotros jamás imaginábamos que se iba a desprender todo ese montón de material de la parte de arriba...", declaró el alcalde de Bagaces. Deslaves parecidos se dieron en la pared este, afectando Pichardo, Bijagua y Quebrada Zapote [6]. En la Figura 2 se pueden observar el rastro de los deslizamientos que pudieron haber provocado estos flujos de lodos y detritos.



Figura 2. Deslizamientos en el Volcán Miravalles provocados por el huracán Otto [7].

La CNE en el 2003 creó un mapa con las amenazas principales que se puede ver en la Figura 3, se puede observar que los principales peligros se dan por ríos que provocan inundaciones y riesgos de avalanchas producto de deslizamientos dados en las montañas. La ciudad de Upala se le conoce como el “valle de inundación fluvial” del río Zapote, llamado así por los geólogos del país. Esto quiere decir que el lugar es altamente peligroso al darse una crecida de este río. En el caso de la parte alta del río Zapote se vislumbraba el efecto de amenaza de avalancha, sin embargo, el área de cobertura era incierta.



Figura 3. Mapa de amenazas naturales de Upala del 2003 [8].

El huracán Otto provocó múltiples deslizamientos en la zona alta de la cuenca del río Zapote, provocando represas naturales que desencadenaron los flujos de detritos. Evidente destrucción del cauce del río y abundante transporte de sedimentos, troncos y piedras provocan que el flujo llegara con más peligrosidad a la llanura. Además, del daño en infraestructura de un puente que comunica a la comunidad de Zapote con Bijagua y en la represa hidroeléctrica de COOPEGUANACASTE. Desde el 2003 ya existían advertencias de inundación en el lugar. Después del deslizamiento el alcalde señaló que “Uno como autoridad tiene que cuidarse de no causar pánico. Se ha tratado de buscar culpables, pero todo lo causó esa avalancha que bajó por el río Zapote, de tantísima lluvia que cayó” [8]. Arroyo en el 2011 [9], menciona que entre el año 2000 y 2006, la provincia de Alajuela sufrió 264 inundaciones y 195 deslizamientos. En Upala ocurrieron casi 30 inundaciones y unos 5 deslizamientos.

En el país se cuentan con muy pocos estudios de flujos de detritos. Jarquín en el 2001 [10], realizaron un ejercicio de modelado unidimensional para flujos de detritos provenientes del Tapezco. Aquí se evaluaron cuatro escenarios de movilizaciones del 100%, 75%, 50% y 10% del volumen de material inestable. Para desarrollar el ejercicio de modelado se utilizó un software unidimensional (1D), llamado Flood Wave (FLDWAV). El problema radicó en las limitaciones de los modelados unidimensionales como son: el no considerar las transferencias laterales de masa y energía dentro del flujo, además la mala calidad en topografía.

Para el modelado bidimensional (2D) se utiliza un modelo de elevación digital (MED) de alta resolución, también conocido como DEM, que describe la topografía en forma cuasi-continua y permite hacer consideraciones que son imposibles con las secciones transversales. Por ejemplo, es posible asumir que el flujo no es perpendicular a la sección, lo que es un requisito de los modelos de flujo unidimensional (1D). El modelado 1D considera un valor único promedio de rugosidad (n) de Manning por sección, mientras el modelado 2D permite estimar un valor (n) de Manning para cada celda del terreno [10]. Igualmente, la información e investigación con la que se cuenta en el tema en el país es limitada, así como en la experiencia en el uso de los programas de modelación con flujos de lodos y detritos. Debido a esto se encuentra la necesidad de ampliar la información útil para ayudar en la toma de decisiones cuando se presentan estos fenómenos.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

1. Simular el flujo de detritos y lodos en la parte alta de la cuenca del río Zapote para el evento del huracán Otto y eventos máximos de tormenta.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar la zona donde se produjeron el flujo de detritos en cuanto a variables físico-geográficas y climatológicas de la zona.
2. Generar un modelo hidrológico para obtener los hidrogramas del huracán Otto y diversos periodos de retorno.
3. Realizar un mapeo de las zonas afectadas por deslizamientos y donde se produjeron los flujos de detritos.
4. Obtener un pronóstico del movimiento de los lodos con un modelo bidimensional para el mapeo de las zonas de riesgo en una subcuenca de la parte alta del río Zapote.

Capítulo 2. Antecedentes

Dada la frecuencia de eventos hidrometeorológicos y al generar un importante impacto social, ambiental y económico, la aplicación de métodos y el estudio del comportamiento de las cuencas desde el punto de vista hidrológico e hidráulico ha sumado importancia en los últimos años. La aplicación de la hidrología, al ser la ciencia que trata las aguas de la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y cómo reaccionan con el ambiente, es primordial en el estudio del comportamiento de las cuencas ante eventos como tormentas y huracanes, entre otros [11].

Las características físicas de una cuenca son de gran importancia en los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca y son concernientes a la red de drenaje y al cauce principal [12]. Estas incluyen el estudio, la clasificación y la descripción de las geoformas del terreno, considerando aspectos geomorfológicos, geológicos, de hidrografía, entre otros [13]. El rol de las características fisiográficas toma importancia cuando se describe la cuenca por medio de curvas, índices y otros parámetros para estudiar su respuesta a las lluvias.

En la Figura 4, se muestran ejemplos de curvas hipsométricas para diferentes cuencas, las cuales son una representación de la relación entre la altitud y la superficie correspondiente a esa altitud, siendo un índice de las características de erosión y su etapa de madurez. La curva A es una cuenca en una etapa juvenil donde los transportes de sedimentos son violentos con posibles deslizamientos y los materiales transportados son gruesos, la curva B presenta una etapa madura y C una etapa de vejez donde el transporte de sedimentos es principalmente de limos y arcillas. Además, otra curva característica es la curva de frecuencia de altitudes. Esta permite observar la distribución en porcentaje de las superficies ocupadas por diferentes altitudes. Con ambas curvas

se pueden obtener características de altitud media, altitud más frecuente y altitud de frecuencia media.

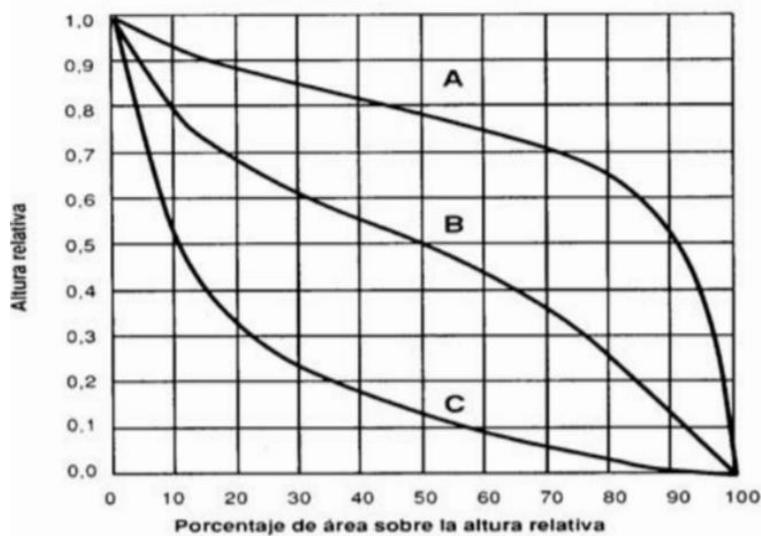


Figura 4. Representación de la curva hipsométrica [14].

Entre los índices geomorfológicos se encuentran el factor de forma, índice de compacidad y el índice de pendiente. Estos índices ayudan a definir propiedades como la tendencia a concentrar las intensidades de la lluvia, la influencia del perímetro y el área en la escorrentía, por ejemplo, las cuencas alargadas reducen las probabilidades de que sean cubiertas totalmente por una tormenta lo que afecta la respuesta de esta en el río. Se puede establecer el tipo de granulometría del cauce y del mismo modo controlar el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, teniendo una importancia directa en relación con la magnitud con las crecidas [15].

En la Figura 5 se puede observar la interacción de aguas superficiales y subterráneas con la atmósfera y la tierra por medio de los procesos de evaporación, infiltración, precipitación, evapotranspiración, entre otros. Este ciclo se define como “una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ella internamente y las produce como salidas” [17]. Los medios que influyen más en el ciclo hidrológico son el agua, el aire y el calor, topografía, la geología y la vegetación, los cuales pueden ser incorporados en el modelaje hidrológico con el fin de simular su comportamiento dentro del ciclo.

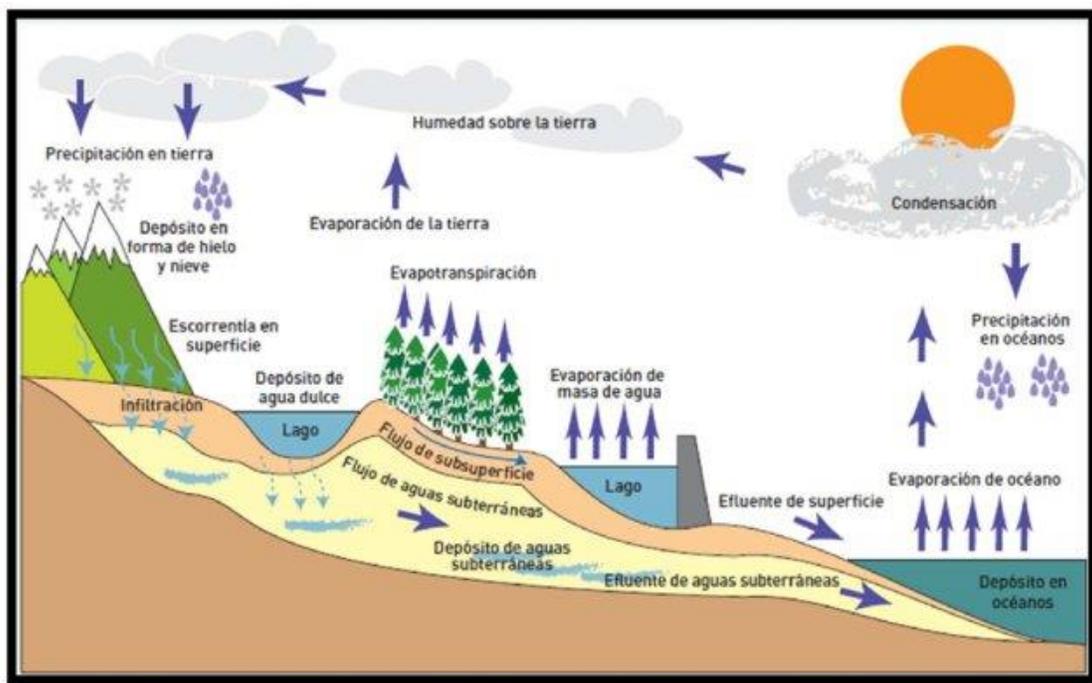


Figura 5. Representación del ciclo hidrológico [16].

En la hidrología, la estadística toma un papel crucial al conocer las frecuencias de intensidades de lluvias permitiendo la mitigación de pérdidas humanas, diseño correcto de estructuras y

debida planificación [18]. Los eventos extremos están inversamente relacionados con su frecuencia de ocurrencia. El objetivo es relacionar la magnitud de estos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad [17].

Como se mencionó anteriormente, todas las características anteriores son importantes conocerlas ya que puede variar la respuesta de una cuenca a la lluvia. En la Figura 6 se puede observar las fases principales de un hidrograma separado por una curva de concentración, el pico del hidrograma, curva de descenso, punto inicio de la curva de agotamiento y la curva de agotamiento. El estudio detallado de lo anterior es importante en la mitigación de inundaciones, su pronóstico y diseño de obras dada las duraciones de escorrentía de cada cuenca [19].

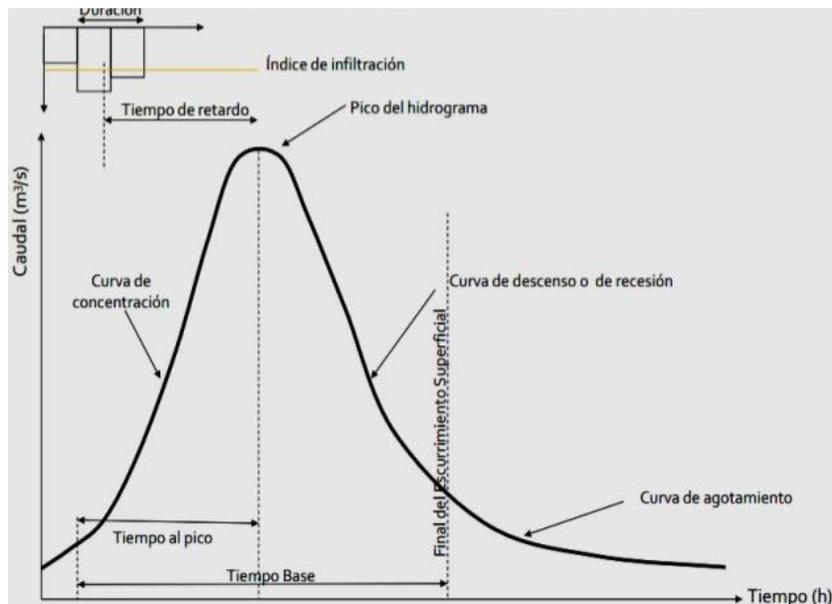


Figura 6. Ejemplo de un hidrograma con cada una de sus fases [20].

Los procesos hidrológicos más importantes para calcular el escurrimiento son las abstracciones, que incluyen la intercepción de la vegetación en el suelo, el almacenamiento en la superficie que se da en las depresiones y el proceso de infiltración de agua en el suelo. [17]. El método más comúnmente usado para el cálculo de las pérdidas es del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de los Estado Unidos creado en el año de 1950. [21, 22, 23]

Para una tormenta, la profundidad de la escorrentía directa P_e siempre es menor o igual a la profundidad de la precipitación P en un intervalo de tiempo, de esta manera, cuando la escorrentía comienza, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a un potencial de retención máxima. En la Figura 7 se muestra como estas interactúan.

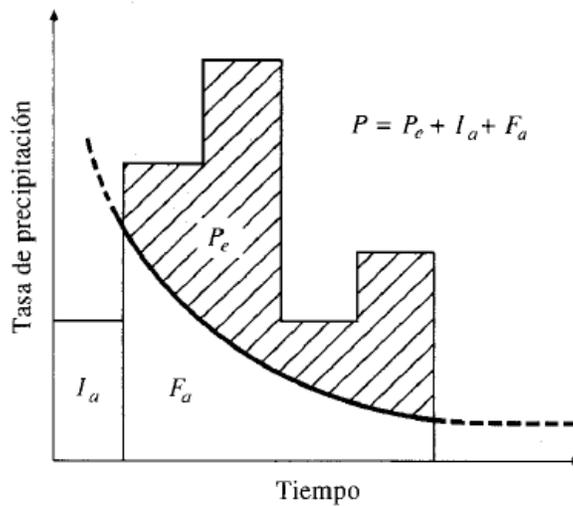


Figura 7. Muestra de las variables en el método de NRCS [17].

Al graficar los datos de P y P_e para distintas cuencas, la NRCS encontró una relación con el número de curva (CN) las cuales están relacionadas a una condición de humedad antecedente, donde se pueden establecer condiciones secas, CN (I); normales CN (II) o condiciones húmedas

o saturadas CN (III). El NRCS relaciona los números de curva en base al tipo de suelo o grupo de suelo y a su uso de suelo o cobertura.

Normalmente, los análisis hidrológicos se realizan cuando existen datos tomados por estaciones meteorológicas. Sin embargo, en algunos lugares remotos no se cuenta con estaciones meteorológicas o datos con los que se puedan realizar esta clase de análisis y es por esta razón, es que se han buscado métodos alternativos donde se pueda obtener datos que no se tienen. Los sensores de microondas visibles, infrarrojos (IR) y pasivos a bordo de plataformas espaciales se han utilizado ampliamente para estimar tanto la precipitación estratiforme como la convectiva para una variedad de aplicaciones, desde escalas climáticas hasta eventos.

Las técnicas visibles y basadas en IR se utilizan ampliamente para representar la intensidad y extensión espacial de fuertes precipitaciones debido a su alta frecuencia (15 min) y alta resolución espacial (~4 km) [24]. El Hydro-Estimator utiliza temperaturas de brillo de canales de ventanas infrarrojas (IR) como base principal para discriminar áreas de lluvia con áreas de no lluvia y para estimar la tasa de esta. Este asigna lluvia solamente a píxeles que son más fríos que el promedio de la nube de píxeles que lo rodea para eliminar nubes de tipo cirro [25].

La herramienta de sistemas de información geográfica (SIG) facilita el estudio de los deslizamientos en zonas de difícil acceso, el mapeo y su ubicación en la subcuenca mediante el uso de imágenes satelitales. Existe amplia información en análisis de susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso del SIG [26]. Dado el número de deslizamientos localizados en la zona de Upala durante el huracán y como estos se observan a simple vista en las montañas aledañas al río Zapote, el mapeo de los deslizamientos es necesario para conocer el área de suelo desplazada y la influencia que estos tienen en los flujos de detritos que afectaron la zona.

El análisis hidrológico es el fundamento para el análisis hidráulico y al no tener un análisis hidrológico adecuado conlleva a un análisis hidráulico erróneo. La modelación hidráulica basa su aplicación en el uso de modelos para replicar las características de flujos y procesos de transporte de fluidos en distintos sistemas para evaluar el desempeño de estructuras hidráulicas, así como el manejo de inundaciones [27, 28], las cuales

Estas características dependen del tipo de fluido con el que se está tratando. Mayormente, investigaciones en fluidos no Newtonianos han sido realizadas por su importancia en diferentes aplicaciones, como, por ejemplo, flujos de detritos [29].

En el caso de los flujos de detritos, Scotto [30] realizó un análisis reológico a distintas muestras de suelo y muestra que la mayoría se comporta como fluido no Newtoniano [31]. En la Figura 8 se puede observar como el fluido no newtoniano muestra diferencia en su tendencia no lineal del esfuerzo cortante con la tasa de deformación. Cualquier fluido que no obedece a la relación newtoniana entre la tensión de cizallamiento y la velocidad de cizallamiento se denomina no newtoniano [31]. En este caso, la pendiente de la curva de esfuerzo cortante versus la velocidad de corte no será constante a medida que cambiemos la velocidad de corte [33].

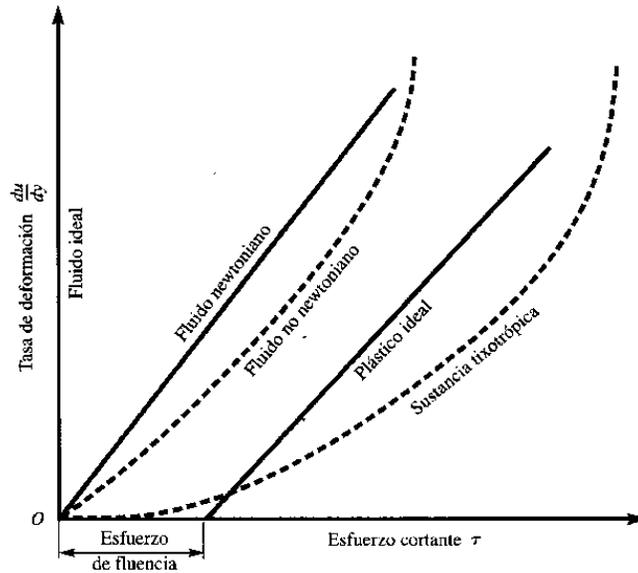


Figura 8. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación de varios fluidos, incluyendo el newtoniano y el no newtoniano [32].

La relación de esfuerzo cortante y la tasa de deformación como la mostrada en la Figura 8 se muestra como:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Donde η es la viscosidad aparente del fluido, τ y $\frac{du}{dy}$ son el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

Comúnmente en la realidad del país, un flujo de detritos se le conoce como cabeza de agua, descrita como una gran cantidad de agua que trae piedras, árboles, barro y destruye todo a su paso. Técnicamente un flujo de detritos se define como un flujo de sedimento y mezcla de agua de una manera como si se tratara de un flujo de fluido continuo impulsado por la gravedad, y logra una gran movilidad desde el espacio vacío ampliado saturado con agua o lechada [34].

Estos flujos son causados principalmente por un deslizamiento grande (de unos millones de metros cúbicos). Cuando la presa temporal se sobrepasa o falla, la masa retenida de agua se libera repentinamente, transportando los materiales sólidos acumulados y removidos del lecho del río [35]. En el caso de estos flujos, el movimiento continúa hasta 3° de pendiente. En un flujo de detritos el coeficiente de fricción disminuye cuando el volumen del sólido aumenta [36].

Algunos de los detonantes para el flujo de lodos es tener áreas con fallas que favorezcan la producción de grandes bloques de rocas, rocas que hayan sufrido un proceso de meteorización, una topografía caracterizada por tener fuertes pendientes en las laderas y cauce de la parte alta de la cuenca, vegetación de raíces poco profundas, una saturación del suelo excesiva y un historial de deslizamientos antiguos en el lugar [37].

Experiencia en el campo muestra que la falla en la capa no consolidada del suelo en respuesta a las fuertes lluvias es la fuente de la mayoría de los flujos de detritos y deslizamientos [38]. Debe tenerse en cuenta que el ángulo de pendiente requerido para desencadenar un flujo puede no ser el mismo que el ángulo de pendiente requerido para mantener la movilidad del flujo en su zona de salida (este continúa hasta 3° de la pendiente). Sin embargo, existe cierta superposición, ya que puede haber un ángulo por encima del cual la socavación agregará más material al flujo en su zona de salida. Se han registrado eventos en pendientes de 26°, 30° y hasta más alta [39]. Otros eventos han registrado pendientes de entre 2% al 32%. En el Monte Thomas, Nueva Zelanda la pendiente del canal varió de 5° a 7°. En Steele Creek, Canadá, la pendiente varió entre 13° y 32° y de 1° a 9° en California [40].

En el cuadro 1, se muestra la magnitud y movilidad de algunos movimientos de masas. Se puede observar la diferencia en las velocidades del movimiento del flujo, donde un flujo de detritos

puede alcanzar los 20 m/s o 70 km/h, con una distancia de arribo de hasta 10 km. Los flujos rápidos comúnmente se dan cuando estos sufren un gran aporte de material debido a deslizamientos, con un comportamiento hidráulico complejo que genera grandes velocidades y lleva consigo un poder destructivo. Los flujos lentos se pueden asociar a fenómenos de reptación y la diferencia se encuentra en que existe una separación en la superficie fácilmente identificable entre el material que se mueve y el subyacente [41].

Cuadro 1. Magnitud y movilidad de movimiento de masas [42].

Fenómeno	Magnitud (m³)	Velocidad (m/s)	Distancia de arribo (km)
Deslizamiento	10-10 ⁶	10 ⁻⁶ -10	<0.3
Flujo de detritos	10 ³ -10 ⁶	0.5-20	0.2-10
Flujo piroclástico	10 ⁴ -10 ¹¹	10-50	<60

En la figura 9 se muestra un flujo de detritos típico a lo largo de una montaña, compuesto por detritos, piedra, lodo y agua en California, dejando una mancha de erosión.



Figura 9. Flujo de detritos a lo largo de una montaña en California [42].

Su desarrollo se da cuando masas de sedimento poco graduadas, agitadas y saturadas de agua, caen precipitadamente por efecto de la gravedad [43]. Fuerzas sólidas y de fluidos juegan un rol importante en su movimiento, lo cual lo distingue de fenómenos como avalanchas de rocas como se observa en la Figura 10, donde la avalancha de rocas (figura derecha) está compuesto por material rocoso de gran tamaño. El criterio más común aplicado para diferenciarlo de deslizamientos es la interacción entre las fuerzas sólidas y fluidas, algunos otros criterios se enfocan en la concentración de sedimentos, distribución del tamaño del grano, fuerzas cortantes, entre otros [44]. Según el sistema norteamericano de clasificación de Varnes menciona que los flujos de detritos contienen suelo con un 20% o más de grava y tamaños gruesos [45].



Figura 10. Diferencia entre flujo de detritos (izquierda) y una avalancha de rocas (derecha) [46] [47].

Los flujos de detritos se mueven en oleadas, sin embargo, un evento puede ser una sola oleada o puede ser una serie de oleadas. En la Figura 11 se muestra la descripción de cada oleada. Estas están caracterizadas por tener un frente de piedras de gran tamaño y un cuerpo de masa fina de detritos licuado. La cola es un flujo turbulento, diluido de agua cargada de sedimento. El crecimiento de las piedras frontales puede llevar a un aumento del nivel del flujo trasero, llevándolo a un incremento del pico de descarga.



Figura 11. Descripción de cada zona de un flujo de detritos [48].

El frente de la ola tiene una longitud de 3-5 m, donde la profundidad y la velocidad son las máximas. La velocidad frontal usualmente es entre 6 y 8 m/s y a veces puede llegar hasta 10 m/s. Una vez que la parte frontal pase, continúa una sección de 10-20 m de largo menos turbulenta y donde la velocidad no varía mucho de la parte frontal. Luego, una sección de entre 30 y 50 m continua, donde la velocidad empieza a decrecer gradualmente. Por último, la última sección con un largo de 50-80 m es un flujo laminar [49].

Teniendo en cuenta los factores externos que involucran un flujo de detritos, sus factores internos determinan finalmente sus características. La viscosidad es una de las propiedades más importantes ya que está directamente relacionada con la velocidad del fluido [50]. Suspensiones de limo y arcilla conteniendo entre un 15 y 45% de volumen de sólidos puede tener viscosidades dinámicas de un orden de 1.5-4 veces en magnitud mayor que la viscosidad del agua. Además, se producen cambios en la densidad, velocidad y capacidad para transportar material [49].

El flujo de suspensiones de arcilla y limo es considerado comúnmente que sea aproximado por el modelo de Bingham sobre los rangos naturales de distribución de tamaño de grano, concentración de sedimento y velocidad de corte. Este modelo se describe con la ecuación (2)

$$\tau = s + \mu_B \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, s es la fluencia, μ_B es la viscosidad de Bingham y $\frac{du}{dy}$ el gradiente de velocidad [48].

El transporte de sedimentos fluvial se da en relación con el proceso de erosión cuando se remueven dichos sedimentos de su lugar original. En un canal, el fluido de agua erosiona el material existente en las orillas o en las bases hasta que el flujo se cargue con el sedimento, hasta una capacidad donde la energía del flujo lo pueda mover.

Cuando la velocidad de un flujo tiende a disminuir, la avalancha desacelera y el espesor de esta aumenta hasta detenerse. Esto ocurre por una disminución en la pendiente, un aumento en el ancho del canal o la presencia de obstáculos que prohíben el paso del flujo. Con cambios en el tamaño del cauce, se pueden producir deposición de partículas más gruesas. El ancho y la pendiente de la zona de deposición determinan el espesor del depósito [41].

Por la complejidad y la fuerza destructiva de estos fenómenos, es necesario su modelación, con el fin de mitigar el impacto en la población humana. La contribución de modelos dinámicos dentro de un análisis cuantitativo es reproducir la distribución del material, su intensidad y la zona de impacto [51]. Es por esta razón que recientemente se han usado modelos que reproduzcan los eventos.

FLO-2D es un software bidimensional de simulación hidráulica capaz de delinear peligros de inundación y simular estas mismas, así como flujos de detritos incorporando los modelos reológicos para mezclas sólido-líquidas [52].

Su método de modelación se basa en una modelación unidimensional en el canal y bidimensional en la planicie de inundación como flujo laminar o flujo en múltiples canales. La rutina de interfaz calcula el intercambio de flujo del canal con el de la llanura de inundación, incluido el flujo de retorno al canal. De manera similar, también se calcula el intercambio de flujo entre las calles y las áreas terrestres. Una vez que el flujo sobrepasa el canal, se dispersará a otros elementos (en 8 direcciones) de la red terrestre en función de la topografía, la rugosidad y las obstrucciones. En la Figura 12, se hace un resumen de los componentes que pueden interactuar en el modelo como el canal, diques, precipitación, flujo de calles, entre otros

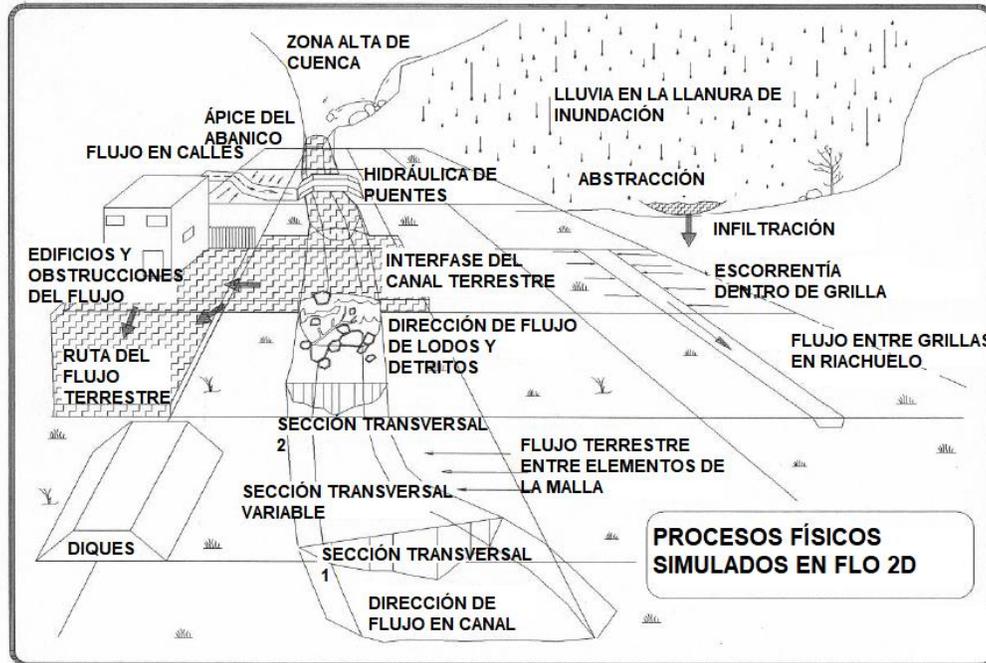


Figura 12. Componentes que interactúan en el modelo [53].

La formulación se basa en las ecuaciones de flujo de canal abierto de profundidad promedio de continuidad e impulso para condiciones inestables desarrolladas en un marco euleriano. La técnica de análisis numérico adoptada es un método de diferencia explícita no lineal [54]. Las fórmulas que dominan el programa son:

La ecuación de continuidad (4):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} V_x + \frac{\partial h}{\partial y} V_y = i \quad (3)$$

Las ecuaciones bidimensionales de cantidad movimiento están dadas por:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (4)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (5)$$

Donde h es la profundidad del flujo. V_x y V_y son las componentes de la velocidad a profundidad media a lo largo de los ejes y y x . La intensidad i puede ser diferente de cero sobre la superficie del flujo. Los componentes de pendiente de fricción S_{fx} y S_{fy} son funciones de la pendiente del canal S_{ox} y S_{oy} , el gradiente de presiones y aceleración convectiva y local.

El modelo reológico de este tipo de flujos envuelve procesos físicos complejos. La cohesión entre sedimentos finos contribuye al comportamiento no Newtoniano del flujo. Esto contribuye al esfuerzo de cedencia τ_y y al cual se debe sobrepasar para iniciar el movimiento [55].

También, se deben considerar los esfuerzos de corte por turbulencia y dispersivos. La ecuación que gobierna los esfuerzos cortantes es:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (6)$$

Donde τ_c es el esfuerzo de fluencia, τ_{mc} es el esfuerzo de corte Mohr-Coulomb, τ_v es el esfuerzo cortante viscoso, τ_t es el esfuerzo cortante turbulante y τ_d es el esfuerzo cortante dispersivo. La expresión 4 puede ser expresada en términos del coeficiente del esfuerzo cortante inercial, viscosidad dinámica y esfuerzo de cedencia. [56].

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y momento en el modelo FLO-2D se resuelve con un esquema numérico central de diferencias finitas. Este algoritmo resuelve la ecuación de impulso para la velocidad de flujo a través del límite del elemento de la cuadrícula, elemento por elemento. El dominio de la solución en el modelo FLO-2D se discretiza en elementos de cuadrícula cuadrados y uniformes [53].

Cada grilla, en resumen, realiza la serie de pasos a continuación para la solución de su método:

1. Se calculan la geometría, la rugosidad y la pendiente del flujo promedio entre dos elementos de la cuadrícula.
2. La profundidad de flujo d para calcular la velocidad a través de un límite de cuadrícula para el siguiente paso de tiempo ($i + 1$) se estima a partir del paso de tiempo anterior i utilizando una estimación lineal (la profundidad promedio entre dos elementos).

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad (7)$$

3. La primera estimación de la velocidad se calcula utilizando la ecuación de onda difusiva. La única variable desconocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad. Este es el caso del flujo por tierra, canal o calle.
4. La velocidad de onda difusora predicha para el paso de tiempo actual se usa como base en la solución de Newton-Raphson para resolver la ecuación de onda dinámica completa. Cabe señalar que para los flujos de sedimentos hiperconcentrados, como los flujos de lodo y detritos, los cálculos de velocidad incluyen los términos de viscosidad y fluencia.
5. La descarga Q a través del límite se calcula multiplicando la velocidad por el área de flujo de la sección transversal. Para el flujo terrestre, el ancho del flujo se ajusta por los factores de reducción de ancho.
6. Se suman las descargas incrementales del paso de tiempo a través de los ocho límites (o elementos de canal ascendente y descendente).

$$Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} = \Delta Q_x^{i+1} \quad (8)$$

Donde Q_n es el caudal de la celda norte, Q_e el caudal de la celda este, Q_s el caudal de la celda sur, Q_o el caudal de la celda oeste, Q_{ne} el caudal de la celda noreste, Q_{so} el caudal de la celda suroeste, Q_{no} el caudal de la celda noroeste y Q_{se} el caudal de la celda sureste. El cambio en el volumen (descarga neta por paso de tiempo) se distribuye sobre el área de almacenamiento disponible dentro de la cuadrícula o elemento del canal para determinar un aumento incremental en la profundidad del flujo.

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{\Delta Q_x^{i+1} \Delta t}{\text{área superficial}} \quad (9)$$

donde ΔQ_x es el cambio neto en la descarga en las ocho direcciones de planicie de inundación para el elemento de cuadrícula para el paso de tiempo Δt entre el tiempo i y $i + 1$.

7. Se comprueban los criterios de estabilidad numérica para la nueva profundidad de flujo del elemento de la cuadrícula. Si se excede alguno de los criterios de estabilidad, el tiempo de simulación se restablece al tiempo anterior, el incremento de paso de tiempo se reduce, todos los cálculos de paso de tiempo anteriores se descartan y los cálculos de velocidad comienzan de nuevo.

8. La simulación avanza con pasos de tiempo crecientes hasta que se exceden los criterios de estabilidad.

Existen varias relaciones importantes de concentración de sedimentos que ayudan a definir la naturaleza de los flujos de sedimentos hiperconcentrados. Estas relacionan la concentración del sedimento por volumen, la concentración del sedimento por peso, la densidad del sedimento, la densidad de la mezcla de flujo de lodo y el factor de carga. Es importante identificar la

concentración del sedimento ya sea como una medida del peso o volumen. La concentración de sedimento en volumen (C_v) viene dada por [32]:

$$C_v = \frac{\text{Volumen de sedimento}}{\text{Volumen de agua} + \text{Volumen de sedimento}} \quad (10)$$

El C_v se encuentra relacionado a la concentración de sedimento por peso C_w por:

$$C_v = \frac{C_w \cdot \gamma}{(\gamma_s - C_w(\gamma_s - \gamma))} \quad (11)$$

donde γ = peso específico del agua y γ_s = peso específico del sedimento. El peso específico de la mezcla de flujo de lodo γ_m es una función de la concentración de sedimento en volumen:

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \quad (12)$$

Finalmente, el volumen de la mezcla total de agua y sedimento en un flujo de lodo se puede determinar multiplicando el volumen de agua por el factor de carga. El factor de volumen es simplemente:

$$BF = 1 / (1 - C_v) \quad (13)$$

El factor de volumen es 2,0 para una concentración de sedimento en volumen del 50%. Una concentración de sedimento del 7% en volumen para un lecho de río convencional y la suspensión da como resultado un factor de carga de 1,075, lo que indica que el volumen de la inundación es un 7,5% mayor que si se considerara que la inundación es solo agua.

Se considera agua “no limpia” cuando la concentración volumétrica de sedimentos es mayor a 20%, donde en los flujos de detritos puede llegar hasta el 45%. Para el movimiento es necesario conocer los parámetros de viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia de la mezcla. En FLO-2D

estos parámetros son una función de C_v [57]. En el cuadro 2 se muestra los distintos C_v para diferentes flujos. Los flujos de lodo no son homogéneos, ni newtonianos, son eventos de inundaciones transitorias cuyas propiedades de fluidos cambian significativamente a medida que fluyen por canales de cuencas abruptas o a través de abanicos aluviales [58].

Cuadro 2. Concentración de sedimentos para varios tipos de flujos.

Descripción de tipo de flujo	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	Volumen (Cv)	Peso (Cw)	
Deslizamientos	0.65 – 0.80	0.83 – 0.91	No hay fluidez; falla por deslizamiento en bloques.
	0.55 - 0.65	0.76 – 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar.
Flujos de lodo	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Avenida de lodo	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se distinguen claramente olas y ondas; todas las partículas descansan en el fondo en condición inmóvil.
Inundación de agua	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Los datos reológicos utilizados para describir la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales del suelo que son capaces de fluir pueden obtenerse de investigaciones de campo con los equipos necesarios. Si estos datos no se tienen disponibles, en el cuadro 3 se muestran datos experimentales de un suelo de las montañas rocosas [59].

Cuadro 3. Fluencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos [60].

Fluencia (τ_y) y viscosidad (η) como una función de la concentración de sedimentos				
Fuente	$\tau_y = ae^{bC_v}$ (dinas/cm ²)		$\eta = ae^{bC_v}$ (poises)	
	a	b	a	b
Datos de campo				
Pozo de Aspen 1	0.181	25.7	0.036	22.1
Pozo de Aspen 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Suelo Natural de Aspen	0.152	18.7	0.00136	28.4
Relleno de mina de Aspen	0.0473	21.1	0.128	12
Cuenca de Aspen	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Zona de Fuente de la mina de Aspen	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1

La elección de los suelos anteriores aplicado en un caso específico se puede aproximar mediante una prueba granulométrica. Estas pruebas permiten conocer cuál es el tamaño de partículas en

una muestra de suelo. Se utilizan métodos como el tamizado y la prueba de Bouyoucos para material fino. El cuadro 4 muestra la granulometría de los suelos anteriores.

Cuadro 4. Diámetro de partículas y límites de Atterberg de muestras del programa [61].

Muestra	Arcilla (%)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	Límite líquido	Índice plástico
Glenwood 1	6.8	0.009	0.023	0.05	-	-
Glenwood 2	3	0.016	0.035	0.061	-	-
Glenwood 3	4.8	0.011	0.025	0.053	-	-
Glenwood 4	7.6	0.001	0.018	0.032	-	-
Pozo de Aspen 1	31.3	0.001	0.011	0.032	0.32	0.11
Relleno de mina de Aspen	27.8	0.001	0.013	0.03	0.24	0.06
Suelo Natural de Aspen	31.6	0.001	0.016	0.039	-	-

En la Figura 13, se muestra una curva granulométrica con sus respectivas divisiones por suelo. Esta está compuesta por el porcentaje de material pasante en los tamices de distintos calibres, además del porcentaje de material muy fino obtenido en la prueba de Bouyoucos.

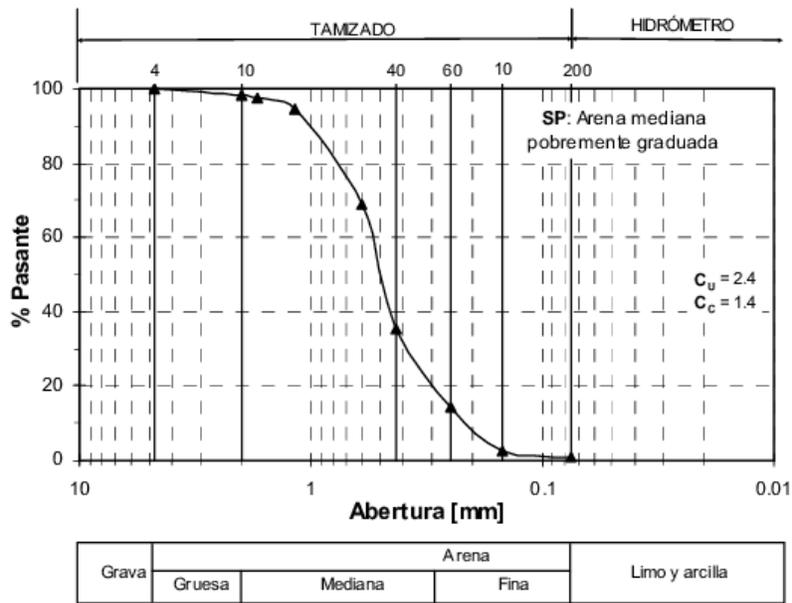


Figura 13. Curva granulométrica típica obtenida a partir de pruebas de granulometría [62].

Las gravas comprenden tamaños superiores a los 5 mm, las arenas entre 5 mm y 0.1 mm y los limos y arcillas entre 0.1 y 0.01. La prueba de límite plástico y líquido permite conocer el grado de plasticidad del suelo mediante el rango de humedades donde el suelo se comporta de manera plástica. La prueba de los límites de Atterberg es utilizada para identificar esta plasticidad, diferenciándola entre suelos muy plásticos, moderados o no plásticos. Límites líquidos menores a 50 e índice plástico mayor a 7 indica un material que posee arcillas. El índice de plasticidad para matrices de sedimentos del flujo de escombros que son mayores al 5% son clasificados como flujos de lodo [40].

FLO-2D realiza mapas de profundidad del flujo en canal y planicie de inundación, velocidad y el producto de ambos es la intensidad de peligrosidad. Esta escala se puede dividir en tres niveles representado por los colores, rojo, anaranjado y amarillo, correspondiente a una amenaza alta, mediana o baja, a continuación, se definen cada uno:

- Rojo (3): Peligrosidad alta. Las personas están en peligro en cualquier lugar que estén, las estructuras están en peligro de ser destruidas.
- Naranja (2): Peligrosidad mediana. Las personas están en peligro por fuera de sus hogares. Las estructuras pueden sufrir daños y pueden ser destruidas dependiendo de las características constructivas.
- Amarillo (1): Peligrosidad baja. Peligro para las personas es muy bajo o casi no existe. Las estructuras van a sufrir pequeños daños, sin embargo, la inundación y sedimentos podrían afectar los interiores de los hogares.

El gobierno suizo mediante la Oficina Federal de Economía (OFEE), Oficina Federal de Ordenamiento Territorial (OFAT) y la Oficina Federal del Ambiente, Bosques y Paisaje (OFEFP) define una metodología para definir la intensidad de la peligrosidad en base a la profundidad máxima del agua, velocidad máxima de la inundación y su producto tanto para flujo de agua limpia y flujo de detritos, según se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Definición de un evento de agua y detritos según su peligrosidad [63].

Definición en un evento de agua			
Intensidad	Profundidad máxima h (m)		Producto de profundidad máxima h y la velocidad máxima v (m²/s)
Alta	$h > 1.5$	O	$v * h > 1.5$
Mediana	$0.5 < h < 1.5$	O	$0.5 < v * h < 1.5$
Baja	$0.1 < h < 0.5$	y	$v * h < 0.5$
Definición en un evento de detritos			
Intensidad	Profundidad máxima h (m)		Producto de profundidad máxima h y la velocidad máxima v (m²/s)
Alta	$h > 1$	O	$v * h > 1$
Mediana	$0.5 < h < 1$	y	$0.2 < v * h < 1$
Baja	$0.1 < h < 0.5$	y	$v * h < 0.2$

La probabilidad está inversamente relacionada con la magnitud de la inundación y la peligrosidad del nivel de inundación está definida como una función combinada de la intensidad del evento y el periodo de retorno [63].

2.2 Aplicaciones del modelo bidimensional con flujo de detritos.

Existen varios tipos de programas que modelan flujo de detritos, sin embargo, no todos son de fácil acceso o comerciales para el público como DAN-3D, Debris-2D, TRENT-2D, AschFlow, GRASS-GIS. Entre los más usados están el FLO-2D y el RAMMS. La información disponible para GRASS-GIS en simulaciones de flujo de detritos es muy limitada.

Morgili [64] menciona que el GRASS-GIS se adecua para la modelación de flujos, mientras que su estructura modular permite la implementación de algoritmos complejos por su soporte de lenguaje de programación C. La modelación de los procesos relacionados con la aparición de flujos de detritos (particularmente la infiltración y la falla de la pendiente) está bastante limitada por los datos disponibles. Las técnicas de modelado existentes para tales procesos parecen

apropiadas en general, pero son sensibles a los datos inciertos. La simulación de procesos dinámicos como el transporte de sedimentos, la propagación de flujos de detritos, el arrastre o las interacciones de los procesos también está limitada por las técnicas de modelado disponibles.

Comparaciones se han realizado entre modelos por ejemplo Cesca [65] realizó una comparación entre el software RAMMS y FLO-2D en las Dolomitas, específicamente en Belluno, Italia. El objetivo fue verificar el desempeño de ambos con la aplicación de un evento con datos observados en campo. El autor concluye que FLO-2D ofrece los mejores resultados, incluso si las variables reológicas, la viscosidad y el esfuerzo de rendimiento junto con la profundidad de retención en la superficie necesitan investigaciones adicionales sobre su importancia física. En las simulaciones con RAMMS todo el volumen sólido de entrada está ubicado en un área restringida y no está distribuido temporalmente como en un hidrograma de entrada de FLO 2D. Por lo tanto, el flujo de detritos liberado llega repentinamente a un canal que es insuficiente para contener toda la descarga. Como consecuencia, los fenómenos de avulsión ocurren a lo largo del canal y generan una propagación lateral mayor que la observada en el campo.

Wu [66] comparó el modelo Debris-2D y FLO-2D para flujo de detritos con gran cantidad de material granular. Entre los resultados obtenidos por el autor, el software Debris-2D fue más preciso en la distribución final y en la profundidad máxima que FLO-2D. La altura máxima por FLO-2D fue de 1.34 m, mientras que la de Debris-2D de 6.53 m, más cercana a la tomada en campo de alrededor 6 m. Esta comparación de softwares solamente es válida para flujos de detritos con una carga alta de material granular. Por lo tanto, para flujos de detritos provocados por deslizamientos, se recomienda usar Debris-2D.

Frekhaug [67] evaluó DAN-3D, RAMMS y FLO-2D en la predicción de flujo de detritos y así obtener cual es la herramienta más eficiente. RAMMS y FLO-2D parecen modelar flujos de detritos de mayor movilidad que DAN-3D, a medida que se observa una mayor dispersión en el área de depósito. Además, la distancia de salida modelada por RAMMS y FLO-2D parece ser más sensible a los cambios de volumen, aunque el efecto en la distancia de salida en general fue bastante pequeño. La difusión restringida de la simulación DAN-3D es quizás más apropiada para flujos de detritos noruegos de tipo granular, mientras que RAMMS y FLO-2D son más adecuados para modelar flujos de detritos más móviles y viscosos. No está claro si las velocidades máximas modeladas por DAN-3D están por encima de las realistas, ya que la evaluación solo se basa en la percepción general. Basándose en el rango de idoneidad elegido, RAMMS modeló velocidades adecuadas, mientras que FLO-2D modeló dos velocidades por debajo del rango. Estas diferencias, tanto en términos de cambios de volumen como de velocidades modeladas, posiblemente se deben al origen del desarrollo del modelo y verifican la hipótesis que indica que las características del sitio de desarrollo afectan los resultados del modelo. Los resultados sugieren que RAMMS y FLO-2D son más aplicables a los flujos de detritos canalizados, mientras que DAN-3D se adapta mejor a los diferentes tipos de flujo de detritos. La facilidad de uso de RAMMS es, en opinión del autor del artículo, muy buena, seguida de DAN3D. En contraste, FLO-2D es demasiado completo, y el modelo probablemente no sea adecuado como herramienta para los operadores noruegos. Sobre la base de esta investigación, parece que ni un modelo numérico ni uno empírico es, por sí solo, una herramienta adecuada a la predicción de flujos.

Moase y Strouth [68] realizaron una comparación directa entre FLO-2D y DAN-3D para flujo de detritos de grano fino. El software DAN-3D provee una estimación razonable del ancho máximo

del flujo a través del abanico, además de estimar la intensidad del impacto que está en el rango basado en el daño a edificios. Sin embargo, la distancia de recorrido del flujo está sobrepredecida. El FLO-2D mostró el área de depósito y la distancia del flujo de manera correcta en comparación del flujo, sin embargo, el espesor del depósito y el comportamiento del flujo no coinciden con los del evento.

Quan et al. [69] usaron el modelo FLO-2D para modelar flujo de detritos en Selvetta, Italia. Los resultados coinciden de buena manera con lo mostrado en los eventos reales. Szu-Hsien y Shih-Chung [70] usaron el software para simular flujo de detritos en las montañas del sureste de Taiwán durante el Tifón Marakot. Las simulaciones realizadas fueron hechas para la prevención de desastres a infraestructura, así como ejercicios de evacuación en las poblaciones que se deben realizar frecuentemente. Lin, Lee y Chang [71] realizaron una simulación en las montañas de Song-Her, Taiwán, luego del Tifón Mindulle. Los resultados finales muestran que el FLO-2D se adecuó de buena manera al flujo de detritos. También, muestran que el coeficiente de rugosidad, concentración de sedimentos y el DEM tienen una fuerte influencia en los resultados finales. Hsu et al. [72], aplicaron el modelo en Hualien, Taiwán, para el Tifón Toaji. El software replicó exitosamente los eventos, mostrando un error aceptable (<15%) en comparación al evento real. Igualmente, muestran que los parámetros de coeficiente de rugosidad, fluencia y la concentración de sedimentos tienen un impacto importante a la hora de realizar las simulaciones. Por la bibliografía disponible que se encuentra del programa, su disponibilidad de uso, además de ser amigable con el usuario, son algunas de las razones por la que se ha elegido darle uso al software FLO-2D.

Capítulo 3. Metodología

La zona de estudio del presente trabajo es una subcuenca hidrográfica que se encuentra ubicada en la cuenca alta del Río Zapote como se muestra en la Figura 14. Esta se ubica en el distrito de Bijagua, cantón de Upala, provincia de Alajuela, rodeada de los cantones de Fortuna y Bagaces. La zona más alta de la subcuenca forma parte del volcán Miravalles y su afluente principal es el Río Zapote aguas arriba de la confluencia con el Río Bijagua.

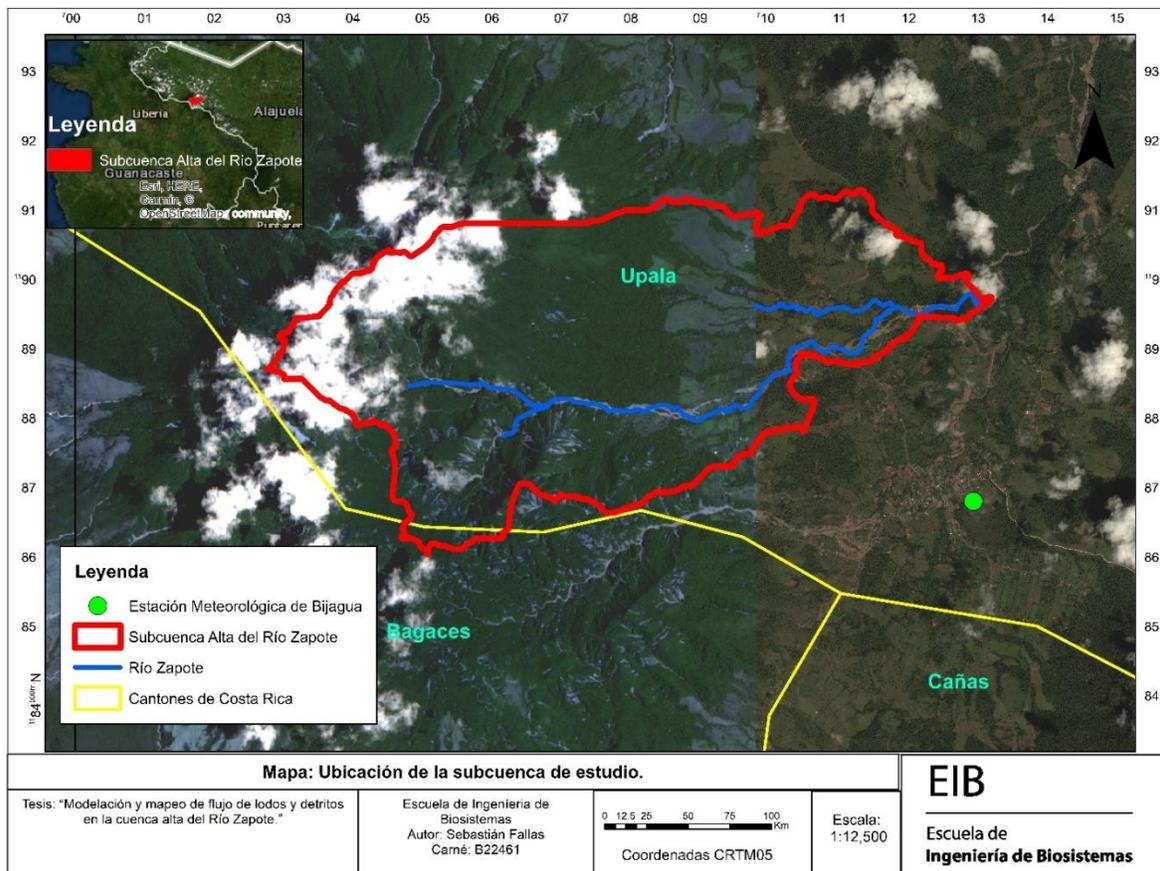


Figura 14. Ubicación de la cuenca alta del Río Zapote.

Para efectos del estudio la subcuenca alta del Río Zapote se dividió en 14 microcuencas utilizando el programa ArcGIS 10.7, mediante la herramienta ArcHydroTools y usando un

modelo de elevación digital de alta resolución. Esta división de las microcuencas se realizó de tal forma que coincidan las descargas con la afectación directa al cauce principal del río con los nodos de entrada para el modelo hidráulico.

La resolución espacial del modelo de elevación digital es de 1 m, creado mediante ArcGIS, proveniente de fotogrametría con resolución de 30 cm. Esta información topográfica fue proporcionada por la CNE y la fotogrametría se realizó con fotos tomadas en febrero del 2017, fecha obtenidas del WorldView3 posterior al evento de Otto.

Con el fin de realizar una descripción completa de la subcuenca se calculan diferentes variables fisiográficas y climáticas del área. Las variables fisiográficas calculadas fueron la curva hipsométrica, frecuencia de altitudes, la densidad de drenaje, el factor de forma, el índice de compacidad, la pendiente del cauce, la altitud media ponderada y el índice de pendiente. Además, la temperatura, precipitación y vapor de agua promedio se obtuvieron de la base de datos del WorldClim [73], la cual comprende datos climatológicos promedio mensuales del periodo de 1970 al 2000 con una resolución espacial de 1 km².

Para el cálculo de la curva hipsométrica y el histograma de frecuencias de altitudes, se estratificó las alturas de la subcuenca cada 100 metros de elevación utilizando el modelo de elevación topográfica, con la herramienta de ArcGIS.

La densidad de drenaje (D_d) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (14)$$

Donde, D_d es la densidad de drenaje, L es la longitud total de las corrientes perennes o intermitentes en km y A es el área de drenaje

El factor de forma (F) se calculó con la fórmula a continuación:

$$F = \frac{B}{L} \quad (15)$$

Donde B es el ancho de la cuenca.

El índice de compacidad (K), se obtuvo con:

$$K = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (16)$$

Donde, P es el perímetro de la cuenca en km.

La pendiente del cauce (S) se calculó mediante la fórmula:

$$S = \left[\frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{S_i^{1/2}}} \right]^2 \quad (17)$$

Donde, L es la longitud del tramo i y S_i es la pendiente del tramo i . Los tramos se subdivieron y se realizó el cálculo correspondiente a cada uno.

La altitud media ponderada (H) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{\sum a_i * c_i}{A} \quad (18)$$

Donde, a_i es el área parcial i de terreno entre curvas de nivel y c_i es la altitud media de cada área parcial entre curvas de nivel.

Por último, el índice (I_p) de pendiente se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$I_p = \sum \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})} * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (19)$$

Donde, a_1, a_2, \dots, a_n son las cotas de las n curvas de nivel consideradas (km), β_i es la fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas $a_i - a_{i-1} = \frac{A_i}{A_t}$ y L longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km).

El rectángulo equivalente se calcula con un lado mayor y un lado menor:

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right) \quad (20)$$

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right) \quad (21)$$

Donde, L es la longitud del lado mayor, l es la longitud del lado menor del rectángulo, K es el índice de Gravelious (compacidad) y A el área de la cuenca.

3.1 Modelación hidrológica

La elaboración del modelo hidrológico requiere de calcular parámetros característicos de las cuencas. Entre estos están el número de curva de escorrentía (CN), el tiempo de concentración y las características de los cauces para realizar el rastreo hidráulico. Para el cálculo de las pérdidas iniciales e infiltración se utilizó el método de abstracciones del NRCS de los Estados Unidos.

Este método utiliza como parámetro principal el CN donde es necesario establecer el tipo de cobertura y el tipo de suelo presentes; y definir las condiciones antecedentes de humedad del suelo.

Para determinar el grupo hidrológico se utilizó el mapa general de suelos de subórdenes de Costa Rica y las muestras de suelo de la Base de Datos de Perfiles de Suelo del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica [75]. Una vez obtenido el grupo hidrológico, se selecciona el tipo de cobertura para elegir el número de curva. Posteriormente con el área para cada CN, se realiza el cálculo para obtener el número de curva ponderado de las microcuencas.

El mapa de uso de suelos se obtuvo en el Proyecto de Investigación N° 340-B7-522 de la Universidad de Costa Rica, el cual clasificó el área en nubes, sombra de nubes, agua, zona urbana, área agrícola, bosque, pastizal y suelo desnudo. Un ajuste manual detallado fue necesario para definir con más detalle las zonas de manera que se logre representar mejor las condiciones de la subcuenca.

Se utilizó el método del NRCS escrito en el TR-55 para el cálculo de los tiempos de concentración [76]. Mediante este método se dividió el tramo más largo de las subcuencas en 3 fases de cálculo de tiempo. La primera fase son los primeros 50 metros donde se genera un flujo laminar, el segundo tramo corresponde desde los 50 metros hasta el inicio del río o quebrada donde el flujo es concentrado; el último tramo es desde el inicio del río hasta la salida de la subcuenca, donde el flujo tiene las características de flujo en canales abiertos y se utiliza la ecuación de Manning. Estos cálculos toman en cuenta la precipitación, rugosidad y pendiente del

área de estudio y la forma del canal. Se seleccionó una n de Manning de 0.035 (fondo pedregoso y bancos con malezas en el río).

Se hizo uso del método de Muskingum-Cunge para el cálculo de tránsito de avenidas ya que presenta la ventaja de combinar métodos hidráulicos con los cálculos de entrada y salida del hidrograma unitario (NRCS en el caso del presente trabajo).

Para la modelación hidrológica se realizaron los siguientes 3 escenarios base con el programa HEC-HMS:

- a) Modelación con precipitación del huracán Otto medido en la estación de Bijagua cada 5 minutos perteneciente al ICE.
- b) Precipitación con un periodo de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años usando la distribución de lluvia del evento de Otto en 24 horas.
- c) Modelación usando la precipitación del Hydro-Estimator.

El primer escenario de la modelación hidrológica corresponde al Huracán Otto utilizando la estación que se encuentra ubicada en Bijagua a unos 5.4 km de la subcuenca alta del Río Zapote. Los registros de lluvia son reportados cada 5 minutos e ingresados al modelo. Con el objetivo de describir la tormenta se acumuló cada intervalo de tiempo de 15, 30, 60, 120, 180, 360 y 1440 minutos para compararlas con el valor máximo de lámina para cada periodo de retorno. Así, se puede observar en que rango posible se encuentran las láminas de lluvia del Huracán Otto de la estación en la primera modelación.

El segundo escenario hidrológico, se basa en obtener la distribución de la lluvia del huracán para 24 horas y una resolución temporal de 5 minutos. Se tomó el intervalo de precipitación donde se acumula la máxima cantidad de lluvia del huracán y con este acumulado se obtiene el porcentaje de lluvia correspondiente a cada intervalo de tiempo del evento. Posteriormente, se multiplica el porcentaje por la lámina de precipitación de diseño para cada intervalo de tiempo de cada periodo de retorno.

Para el cálculo de las precipitaciones de diseño se tomaron los datos de lluvias máximas anuales registradas en los últimos 18 años para duraciones de 5 minutos a 6 horas medidas en la estación meteorológica de Bijagua. En el caso de la duración de 24 horas se contaba con un registro de 28 para el periodo de 1990 al 2018.

Se procesaron las láminas máximas para cada tiempo con los programas Hidroesta y Retorno 2.0 para obtener el análisis de los máximos de lluvia para distintos periodos de retorno y duraciones. Se realizó un análisis estadístico para determinar que distribución se ajusta mejor a los datos obtenidos, esto mediante un análisis de confiabilidad, y una verificación con el programa CUMFREQ. Con esto, se tiene una estimación de las lluvias máximas con duraciones de 5, 15, 30, 60, 120, 180, 360 y 1440 minutos para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Por último, en el tercer escenario se hizo una comparación del Hydro-Estimador, con la lluvia del huracán, para verificar su precisión en comparación con la estación en la localidad. Este es un estimador satelital de precipitación, el cual es útil en lugares que no cuentan con datos de estaciones meteorológicas. Estos datos son tomados cada 15, 30 o 60 minutos, dependiendo de la ubicación. En el caso de Upala, se cuenta con datos de cada 60 minutos.

Se realizó una comparación de los datos horarios de la estación de Bijagua con la modelación del Hydro-Estimator para observar las diferencias en caudal, volumen y tiempo al pico del huracán generadas por ambos estimadores. Para esto, es necesario transformar los datos de la estación que están cada 5 minutos a 1 hora para que los resultados sean comparables entre sí.

3.2 Mapeo de deslizamientos en la subcuenca

Para realizar el objetivo 3 acerca del mapeo de las zonas afectadas por deslizamiento, se usaron dos imágenes satelitales. La primera imagen fue brindada por la Comisión Nacional de Emergencias. La imagen data del 17 de febrero del 2017, presenta una resolución de 30 cm, mientras que la segunda imagen fue obtenida de la base de datos de Copernicus Open Access Hub del 30 de marzo del 2017 a una resolución de 5 m. Se usaron dos imágenes con el fin de obtener las zonas cubiertas por nubes de la primera imagen mencionada.

Se ubicaron las zonas afectadas por deslizamiento y mediante polígonos se dibujó el contorno de la zona de deslizamiento. Se calculó el área afectada total en la cuenca con el fin de calcular el volumen de sedimento generado por los deslizamientos. Para el cálculo de este volumen se asumió la ocurrencia de deslizamientos traslacionales con una relación de profundidad-largo de 0.1-0.5 [74]. Se confirma la información anterior con geólogos de la CNE del tipo de deslizamiento, y que, además, recomienda el uso de una profundidad de 5 m.

3.3 Modelación hidráulica

Para la modelación hidráulica, se hizo uso del programa FLO-2D. El área de modelación se redujo a una zona más pequeña de 9.61 km² para efectos de mejorar los tiempos de modelación, así como no incluir lugares que se sabe que no se inundan gracias a las curvas de nivel.

El FLO-2D utiliza de entrada, el modelo de elevación digital, los hidrogramas obtenidos del HEC-HMS, canales principales y el mapa de valores de n de Manning. Todo esto se realizó en un mallado de 5 m de resolución.

El valor de n de Manning se obtuvo mediante el mapa de uso de suelo mencionado en la sección anterior y se asignó valores para cada clasificación de cobertura representado en la planicie de inundación. Para el canal se obtuvo los valores mediante la ecuación 25 y el cuadro 6.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)n_5 \quad (25)$$

Donde cada subíndice se obtiene del siguiente cuadro [19]:

Cuadro 6. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación.

Condiciones del canal		Valores (m/s^3)	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderada		0.010
	Severo		0.02
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos de los meandros	Menor	n_5	1.00
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Para la creación del canal, se utilizó el programa Civil3D para elaborar las secciones transversales. Una vez creadas las secciones transversales, se exportó a HEC-RAS para obtener las curvas de descarga de posibles estructuras hidráulicas en la zona, además para exportar el canal a FLO-2D. Este proceso fue realizado, sin embargo, después de algunas corridas del modelo se determinó que la calidad de la topografía hace que el canal no sea necesario y toda el área se modele como planicie de inundación, afirmándose la aseveración realizada en el manual de FLO-2D, la cual indica que, en casos de ríos con un cauce poco definido o trezado, no se recomienda el uso del canal.

Se plantearon 2 escenarios para la simulación hidráulica con diferentes concentraciones de sedimentos volumétricas para cada uno. El primer escenario utilizó el hidrograma calculado del modelo hidrológico con el evento del huracán Otto y el otro escenario utiliza el hidrograma para un evento de un periodo de retorno de 100 años y 24 horas. Cada uno de estos escenarios se modelaron para condiciones de agua limpia o flujo Newtoniano y para flujo no Newtoniano o simulación de detritos usando 4 concentraciones de sedimentos diferentes (0.3, 0.45, 0.55 y 0.65) con el fin de comparar su comportamiento con el agua limpia

Según el Cuadro 3, las concentraciones de sedimentos volumétricas de 0.3 a 0.65 tienen un comportamiento de avenida de lodos y flujo de lodos y la concentración de 0.65 se utiliza para verificar su comportamiento en estado de deslizamiento.

Se realizaron dos giras a la zona de estudio con el fin de conocer el lugar y tomar muestras de suelo y puntos de verificación de inundación. La primera se realizó el 18 y 19 de diciembre del 2018, donde se hizo un reconocimiento de la zona, posibles ubicaciones de puntos de toma de muestras de suelo y entrevistas con personas para la validación del modelo. La segunda gira se

realizó del 20 al 22 de febrero del 2019, en la cual se tomaron las muestras de suelo y se recolectó información de alturas donde llegó el flujo el día de la inundación en lugares como la represa, el puente que comunica Zapote con Bijagua y una casa ubicada en Zapote. Por último, se tomaron varias secciones transversales del río para verificar las secciones transversales actuales con las extraídas del Modelo de Elevación Digital.

Con el fin de caracterizar el tipo de material que pudo desprenderse durante el evento, se tomaron muestras de suelo en distintos puntos a través del cauce del río y cerca de los deslizamientos cercanos a la margen del río. Se tomaron muestras de los bancos, cauce, lecho y posible zona con depósitos de lodos del huracán (ubicada en la represa de toma de CoopeGuanacaste) y se realizó la prueba de granulometría a las muestras tomadas, siguiendo la guía del ASTM D422. En el Anexo 3, en la Figura 67 y 68 se puede observar la prueba de Bouyoucos realizada a dos muestras obtenidas del suelo de la zona de estudio, en la Figura 69 la muestra “Banco 1” seca posterior a las pruebas de tamizado y en la Figura 70 material retenido en el tamiz No.40.

Se obtuvieron las curvas de distribución granulométrica para conocer, cómo el suelo varía en su tamaño de partícula. Se determinó el grado del suelo con los diámetros D10, D30, D60 y D80, además de obtener el Coeficiente de Uniformidad (CU).

Con los resultados de la prueba granulométrica, se obtiene un valor promedio de la zona, para realizar una comparación entre este y los valores teóricos recomendados. Esto define el tipo de suelo que se modelará en el programa.

La prueba de plasticidad, límite líquido y límite plástico se realizaron usando el estándar ASTM D4319 en el Laboratorio de Agua, Suelos y Ambiente de la Escuela de Ingeniería en

Biosistemas. En el Anexo 3, Figura 71 se puede observar una muestra de resultado de la prueba de límite líquido utilizando el equipo Casagrande.

Se ingresaron 14 caudales al modelo hidráulico, 1 por cada microcuenca y se definieron varios nodos de salida al final del modelo ya que es el único lugar por donde el agua puede evacuar gracias a la topografía. El área de la modelación se redujo para efectos de optimización del tiempo de cada corrida.

Una vez obtenidas las modelaciones correspondientes, se realizaron mapas de la profundidad del agua, velocidad del flujo y un mapa de peligrosidad o amenaza para la zona. Se realizó un ANOVA para observar las diferencias entre los modelos de agua limpia con los que contienen sedimentos para resaltar la importancia de la inclusión de flujo de lodos y detritos en las zonas con riesgo a deslizamientos potenciales con el fin de alertar a la población localizada en las márgenes de los ríos o planicies de inundación.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Delimitación de subcuencas y caracterización físico-climática

Al realizar el proceso de delimitación de las microcuencas estas se dividieron de manera que la entrada de los caudales en el modelo hidráulico fueran sitios representativos del río y que estuvieran relacionadas mediante las curvas de nivel de la zona. El área total de la subcuenca Alta del río Zapote tiene 30.06 km² y se dividió en 14 microcuencas. Esta división se muestra en la Figura 15 con áreas de drenaje que van desde los 0.36 km² hasta los 3.44 km². En las subcuencas las alturas varían desde los 363.77 msnm hasta los 1989.06 msnm.

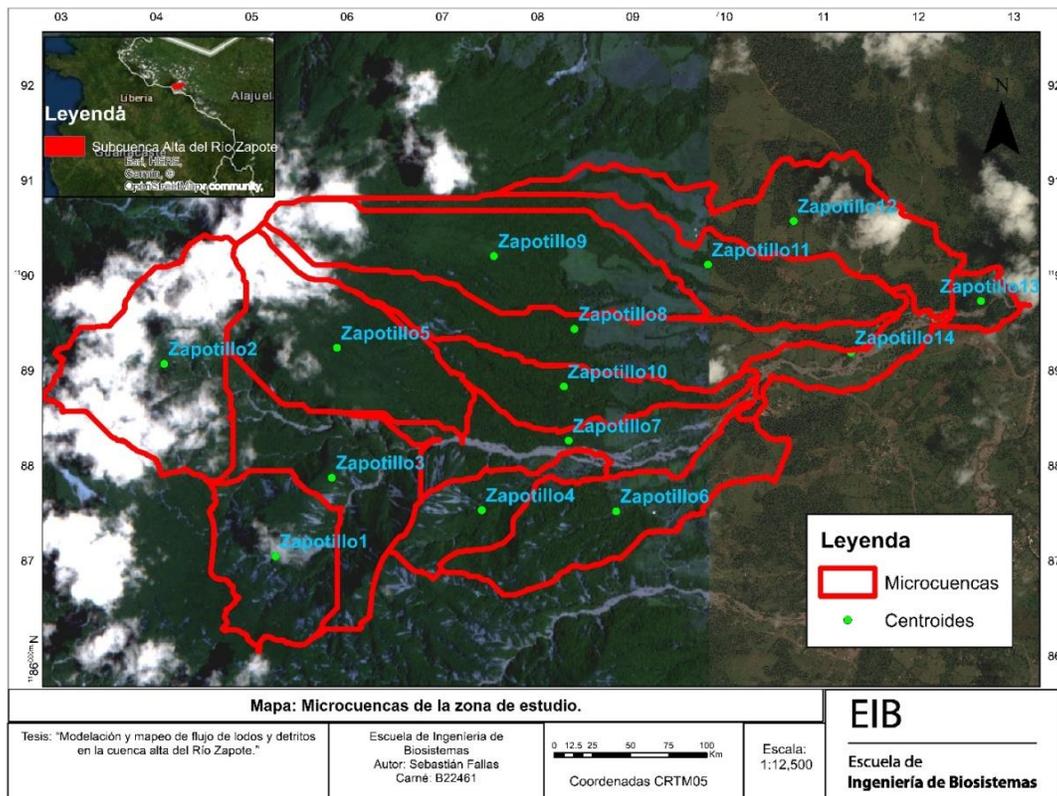


Figura 15. Microcuencas de la Subcuenca Alta del Río Zapote.

Las pendientes en las zonas bajas del río predominan valores entre los 0 y 9.76%, mientras que en la zona alta de la cuenca predominan pendientes entre 45.02 y 85.68%. En la Figura 16 se muestra el mapa de pendientes de la zona.

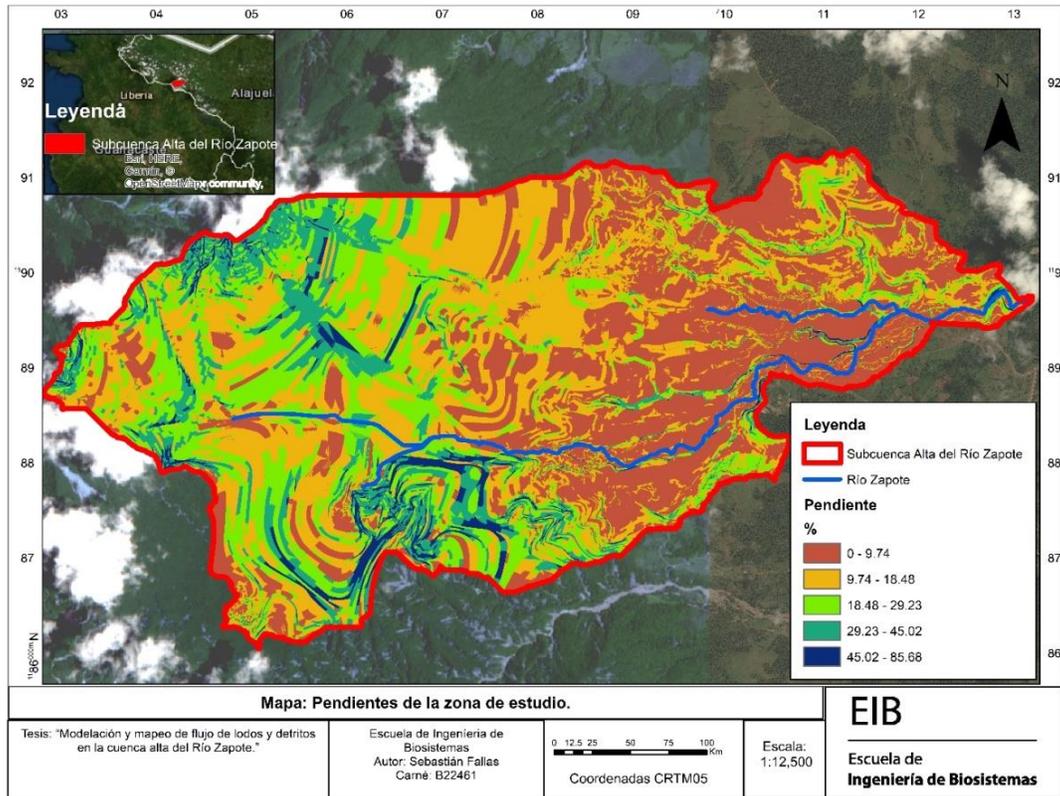


Figura 16. Mapa de pendientes de la cuenca alta

A partir del modelo de elevación digital se obtuvieron las características fisiogeográficas como son: la curva hipsométrica, curva de frecuencia de altitudes y parámetros de relieve. En la Figura 17, la curva hipsométrica nos muestra la variación de la altura de la cuenca con respecto al área acumulada. Dada su forma, esta cuenca presenta una fase sedimentaria o de vejez dado que el 50% del área acumulada correspondiente a una elevación de 846 m se encuentra por debajo del

promedio ponderado de la elevación (990.80 m). Aunque también presenta áreas montañosas con pendientes muy fuertes principalmente cercanas al volcán Miravalles, sin embargo, esta área acumulada es inferior al 2%.

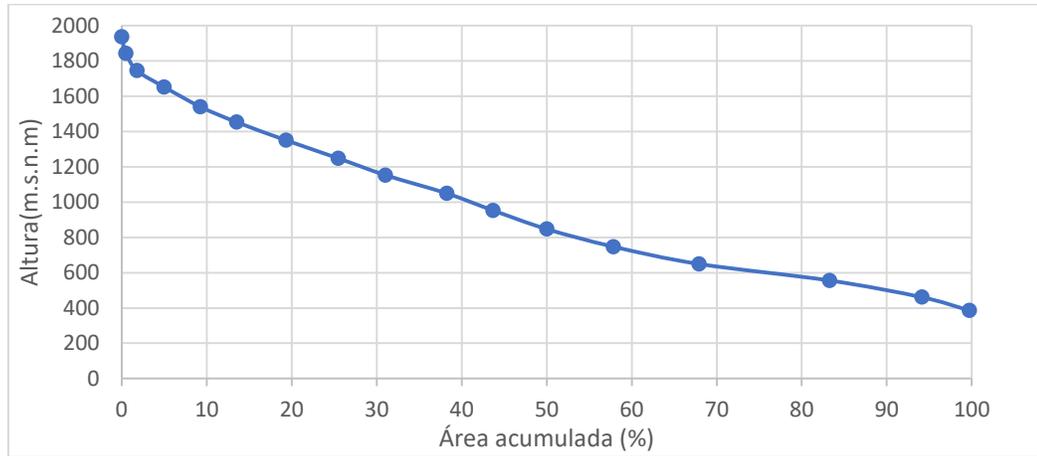


Figura 17. Curva hipsométrica de la cuenca.

La curva de frecuencia de altitudes nos muestra que alturas entre los 600 y 700 m.s.n.m son las más frecuentes que se presencian en la cuenca con un valor de 15.36%, seguido de elevaciones entre 500 a 600 metros con 10.87% y 700 a 800 metros con un porcentaje de 10.06%. También, se puede observar que las alturas mayores a 1500 metros hasta 1800 m presentan una frecuencia entre 4.29% y 4.25% respectivamente y solamente el 0.48% con altitudes superiores a 1900 m

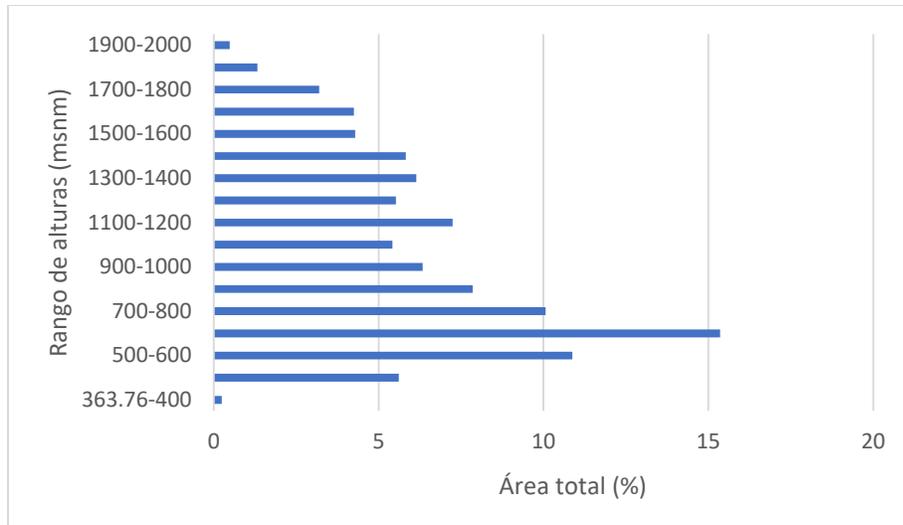


Figura 18. Frecuencia de altitudes de la cuenca.

En el Cuadro 7 se pueden observar algunos parámetros del relieve. El valor de densidad de drenaje se encuentra en un rango de drenaje moderado con suelos compactos, poco erosionables o muy permeables, además de cobertura vegetal densa. El valor del factor de forma y el índice de compacidad indican que es una cuenca alargada y que está sujeta a crecientes de menor magnitud que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor. La pendiente del cauce y el índice de pendiente es de 0.84 y 1.72 respectivamente.

Cuadro 7. Parámetros de relieve.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad de Drenaje	1.45	km/km ²
Factor de Forma	0.50	
Índice de compacidad	1.96	
Pendiente del cauce	0.84	
Altitud media ponderada	990.80	m.s.n.m
Índice de pendiente	1.72	

Con los datos del WorldClim se realizó la caracterización de temperatura, vapor y precipitación de la zona. Gracias a su alta resolución (30 segundos de arco en el sistema de referencia WGS84, correspondiente a 1 km de resolución en el Ecuador), la cobertura global y su disponibilidad, se ha usado y citado más de 5200 veces desde su publicación. Este conjunto de datos es adecuado para estudios básicos y aplicados en ecología, incluyendo silvicultura y modelos ecológicos, también en cuanto a la construcción de conjuntos de datos relacionados, como zonas biogeográficas o estratificaciones ambientales [77].

En la Figura 19 se puede observar que las temperaturas máximas promedio a lo largo del año rondan entre los 24 y 26 °C, las medias rondan entre los 20 y 22 °C y las mínimas entre los 16 y 18 °C. Lo cual muestra que Bijagua presenta temperaturas relativamente bajas a lo largo del año. La Figura 20 muestra que el vapor de agua a lo largo del año se encuentra alrededor de un 2%.

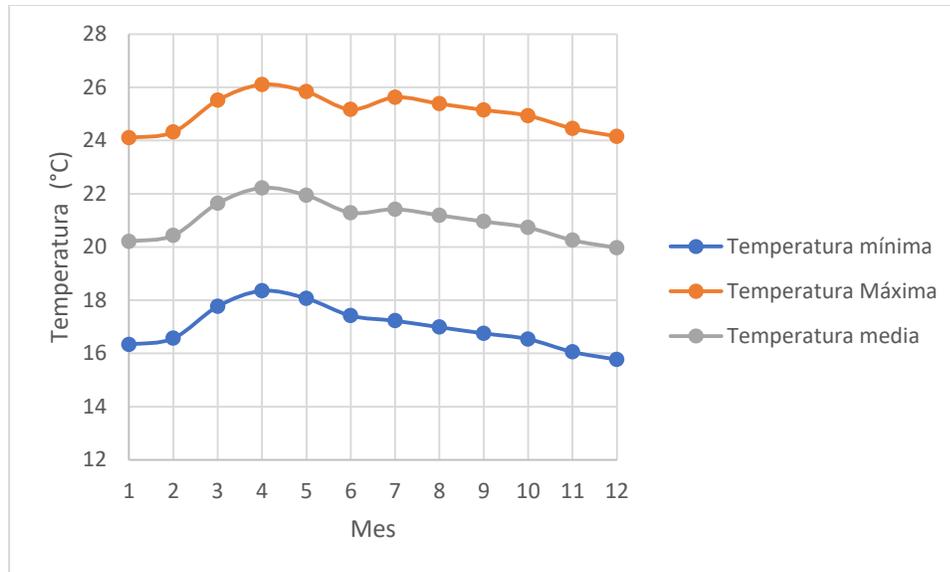


Figura 19. Temperaturas de la zona de estudio, datos del WorldClim.

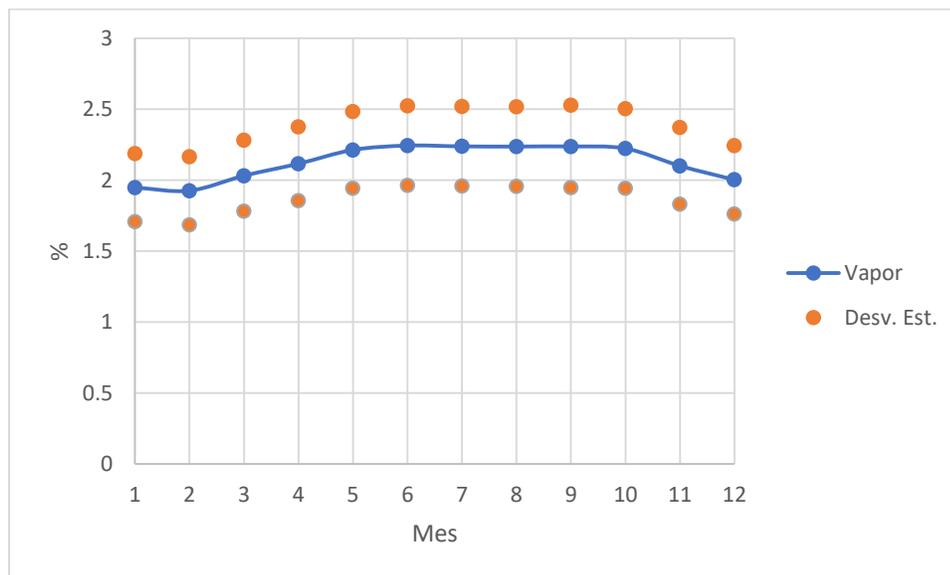


Figura 20. Vapor de agua, datos del WorldClim.

Las precipitaciones más altas se registran entre el mes 7 y 10 del año con 375 mm de lluvia hasta 425 mm, las precipitaciones más bajas se dan entre febrero y mayo, según muestra la Figura 21.

Además, se tiene una lluvia promedio entre julio y diciembre de alrededor 400 mm. Esto puede provocar que la zona se encuentra propensa a tener suelos saturados, lo que hace propenso que eventos meteorológicos aceleren esta saturación y se produzca catástrofes con intensificación de las inundaciones o deslizamientos por saturación de suelos.

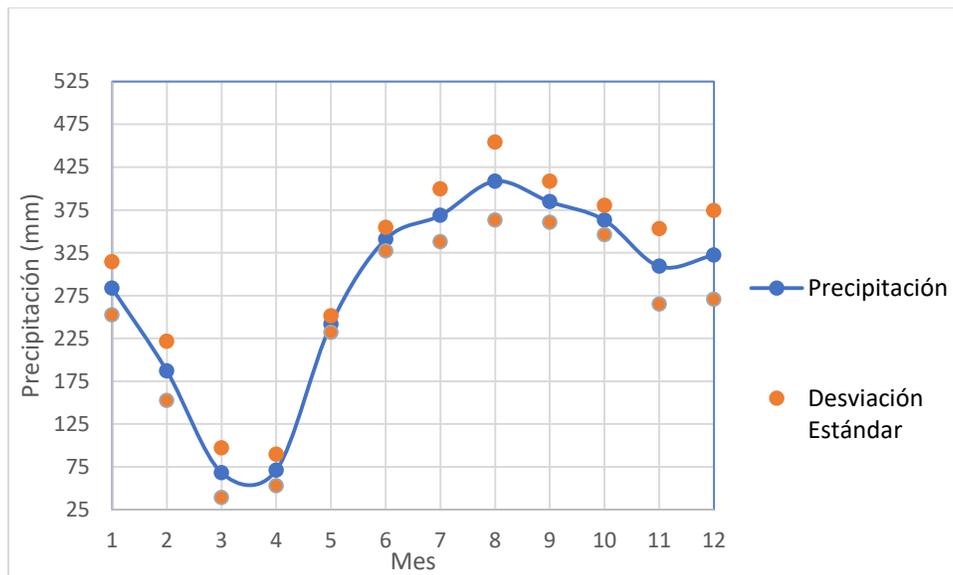


Figura 21. Precipitación promedio de la zona de estudio, datos del WorldClim.

4.2 Características de suelos y cobertura de la zona

Conocer las características del suelo y su uso es de gran importancia para entender la interacción suelo-agua-escurrentía. Cada cuenca cuenta con un tipo de suelo diferente, lo que lleva a un tipo de comportamiento de drenaje único para cada subcuenca a estudiar. El uso de suelo que se le dé a esa subcuenca afecta en la infiltración que este vaya a tener y el comportamiento de drenaje.

En la Figura 22, se muestra que el suelo de la zona se caracteriza por ser en su mayor parte andisoles (93.21%), con ciertas porciones de inceptisoles (6.13%) y ultisoles (0.65%) en la zona inferior. Los andisoles son característicos en esta zona al ser de origen volcánico, son suelos negros con altos contenidos orgánicos y con buena acumulación de humus. Se caracterizan por meteorizarse rápidamente, tienen alta productividad natural, son de textura media y de débil estructuración. Esto los hace ser de drenaje bueno a moderadamente excesivo, lo que ayuda a no mantener por periodos prolongados el suelo saturado, promoviendo la no alta acumulación de agua en épocas de precipitación.

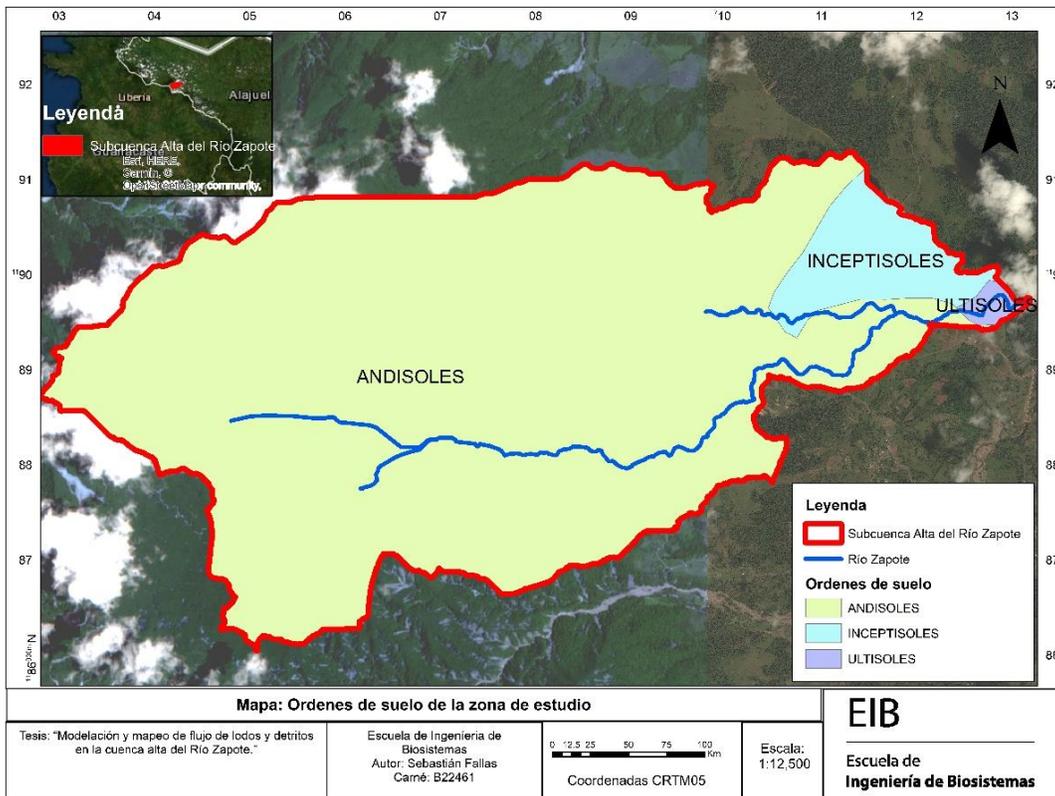


Figura 22. Tipos de suelo en la cuenca de estudio.

El mapa de cobertura de suelos se generó en el Proyecto de Investigación N° 340-B7-522 de la Universidad de Costa Rica usando imágenes satelitales (WordView 3, resolución espacial de 30 cm, tomadas en febrero del año 2017) y aplicando una clasificación supervisada para 8 clases de cobertura. En la Figura 23, se muestra el mapa de cobertura de suelo, donde la subcuenca presenta principalmente bosque en un 55%, zona agrícola 13%, pastizales y la cobertura de nubes ronda el 11% del área total. En la Figura 23 se puede observar esta distribución.

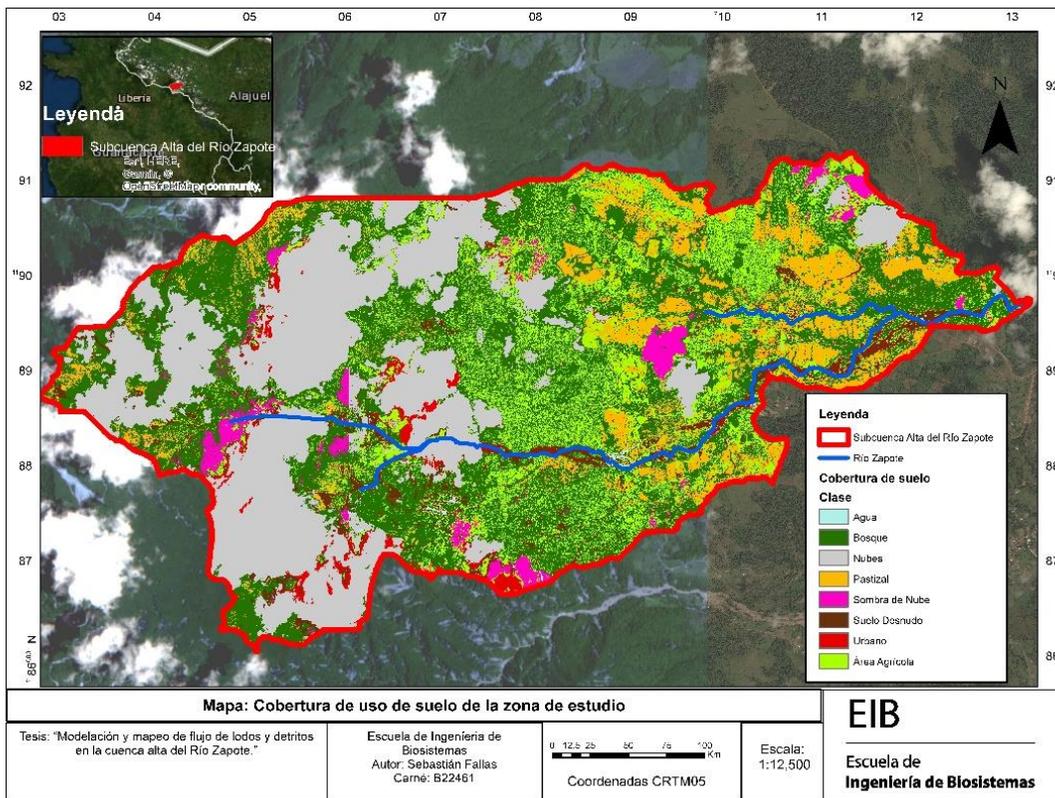


Figura 23. Mapa de uso de suelo de la zona de estudio.

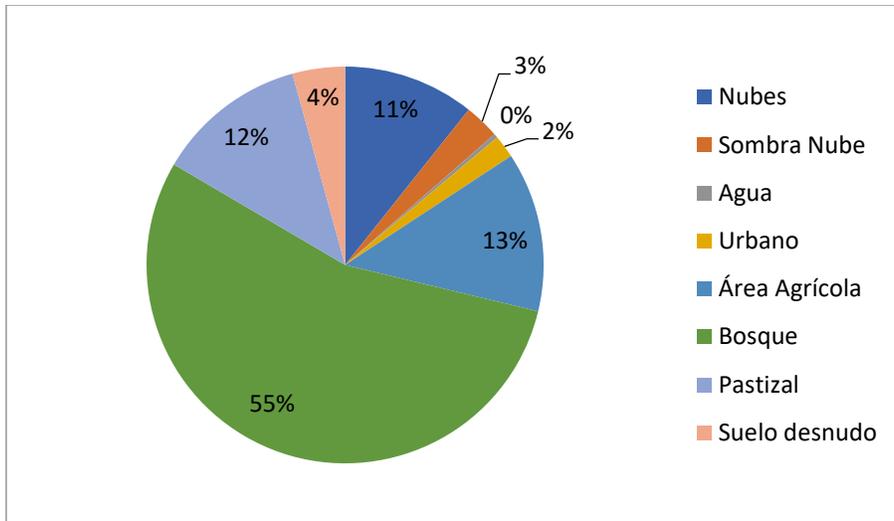


Figura 24. Porcentajes de cobertura de suelo en la zona.

La actividad agrícola produce un riesgo de erosión del suelo más alto que un bosque. Al no ser capas densas vegetativas y tener pérdida de capa de suelo por erosión en pendientes pronunciadas, además, el uso de maquinaria ayuda a la compactación del suelo, lo que hace que el suelo se vuelva poco drenable y provoque mayor escorrentía y facilita el riesgo de transporte de sedimentos y la inundación en el área. Por lo tanto, el uso que se le dé al suelo en las planicies y en zonas de riesgo de inundación es de vital importancia para conocer si estas zonas propician una mayor probabilidad de inundación en zonas urbanas que se encuentren aguas debajo.

En lo que corresponde a la formación geológica de Upala, está formada principalmente por materiales de períodos Terciario y Cuaternario. Las rocas volcánicas cuaternarias son la que predominan en la región. Las rocas del período Terciario tienen origen volcánico de la época Mioceno, que son del grupo Aguacate. Estas están compuestas por andesita y basalto, aglomerado, brechas y tobas, que se sitúa en cerros La Montañosa. Entre las de período

Cuaternario se encuentran rocas de origen volcánico y sedimentario. Corresponden a lahares sin diferenciar, localizados al norte y al oeste del cantón, ubicándose los más gruesos al oeste de la región; y a la época Holoceno pertenece a edificios volcánicos recientes y actuales. Estas rocas sedimentarias están representadas por Pantanos, ubicadas en pequeños sectores dispersos al norte y noreste del cantón y por depósitos Fluviales y Coluviales, localizados en los márgenes del curso superior del río Negro. Los Piroplásticos asociados cubren la mayor superficie del cantón en la ladera de la sierra volcánica de Guanacaste [78].

En temas geomorfológicos, el cantón se divide en cuatro unidades geomórficas de origen volcánico, de sedimentación aluvial, de orígenes estructurales y originados por remoción en masa. El origen volcánico se subdivide en: Cerros y Colinas Irregulares, Sierra Volcánica de Guanacaste, Planicie Ondulada, Lomeríos Bajos y Caldera de Miravalles. La subunidad de Cerros y Colinas Irregulares se encuentra entre el poblado de Finca Armenia en Aguas Claras y Caño Negro y el sector al este de la confluencia de los ríos Pizote y Cucaracho, así como en el sector aledaño al poblado de Pueblo Nuevo. Este presenta laderas de pendientes entre 11 y 40°, los ríos y quebradas parecen seguir un patrón estructural. Los espacios interfluviales de las cimas son angostos de 200 metros, esta subunidad se compone de lavas y lahares que se intercalan con aglomerados y piroclastos. Las rocas muestran alta meteorización, su origen se debe a actividad volcánica al pie del Miravalles y Rincón de la Vieja.

En la Sierra Volcánica de Guanacaste, la máxima elevación se encuentra en el volcán Miravalles con una elevación de 2028 m.s.n.m. Tiene fuertes pendientes, los espacios interfluviales son angostos. La unidad originada por remoción en masa se encuentra representada por deslizamientos en las laderas del Miravalles. Esta unidad presenta una forma circular con laderas de muy fuerte pendiente al sur. Cuenta con una superficie rugosa, con cortes profundos en los

valles de perfil transversal, lo cual se puede apreciar en el mapa de pendientes. Esta unidad se compone de rocas predominantemente de lava y corrientes de lodo cubierto con ceniza. [78]

El análisis por imagen satelital de los deslizamientos muestra que ocurrieron 127 deslizamientos en la extensión de la cuenca, sumando un área de 0.96 km². Estos deslizamientos fueron influenciados por la lluvia excesiva, además de esto, ocurrieron varios temblores que fueron registrados en la zona. En el Cuadro 8 se muestra el registro de sismos presentados en julio del 2016, que, según la CNE, estos sismos detonaron desprendimientos y agrietamientos en taludes (de hasta 100 m de largo en zonas de alta pendiente en la margen izquierda del Río Zapote). Además, señalaron que este sismo al igual que el terremoto de Nicoya del 2012 incidieron en la inestabilidad de laderas en la zona impactada por el huracán [4].

Cuadro 8. Registro de sismos antes del Huracán Otto. [79]

Fecha	Hora local (hh:min)	Magnitud (M_L)	Profundidad (km)	Localización
2016-07-02	20:03	4.2	3	6 km Norte de Bijagua de Upala
2016-07-02	20:02	4	5.5	4 km Norte de Bijagua de Upala
2016-07-02	20:16	4.8	11	6.8 km Norte de Bijagua de Upala
2016-07-02	19:58	5.3	13	5 km Norte de Bijagua de Upala
2016-11-24	12:44	7	10	200 km al sureste de San Salvador, El Salvador

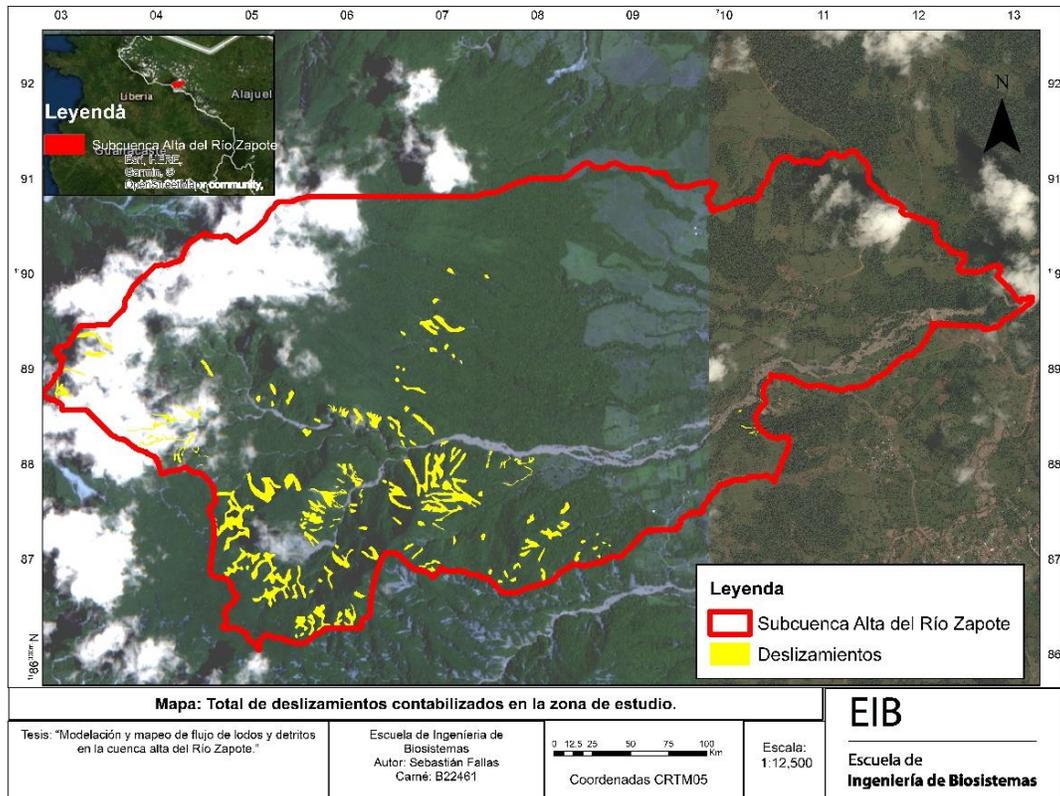


Figura 25. Deslizamientos que afectaron la zona de estudio.

De estos 127 deslizamientos, 74 inciden directamente sobre el cauce principal y suman un área aproximada de 0.072 km^2 , lo cual es un número significativo en aporte de sedimentos directo. En la Figura 26, se puede observar los deslizamientos directos en el cauce principal. Para tener un estimado del volumen, se asumió que los deslizamientos fueron de tipo traslacional. Según el USGS [74], la superficie de ruptura de un deslizamiento traslacional tiene una relación distancia-longitud menor a 0.1 y puede variar desde fallas pequeñas (tamaño de lote residencial) hasta deslizamientos de tierra regionales muy grandes que tienen kilómetros de ancho. Profundidades de este tipo de deslizamientos rondan de los 5 a los 10 metros en la zona, lo cual confirma lo mencionado por el personero de la CNE que sugiere tomar una profundidad promedio de 5 metros en los deslizamientos de la zona.

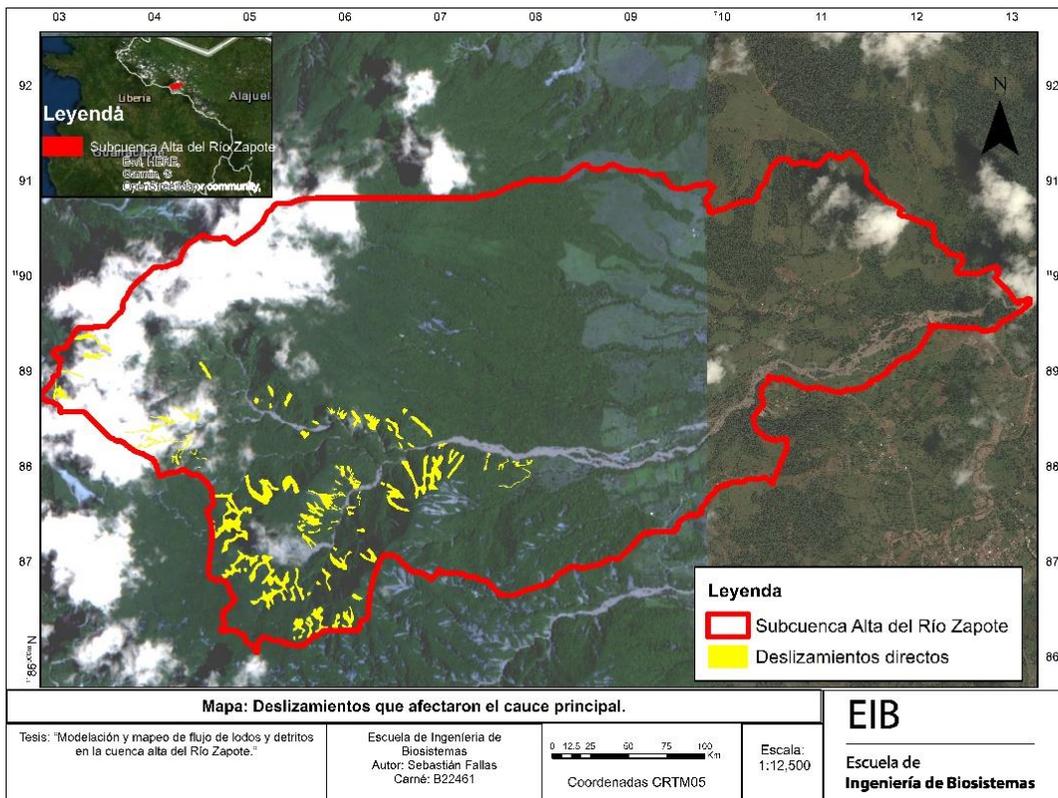


Figura 26. Deslizamientos que afectaron de manera directa el cauce del río.

Con las consideraciones anteriores, los deslizamientos pudieron haber aportado entre 3.25 y 6.08 millones de m^3 . Con profundidades de 4.5 metros de deslizamiento, el aporte es de 3.25 millones de m^3 , resultando una concentración de sedimentos de 0.39 y con una profundidad de 7.5 metros se tiene un aporte de 4.34 millones de m^3 , lo que corresponde a una concentración de sedimentos de 0.46.

La afectación en Bijagua es de gran magnitud, las montañas perdieron gran parte del suelo debido a los deslizamientos. En la Figura 27 se puede observar un ejemplo de los deslizamientos la zona que se observan desde diversos lugares en Bijagua. Los sitios de deslizamiento son de difícil acceso presentando pendientes muy altas, las zonas aledañas se encuentran cubiertas de

vegetación o la altura del deslizamiento con respecto al sitio de acceso no permite que se pueda tomar muestras de estos.



Figura 27. Deslizamientos observados desde Bijagua.

En la Figura 28 se presenta uno de los deslizamientos cercano al río donde si fue posible realizar toma de muestra de suelo y realizar su caracterización granulométrica.



Figura 28. Deslizamiento del cual se tomó la muestra para el análisis.

La Figura 29 muestra que las partículas de suelo son de diámetro pequeño con un 90% pasando de partículas inferiores a 1 mm de diámetro. Predominan limos que se encuentran entre los 0.074 mm a 0.005 mm, y un porcentaje de arcillas de 27%. No se logró determinar la plasticidad del deslizamiento ya que el suelo no contaba con la estructura necesaria para realizar esta prueba. Hay que tomar en cuenta que este tipo de material ha estado expuesto por dos años, después del evento de Otto, lo que implica que las estructuras de suelo más arcillosas ya han sido removidas por la erosión hídrica, quedando estructuras más gruesas.

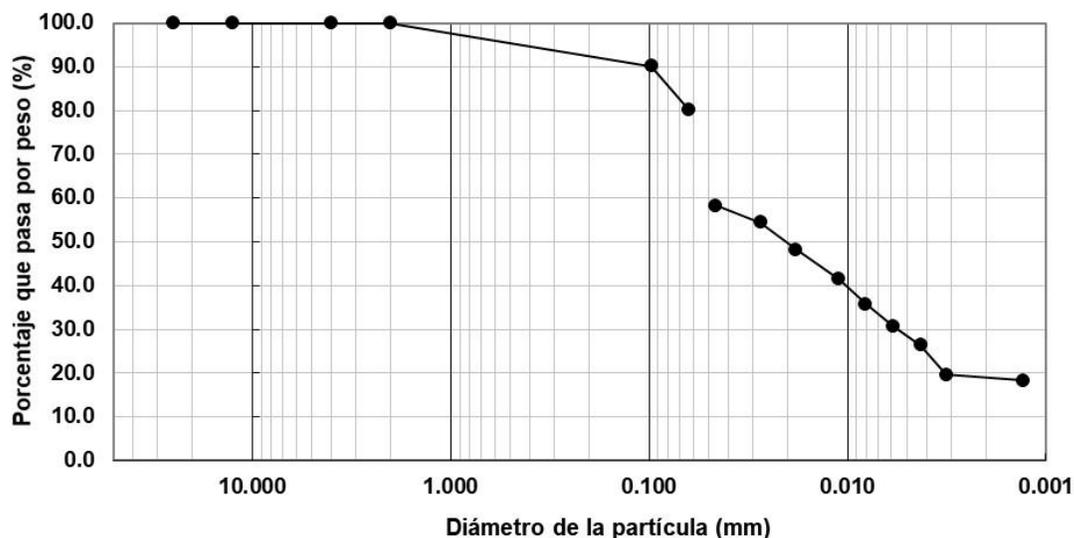


Figura 29. Distribución granulométrica del suelo del deslizamiento.

Se realizaron varias pruebas de granulometría para conocer la distribución del suelo en varios puntos de la zona de estudio y así tener un mejor conocimiento de los suelos del lugar, estas se muestran en el Anexo 1. Los resultados muestran que mayoritariamente, la granulometría corresponde a suelos con partículas mayores 0.063 mm de diámetro. Algunos de estos contienen piedras de gran tamaño mayores a 10 cm de diámetro. De la misma manera que en el deslizamiento, no se pudo realizar ninguna prueba de plasticidad en ningún punto de la planicie de inundación. Dada las características del río, visualmente, era de esperar que la mayor parte de las tomas tuvieran granulometría gruesa, dada la erosión sufrida.

Partes como el banco del río y su lecho cuentan con mayor presencia de limos y arcillas, con un porcentaje mayor del 50% en estos puntos. El lecho varía entre 57.53 a 100% en contenido de

material fino. Esto es de esperar ya que los lechos de los ríos se componen de material fino o muy fino.

Partes como el banco del río y su lecho cuentan con mayor presencia de limos y arcillas, con un porcentaje mayor del 50% en estos puntos. El lecho varía entre 57.53 a 100% en contenido de material fino. Esto es de esperar ya que los lechos de los ríos se componen de material fino o muy fino.

En el Cuadro 9 se muestra la distribución de tamaño de partícula donde se tomaron las muestras de suelo. Se puede observar que el suelo mantiene un grado de uniformidad a lo largo del cauce del río, ya que valores mayores a 4 de coeficiente de uniformidad, indica buen agregado de suelo. Donde no se muestra uniformidad es en lecho del río a una profundidad de 20 y 30 cm, donde las partículas más finas se encontraban hasta 60 cm de profundidad. En el Anexo 2 se encuentran los resultados de las granulometrías realizadas a los puntos considerados en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad (CU).

Muestra	Coordenadas	D80 (mm)	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	CU
TOMA 2	-85.0774; 10.74714	11	2	0.3	0.06	33.33
TOMA 4	-85.07754; 10.74707	1.1	0.3	0.09	0.007	42.85
TOMA 3	-85.07747; 10.74711	3.8	0.9	0.085	0.009	100
CANAL 1	-85.07963; 10.74576	4	0.8	0.1	0.009	88.89
LECHO 20	-85.05847; 10.75524	0.08	0.041	0.005	0	-
LECHO 30	Ver LECHO 20	0.075	0.015	0.0017	0	-
LECHO 60	Ver LECHO 20	0.4	0.07	0.008	0.0015	46.67
BANCO 1	-85.07862; 10.746804	3	0.13	0.02	0	-
BancoDerecho2	-85.07992; 10.74571	11.3	10.6	5	0.9	11.78
REPRESA 20	-85.05935; 10.75517	1.6	0.35	0.065	0.015	23.33
REPRESA 30	Ver REPRESA 20	1.6	0.4	0.06	0.009	44.44
REPRESA 60	Ver REPRESA 20	1.2	0.25	0.06	0.0085	29.41
DESLIZAMIENTO	-85.07659; 10.74719	0.065	0.05	0.0055	0	-

Lo que respecta al lecho del río, predominan estructuras como limos y arcillas, mientras que, para las tomas a lo largo del cauce, como los bancos (BANCO 1 y BancoDerecho 2) y la planicie

de inundación (TOMA 2, TOMA 4, TOMA 3, CANAL 1 y REPRESA), muestra estructuras más arenosas y hasta con grava en el caso del BD2 y la Toma 2.

4.3 Modelación hidrológica

Para la modelación hidrológica, se calcularon los parámetros necesarios para introducir en el programa HEC-HMS. Se hizo uso del método del NRCS para infiltración con el CN y del hidrograma unitario. En el transporte de avenida se utilizó el método de Muskingum-Cunge. Se obtuvieron los tiempos de concentración de cada una de las subcuencas con el método del NRCS mostrado en el TR-55, de esta manera se puede obtener el transporte de avenidas. Estas se pueden observar en el cuadro 10.

Cuadro 10. Tiempos de concentración y tiempo de retardo de las subcuencas.

Subcuenca	Área (km²)	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Tiempo concentración (min)	Tiempo de retardo (min)	CN (II)
Quebrada Zapotillo 1	2.01	2042.48	0.44	34.77	20.86	52.97
Quebrada Zapotillo 2	3.21	2393.79	3.45	18.37	11.02	57.89
Quebrada Zapotillo 3	2.49	2785.20	0.76	28.18	16.91	57.67
Quebrada Zapotillo 4	1.15	2912.09	0.75	26.92	16.15	60.03
Quebrada Zapotillo 5	2.86	4166.00	0.69	40.84	24.51	52.84
Quebrada Zapotillo 6	2.36	4363.55	0.50	54.29	32.57	61.19
Quebrada Zapotillo 7	1.87	5572.31	0.71	30.37	18.22	60.24
Quebrada Zapotillo 8	2.83	7569.27	1.04	33.51	20.11	62.19
Quebrada Zapotillo 9	3.44	5265.26	0.98	29.87	17.92	62.25
Quebrada Zapotillo 10	1.48	5138.25	0.76	33.81	20.29	59.21
Quebrada Zapotillo 11	2.28	7128.19	0.81	43.73	26.24	63.63
Quebrada Zapotillo 12	2.83	6153.22	0.38	45.74	27.45	62.98
Quebrada Zapotillo 13	0.37	2003.40	0.24	37.62	22.57	61.81
Quebrada Zapotillo 14	0.84	3224.14	0.20	43.52	26.11	67.35

La subcuenca con mayor tiempo de concentración fue la 6, ya que esta presenta la mayor longitud de cauce de aporte a la cuenca. La menor fue la Quebrada Zapotillo 2 con 18 minutos de tiempo de concentración. El tiempo de retardo está relacionado directamente con el tiempo de concentración. El valor del Número de Curva (CN) para una condición antecedente de humedad 2 se muestra en el Cuadro 11.

Estos valores están relacionados al uso de suelo de cada una de las subcuencas, es por esto que el uso que se le dé al suelo en el área es de suma importancia en la modelación hidrológica. Los suelos con mejor cobertura vegetal ayudarán a tener valores de CN que afectan positivamente la respuesta de la cuenca.

La cuenca ronda con valores de CN entre 52.84 y 67.35, lo que nos indica que en ciertas subcuencas infiltra bien el agua, pero en algunas sufre de escorrentía, mayoritariamente la 14 ya que esta se cuenta con bastante área del cauce del río o suelo desnudo. De la misma manera, esta cuenca es la que tiene mayor tiempo de concentración, mientras que la subcuenca 2 es la que tiene menor tiempo. De los factores que más influyen en este cálculo es la distancia por recorrer y pendiente. La subcuenca 14 es la que tiene mayor longitud de recorrido y una pendiente no muy fuerte, que hace que el tiempo sea mayor, contrario sucede con la subcuenca 2. Para el cálculo del tránsito de avenidas con el método de Muskingum-Cunge. Esta información se ingresó en el modelo hidrológico HEC-HMS para la generación de hidrogramas de escorrentía. La represa hidroeléctrica existente en el lugar afecta la descarga final del río en este caso, por lo que el almacenamiento en la cuenca varía dependiendo de esta.

4.3.1 Análisis de la Precipitación

El análisis hidrológico se desarrolló a partir de información de precipitación de la estación meteorológica de Bijagua con registros del huracán cada 5 minutos y láminas máximas anuales de 5, 10, 30, 60, 120, 360 y 1440 minutos a las cuales se les realiza un análisis de frecuencia con el objetivo de calcular los periodos de retorno para cada duración.

En la Figura 30, se observa el hietograma del huracán Otto, donde el pico máximo de lluvia del evento se dio en horas de la noche del día 24 de noviembre del 2016 con un acumulado de 6.35 mm en 5 minutos y una intensidad máxima de 76.20 mm/h. Este tuvo una duración de alrededor tres días, con otros dos picos ubicados el día 26 de noviembre con intensidades de 57.91 y 42.67mm/h. El total de la precipitación fue de 311.4 mm y una lámina máxima en 24 horas de 236.22 mm.

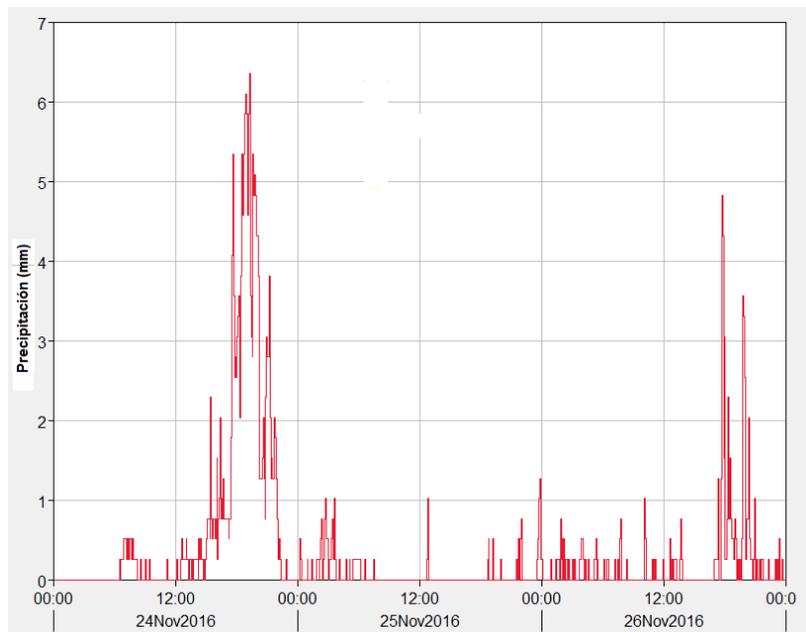


Figura 30. Hietograma del huracán Otto para la estación de Bijagua.

Los periodos de retorno para cada duración de lluvia se pueden observar en el cuadro 10, donde el periodo de retorno de 100 años y una duración de 24 horas presenta una lámina de lluvia de 248.82 mm, mientras que para 50 años es de 226.92 mm. El huracán tuvo una lámina de 24 horas máxima de 236.22 mm, lo cual es menor al valor de 248.82 mm del período de retorno de 100 años. Este valor no es concluyente ya que se necesita de más registros de lluvia (alrededor de 50 años), sin embargo, es útil para tener una aproximación de la magnitud del evento. Además, a partir de los 120 minutos se observa un incremento en los periodos de retorno, esto es de esperar ya que los huracanes son eventos de más de 12 horas de duración. Se hizo uso del método de Gumbel ya que los datos se ajustan con un nivel de significancia del 5% y se ajustan con un R^2 del 0.99.

Cuadro 11. Períodos de retorno (P.R) para la estación de Bijagua.

P.R.	Duraciones de lluvia (min)								
	5	10	15	30	60	120	180	360	1440
	Lámina de lluvia (mm)								
5	12.21	21.55	28.57	45.69	64.33	88.89	111.76	132.77	151.58
10	13.5	23.79	31.52	50.19	70.58	101.48	131.79	158.33	175.12
25	15.13	26.62	35.25	55.88	78.48	117.38	157.1	190.63	204.86
50	16.34	28.72	38.02	60.1	84.34	129.18	175.88	214.59	226.92
100	17.54	30.8	40.77	64.3	90.15	140.9	194.51	238.38	248.82
Huracán Otto	6.35	12.19	17.78	34.54	62.99	109.73	144.27	194.31	236.22

En la Figura 31 se puede ver esta distribución donde se tiene un pico de lluvia a la mitad del evento. La curva de concentración, el pico y la de descenso tiene una duración de alrededor 8 horas. Con base en los datos diarios del cuadro 10 y utilizando la distribución de lluvia del evento de Otto (Figura 31), se obtuvo la distribución para los periodos de retorno mencionados anteriormente.

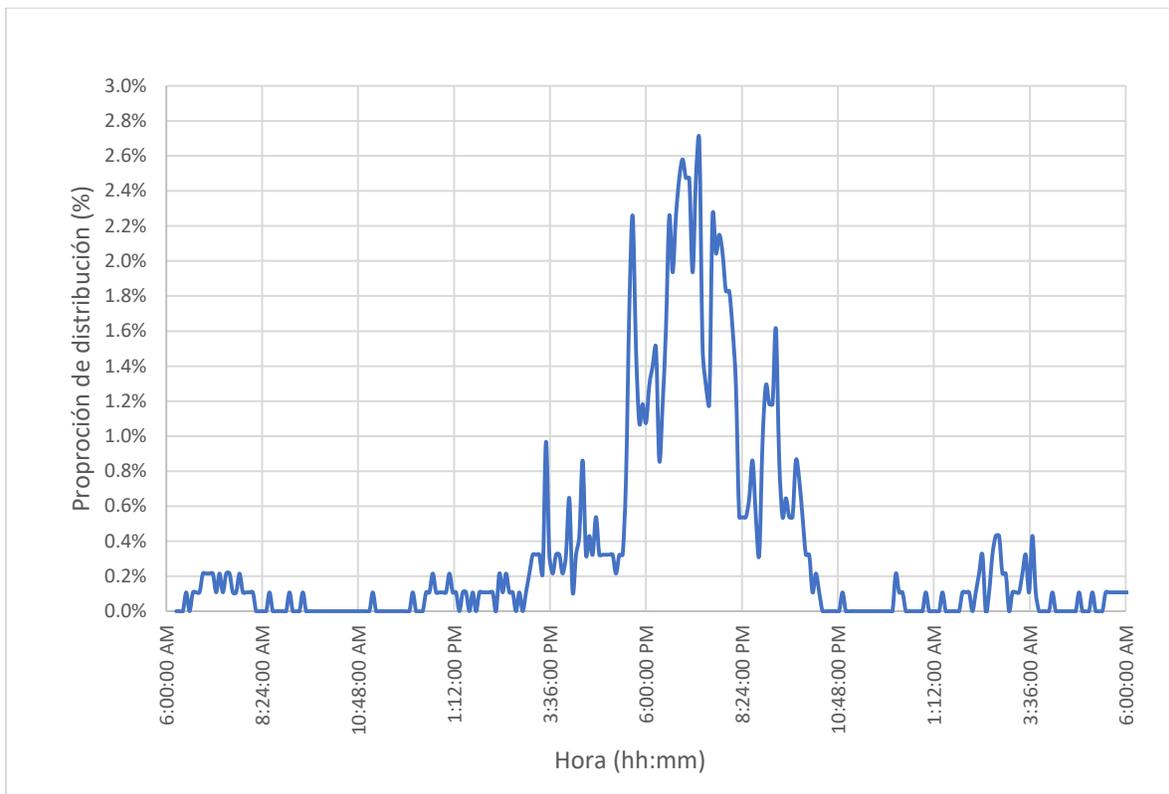


Figura 31. Distribución de la lluvia en Bijagua.

Para el caso del Hydro-Estimator, este utiliza datos infrarrojos de los satélites ambientales geoestacionarios operacionales de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para estimar por medio de un algoritmo la proporción de las lluvias. Sin embargo, este presenta la desventaja en que la relación entre las temperaturas de brillo superior de la nube de la ventana IR y las tasas de precipitación superficial son bastante débiles para la precipitación estratiforme,

y en consecuencia el algoritmo generalmente no funciona bien para la precipitación en la estación fría. La lluvia generada por procesos de convección presenta nubes extremadamente cálidas, esto ocurre en las islas tropicales (por ejemplo, Hawái, Puerto Rico) presentando problemas de detección en el algoritmo. [80]

En la Figura 32 se muestran las ubicaciones de los puntos registrados por el Hydro-Estimator en la zona de estudio y están separados una distancia de 4 kilómetros. Se seleccionaron estos puntos ya que cubren el área de estudio y por lo tanto son representativos del área y podrían ser una alternativa para estimaciones de lluvia en caso de sitios que no cuenten con información de lluvia o en casos donde se pierdan las estaciones por las inclemencias del tiempo.

Dentro del modelo HEC-HMS para considerar los puntos del Hydro-Estimator como estaciones meteorológicas se utilizó la función de distancia inversa al ser datos distribuidos espacialmente calculándose los centroides de las microcuencas y así se asigna la lluvia del punto más cercano a la microcuenca.

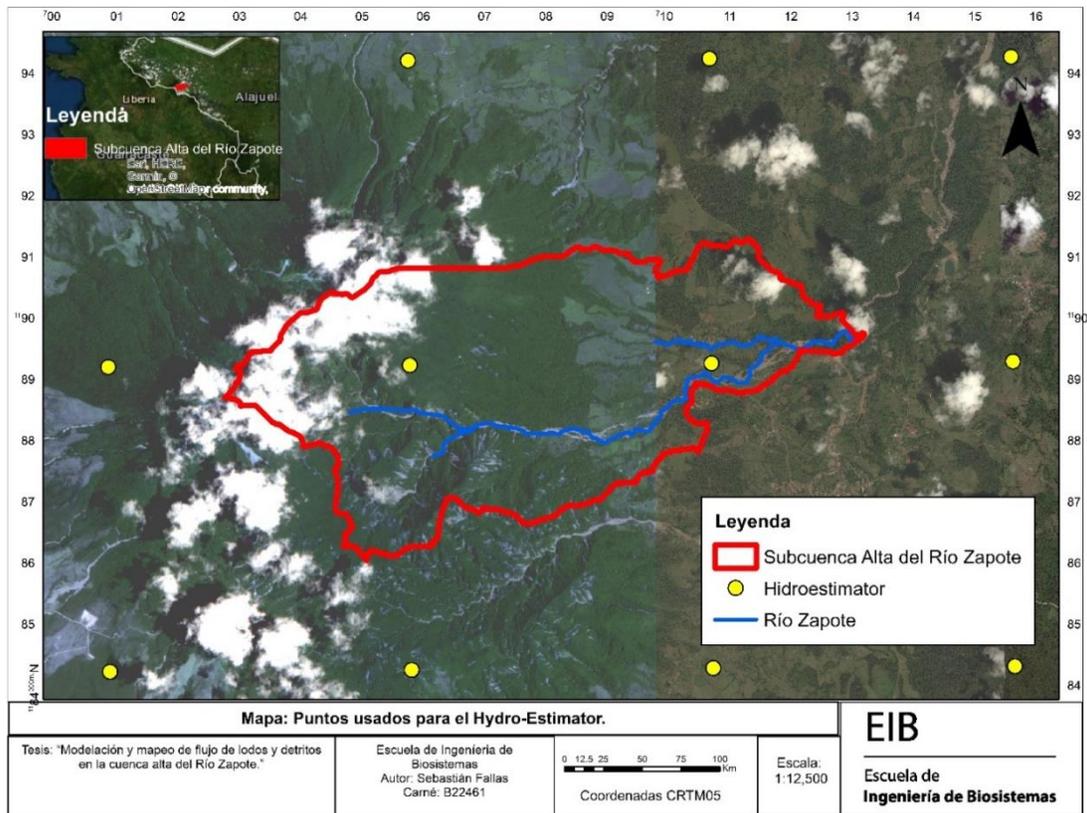


Figura 32. Distribución de los puntos del Hydro-Estimator.

4.3.2 Comparación hidrológica de los escenarios simulados

Se obtuvieron los hidrogramas respectivos para cada uno de los escenarios planteados en la metodología. Estos se dividen en el huracán Otto medido con la estación de Bijagua, la lluvia para los periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años) con la distribución de Otto en 24 horas y el Hydro – Estimator. Además, se realiza una comparación entre la lluvia de la estación de Bijagua y el Hydro - Estimator ambos a una resolución temporal de 1 hora.

En la Figura 33 se muestra el hidrograma en la salida de la cuenca para el huracán Otto medido con la estación de Bijagua, una resolución temporal de 5 minutos y utilizando el modelo

hidrológico con una condición antecedente de humedad tipo II, la cual indica un acumulado de precipitación 5 días antes del evento de 52 mm. Según el modelo hidrológico, se genera un caudal pico en estas condiciones de $298.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en la salida. Este pico coincide con la hora donde los testigos reportan que se escucharon los estruendos del río, la cual se registró alrededor de las 8 de la noche del día 24 de noviembre del 2017. El segundo pico se presentó el día 26 de noviembre en horas de la tarde, con un caudal máximo de $163.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

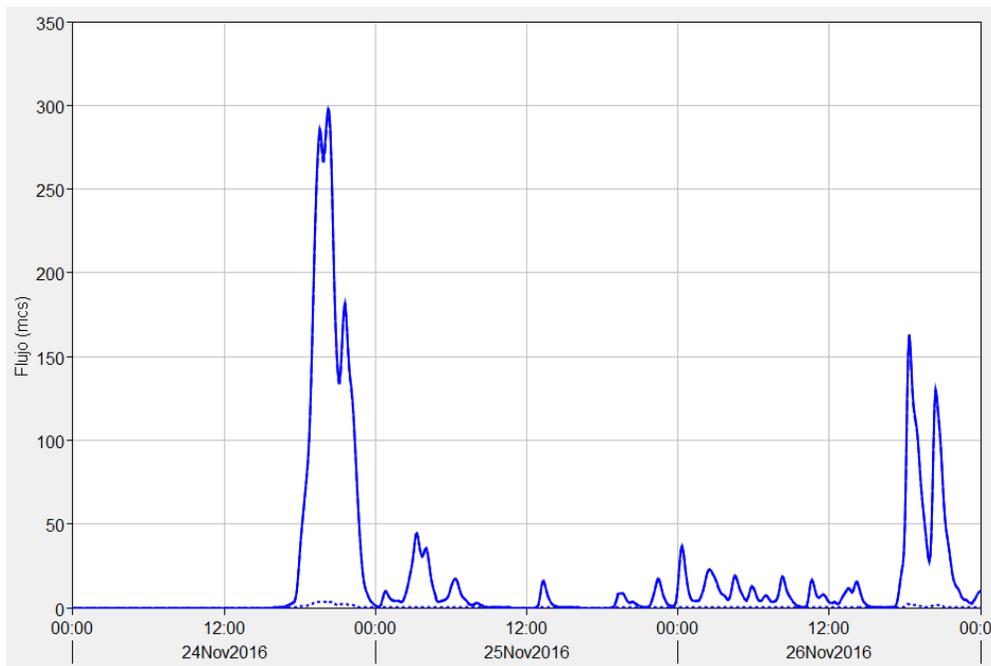


Figura 33. Gráfico del hidrograma de salida de la cuenca para el huracán Otto con 5 minutos de intervalo.

Para el caso de las simulaciones utilizando la distribución de lluvia de Otto (Figura 31) y el periodo de retorno de 100 años, se genera un caudal pico de $323.3 \text{ m}^3/\text{s}$, según se muestra en la Figura 34. Este pico del hidrograma presenta un valor mayor al pico registrado por el huracán, dándose el pico a las 2 horas del inicio de la lluvia.

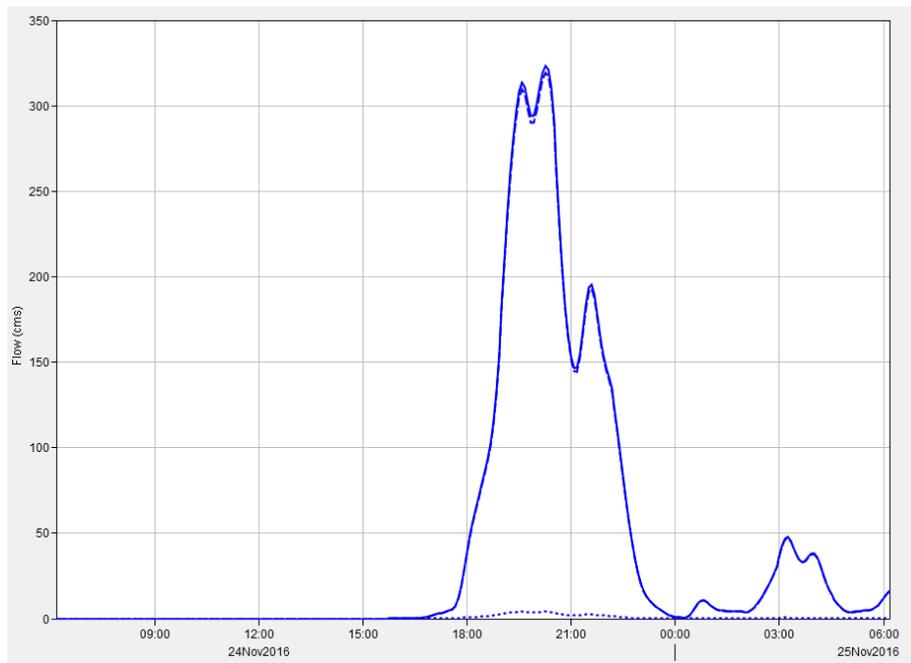


Figura 34. Hidrograma de salida para 100 años de período de retorno.

Para la comparación entre la estación meteorológica de Bijagua y el Hydro – Estimator, se transformaron los datos de 5 minutos a 1 hora en la modelación hidrológica. Los resultados se presentan en la Figura 34, donde la simulación con la estación meteorológica (a 1 hora) muestra un pico de $246.4 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el Hydro-Estimator $175.9 \text{ m}^3/\text{s}$, para una diferencia del 28.61%. El volumen total escorrentía fue de 199.35 mm para el Hydro-Estimator, mientras que la estación registró 172.34 mm para una diferencia del 15.67%. Existe una diferencia de 3 horas de retraso en los tiempos entre el primer pico del Hydro-Estimator y el pico de la estación que se dio a las 8 p.m. del 24 de noviembre, sin embargo, el segundo pico del Hydro-Estimator de $171.2 \text{ m}^3/\text{s}$ se registra a las 8 p.m., misma hora del pico de la estación. Estas diferencias se pueden deber a que el Hydro – Estimator no estima adecuadamente la lluvia en tormentas convectivas en

climas tropicales, teniendo como consecuencia una subestimación en la cantidad y un desfase en los tiempos.

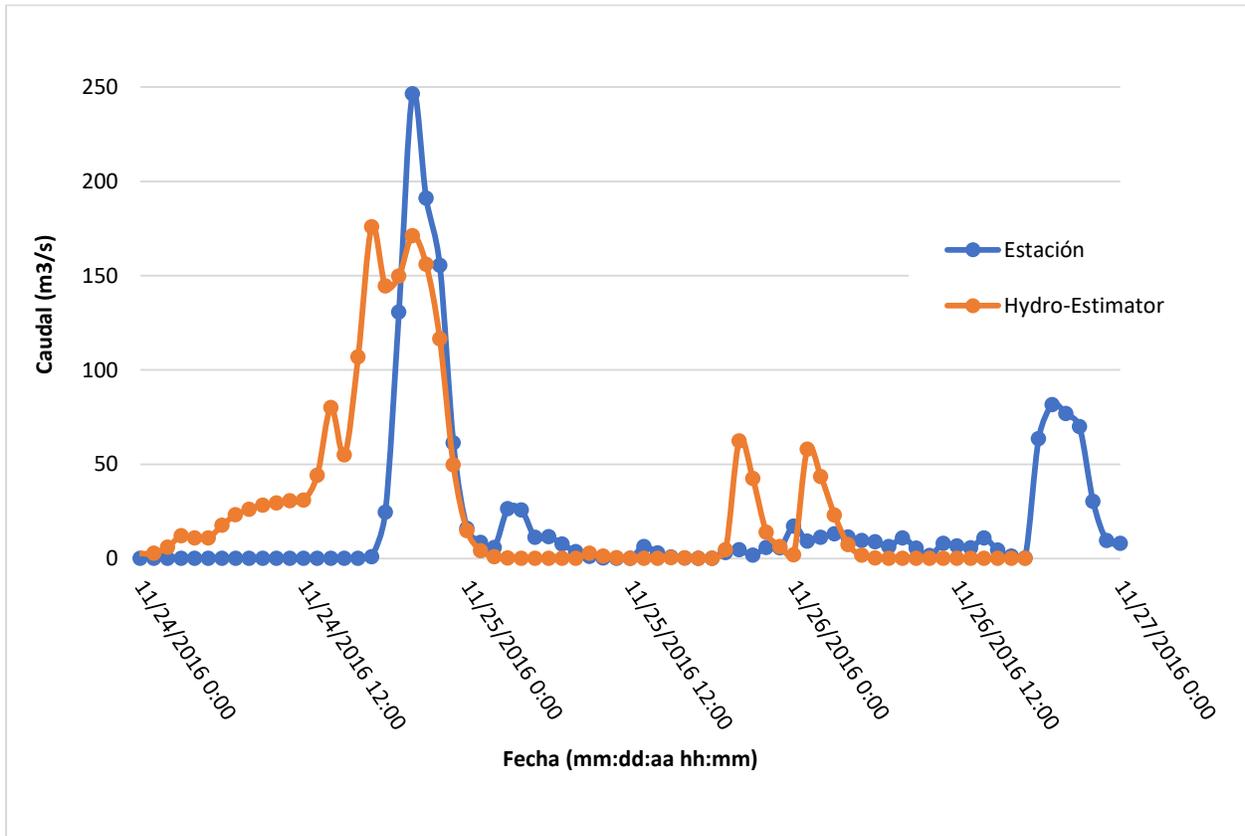


Figura 35. Comparación del Hidrograma generado por el Hydro-Estimator y la estación Bijagua para el huracán Otto.

En el cuadro 12, se muestran los caudales y volúmenes máximos de cada uno de los escenarios modelados. El periodo de retorno de 100 años muestra 323.3 m³/s, sin embargo, su volumen es de 119.26 mm, comparado con 172.23 mm que tuvo el huracán. Estos periodos de retorno son una aproximación a un valor real ya que, al realizarlo con solamente 28 años de datos de 24 horas, no son suficientes para realizar un periodo de retorno de 100 años adecuados. En el Anexo

2 se muestra la respuesta de la cuenca para los periodos de retorno de 5 a 100 años, en las subcuencas con más importancia (ubicación de estructuras y mayor devastación).

Cuadro 12.Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos.

Escenario	Caudal máximo (m³/s)	Volumen de escorrentía directa(mm)
Hydro-Estimator Otto*	175.9	199.35
Otto Estación 1 hora*	246.4	172.34
Otto 5 minutos*	298.3	172.23
5 años**	139.3	47.87
10 años**	181.5	63.70
25 años**	237.2	85.05
50 años**	279.8	101.67
100 años**	323.3	119.26
*: Duración del evento de los 3 días registrados.		
**: Duración del evento de 24 horas.		

El periodo de retorno de 100 años muestra 323.3 m³/s, sin embargo, su volumen es de 119.26 mm, comparado con 172.23 mm que tuvo la modelación “Otto 5 minutos” del huracán. Estos periodos de retorno son una aproximación a un valor real ya que no se cuenta con datos suficientes para realizar una adecuada cuantificación de la lluvia para un periodo de retorno de 100 años.

4.4 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó mediante el programa bidimensional FLO-2D. Se obtuvieron los mapas de inundación para Otto y el período de retorno de 100 años para los escenarios planteados de agua limpia y con detritos, este último se divide en 4 concentraciones de sedimentos volumétricas (C_v) distintas (0.3, 0.45, 0.55 y 0.65). De esta manera se calibró el modelo y se compararon cada una con la modelación de agua limpia. Los datos de ingreso fueron la topografía del área de modelación, el mapa de n de Manning, los caudales a ingresar y los nodos de salida.

El área modelada comprende 9.61 km^2 , optimizando así la modelación para zonas donde no hay inundación. Los caudales de entrada se ingresaron en los puntos donde cada subcuenca tiene su punto de salida, presentándose un total de 14 entradas de caudal al modelo hidráulico, como se muestra en la Figura 36.

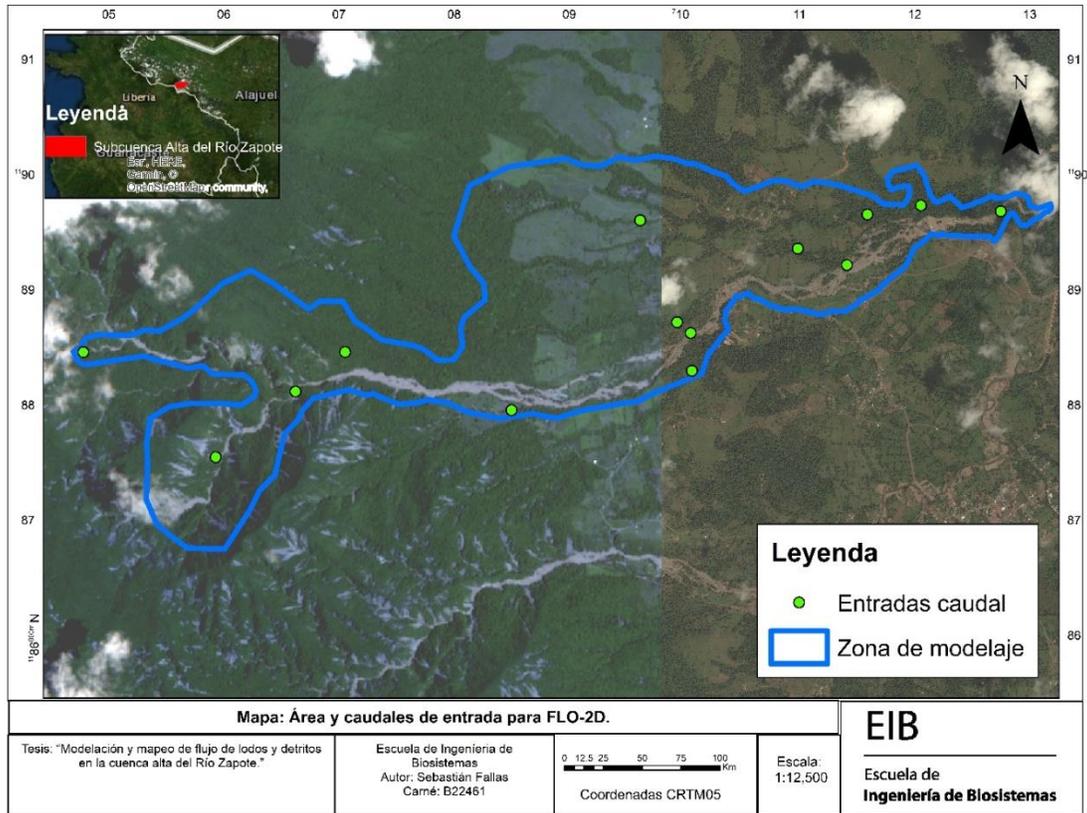


Figura 36. Área de modelación hidráulica y caudales de entrada.

Para el área de modelaje, se cuenta con 384424 pixeles a una resolución de 5 m en la grilla de modelación. En la Figura 37 se muestra la grilla de modelación que comprende la zona. Esta es generada por el programa y a pesar de observarse más grande que el área de modelación, esta realiza sus cálculos en el dominio computacional definido por el área de ingreso.

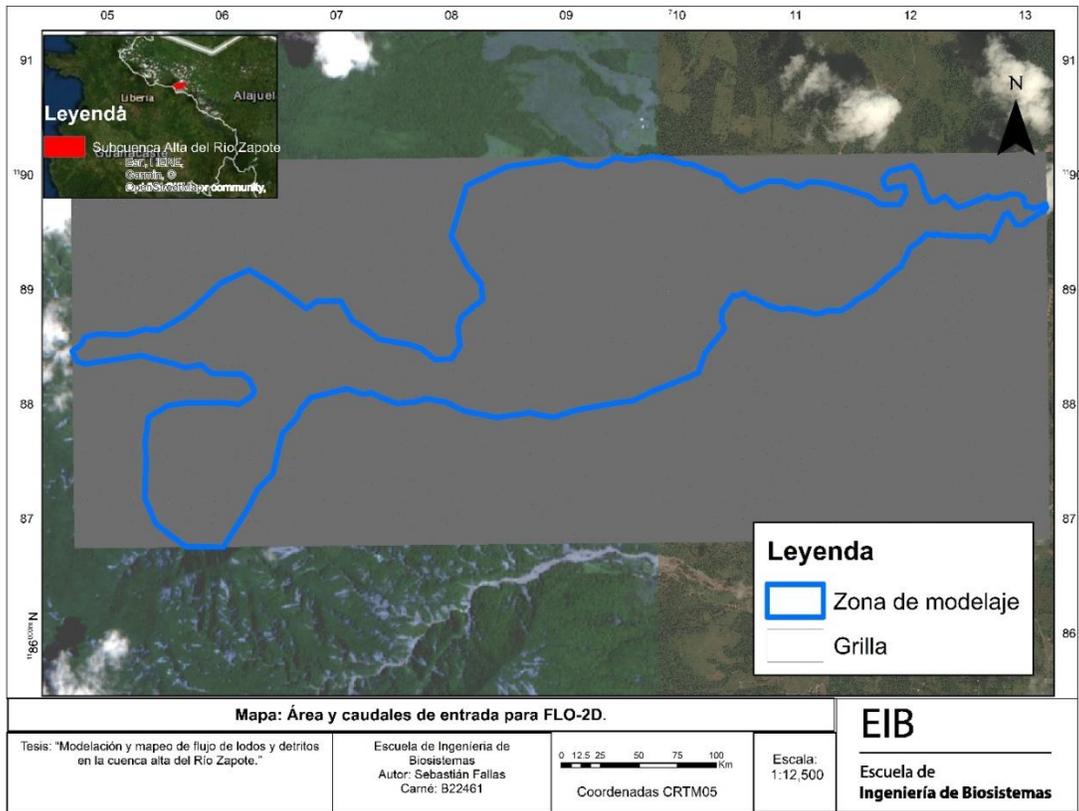


Figura 37. Cuadrícula de la modelación hidráulica.

El uso de suelo está directamente relacionado con los valores de n de Manning. Dependiendo de su uso, este varía en lo que es la planicie de inundación, mientras que en el canal depende de factores como el material, la sinuosidad, cobertura vegetal, entre otros.

Los valores de la n de Manning de las planicies de inundación se seleccionaron según lo mostrado en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Selección de diferentes n de Manning para el cauce del río ($s/m^{1/3}$).

Tipo de uso de suelo	n	Tipo 1[81]	n	Tipo 2 [19]	n	Tipo 3 [82]	n promedio
Área Agrícola	0.035	Tierras de cultivo	0.035	Cultivo maduro en hileras	0.04	Cultivo maduro	0.0367
Bosque	0.15	Árboles	0.12	Gran cantidad de árboles	0.1	Gran cantidad de árboles	0.1233
Pastizal	0.035	Pastos	0.03	Pasto corto	0.035	Pastos altos	0.0333
Suelo Desnudo	0.035	Adoquines pedregosos de canal de tierra	0.05	Limpio, devanado, algunas pozas, cardúmenes, pocas hierbas y muchas piedras	0.06	Combinación de vegetación gruesa y flexible, pozas y rápidos, bancos con árboles, meandros suaves y pendiente irregular	0.0483

Se selecciona un valor de 0.08 para el canal del río tomando en cuenta los aspectos mencionados anteriormente. Se realizó una comparación de la n de Manning con bibliografía [83] la cual muestra cauces de características similares, en la Figura 38 se muestran estos cauces.

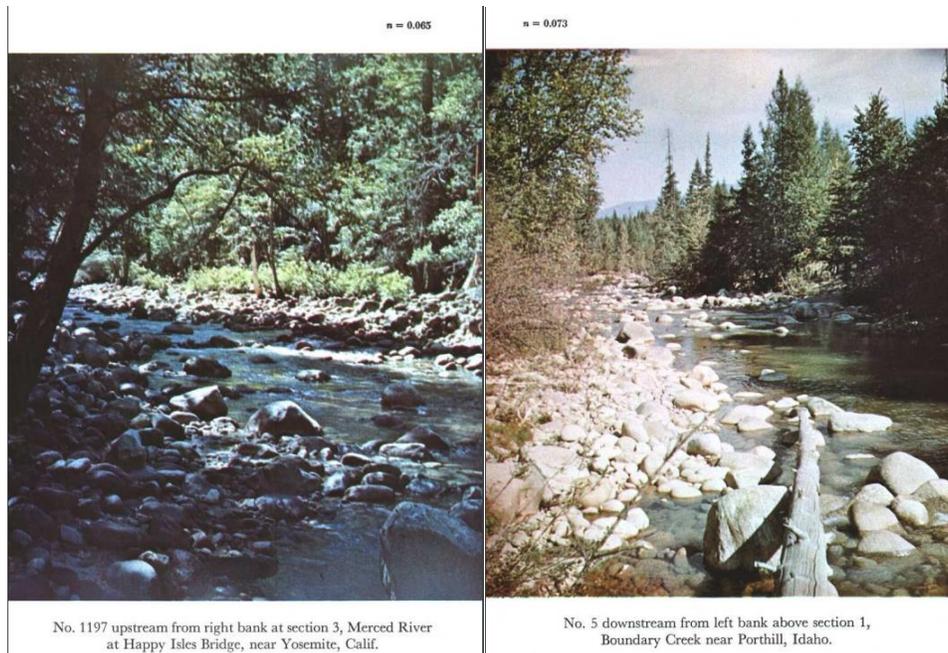


Figura 38. Comparación con la bibliografía para la selección de n de Manning.

Igualmente, aplicando la ecuación 25 a las condiciones del río Zapote, se obtiene un valor de n de Manning de alrededor 0.1, lo cual está muy similar al obtenido mediante la imagen. En la

Figura 39 se muestra el mapa final donde se ve reflejado la selección de valores anteriores variando de 0.012 para zonas urbanas hasta 0.1233 para bosques.

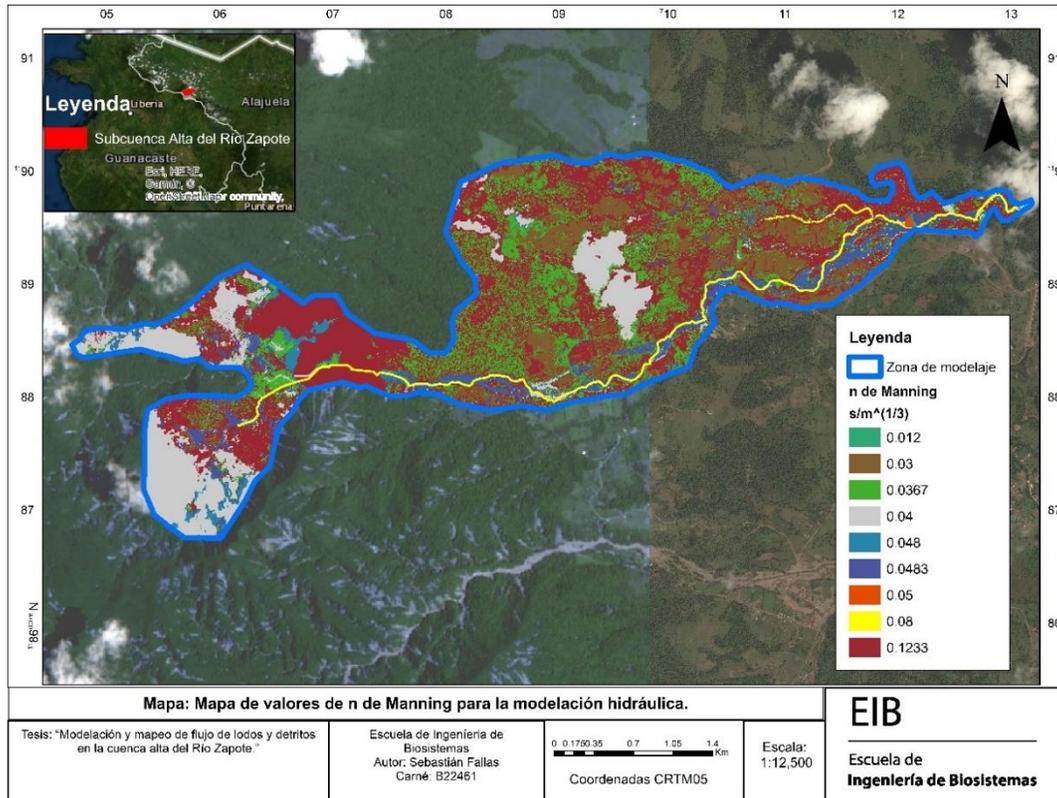


Figura 39. Mapa de valores de N de Manning de zona de modelaje.

4.4.1 Análisis agua limpia.

Huracán Otto con estación de Bijagua

Para la simulación hidráulica utilizando los resultados del modelo hidrológico del evento del Huracán Otto usando la estación de Bijagua a una resolución de 5 minutos, se pueden observar los resultados en la Figura 72 del Anexo 4, donde se mantienen profundidades del agua entre los 0 y 1.22 metros, mientras que en algunos puntos puede llegar a aproximadamente 2 metros. La

profundidad promedio en toda la malla es de 0.48 m con una desviación estándar de 0.56 m. Estas alturas de 2 metros se dan en lugares donde el canal se vuelve profundo y angosto y por lo tanto la profundidad del flujo sube.

Lo que respecta a las velocidades en la Figura 73, el flujo presenta velocidades mayoritariamente entre los 0 y 3.44 m/s, mientras que velocidades mayores a esas, se dan en los mismos lugares donde hay aumento de altura del flujo. La velocidad promedio es de 1.52 m/s con una desviación estándar de 1.48 m/s.

El mapa de peligrosidad en la Figura 74 en el anexo 4, muestra que a través del canal hay una peligrosidad alta, mientras que en varios lugares de la planicie de inundación puede variar entre nivel bajo o mediano, lo cual no representa tanto peligro para los lugares aledaños según la topografía suministrada para este estudio. Los resultados muestran que la altura promedio y su velocidad usando un flujo newtoniano no son lo suficiente para producir un desastre tan significativo como el ocurrido. Además, existen muchas áreas donde la inundación de agua limpia no cubrió las zonas, las cuales en realidad sí sufrieron inundación, según se puede apreciar en las marcas mostradas en la fotografía aérea.

Simulación de 100 años con distribución de Otto

El evento simulado para una tormenta con un periodo de retorno de 100 años y utilizando una distribución de lluvia extraída del Huracán Otto muestra en la Figura 75 en el Anexo 4, que las profundidades con respecto al evento de Otto con estación meteorológica muestran un comportamiento muy similar. Estas pueden llegar a los 2 m, igualmente, en mayor parte del área inundada mantiene una profundidad entre los 0 y 1.15 m. Lo que respecta a velocidad en la Figura 76 se puede observar su comportamiento es igual de similar que al huracán, esta se mantiene entre los 0 y 4.12 m/s, sin embargo, puede llegar a 5.5 m/s en varios puntos dentro del

canal. La diferencia en profundidad y velocidad promedio es de 90 cm y 1 m/s respectivamente entre cada escenario con respecto al huracán Otto. Una diferencia de casi un metro en profundidad puede ser significativamente más dañino en infraestructura y personas, dadas las velocidades que se puedan generar en zonas con altas pendientes. En algunos lugares supera al huracán Otto, lo que provoca que el mapa de peligrosidad mostrado en la Figura 77, tenga más área con un nivel medio o alto que este, sin embargo, se mantiene dentro del cauce del río específicamente.

4.4.2 Análisis de flujo de detritos

A partir de los resultados de la determinación de la curva granulométrica, se selecciona el tipo de suelo “Suelo Natural de Aspen” por su cantidad de material fino y por su falta de plasticidad, el cual es muy similar al encontrado en la zona (31%). Se realizó la modelación hidráulica con flujo no Newtoniano como se mencionó con anterioridad a 4 distintas concentraciones de sedimentos: 0.3, 0.45, 0.55 y 0.65, para dos eventos hidrológicos como lo son el huracán Otto y el caudal de una tormenta de un periodo de retorno de 100 años y con una distribución de lluvia procedente del huracán. Los mapas de los resultados se pueden observar en el Anexo 4.

Análisis para un $C_v=0.3$

Huracán Otto con estación de Bijagua

En la Figura 78 se pueden observar los resultados de un flujo de detritos con una concentración de sedimentos del 30%. El promedio de la altura con esta concentración es de 1.24 m con una desviación estándar de 0.942 m, 0.75 m más que el anterior y el 62% de las alturas se concentra hasta los 2 metros. La velocidad promedio se encuentra igualmente a 1.73 m/s con una

desviación estándar de 1.41 m/s y el 60% de sus velocidades son menores a los 4 m/s, que se puede observar en la Figura 79. Lo que corresponde al nivel de peligrosidad, la Figura 80 muestra que un 17% del área inundada está en un nivel de riesgo medio, mientras que el resto es alto, lo que hace al flujo peligroso de destruir a su paso lo que encuentre en un 73% de la zona inundada.

Simulación de 100 años con distribución de Otto

El periodo de retorno con esta misma concentración varía el flujo comparado con el huracán. En la Figura 81 se puede observar el mapa de profundidad donde promedio de profundidad es de 1.17 m con una desviación estándar de 0.88 m, comparado con el huracán de 1.22 m, con un máximo de 3.67 m y el 80% de las alturas están concentradas entre 0 y 1.91 m. Las velocidades promedian 2.16 m/s con una desviación estándar de 1.69 m/s, 0.43 m/s más que el huracán, y estas se concentran hasta el tercer quintil de los datos, estas se muestran en la Figura 82. El 22% del área corresponde a un nivel medio de peligrosidad como se puede apreciar en la Figura 83. Las diferencias entre ambos eventos no son significativas.

Análisis para un $C_v=0.45$

Huracán Otto con estación de Bijagua

A esta concentración, la altura promedio se encuentra a 1.95 m y el 86% de los datos se encuentran hasta una altura de 3.04 m. El 50% de las alturas en este caso se encuentran mayores a 2 m, un 12% más que con un 30% de C_v . Estas alturas se muestran en la Figura 84. El promedio de las velocidades es de 1.92 m/s con una desviación estándar de 1.35 m/s y sólo un

10% del flujo tiene un nivel medio de peligrosidad, lo cual lo hace casi totalmente destructivo. El mapa de velocidad y peligrosidad se pueden observar en la Figura 85 y 86 del Anexo 4.

Simulación de 100 años con distribución de Otto

En la Figura 87 se muestran los resultados para la profundidad del flujo de los 100 años de periodo de retorno. La profundidad promedio es de 1.78 m con una desviación estándar de 1.18 m y el 46% de las alturas son superiores a estas, lo cual lo vuelve muy peligroso. La diferencia en profundidad con respecto al huracán es de 0.41 m menos, y en velocidad, como se puede apreciar en la Figura 88, es de 0.06 m/s, con un promedio de 1.87 m/s con una desviación estándar de 1.37 m/s y un máximo de 9.55 m/s. Igualmente, como se puede observar en la Figura 89, un 15% es zona anaranjada, lo cual, al igual que el huracán, es casi totalmente peligroso.

Análisis para un $C_v=0.55$

Huracán Otto con estación de Bijagua

Para una concentración de sedimentos del 55% hubo un cambio significativo en los valores con respecto a las anteriores modelaciones. Las alturas del flujo tienen un promedio de 3.38 m con una desviación estándar de 1.83 m y el 68% de las alturas son superiores a los 2 m (Figura 90), lo cual lo hace extremadamente peligroso. La velocidad promedio, al igual que los anteriores casos, es de 1.88 m/s con una desviación estándar de 1.3 m/s, sin embargo, al existir un flujo más alto, es más peligroso, esta se muestra en la Figura 91. Es por esto que el 98% del área inundada es de categoría roja y este nivel de flujo puede ocasionar erosión en la cama del cauce, como se puede observar en la Figura 92. Los valores dentro del cauce del río son superiores al promedio en unos 2 metros, esto para todos los casos de modelación.

Simulación de 100 años con distribución de Otto

Con el periodo de retorno de 100 años, los resultados muestran similitud con el huracán, con alturas mayores de 2 m en un 75%, con un promedio de 3.63 m y una desviación estándar de 2.05 m y las velocidades se mantuvieron en 1.84 m/s en promedio con una desviación estándar de 1.4 m /s. La diferencia entre el huracán y el periodo de retorno es de 0.35 m en profundidad promedio y 0.04 m/s en velocidad promedio. La peligrosidad igualmente es casi en el 100% de nivel alto. A partir de esta concentración de sedimentos el flujo empieza a perder propiedades de flujo de detritos y tiene más propiedades de deslizamiento. Estos resultados se pueden observar en las Figuras 93, 94 y 95 respectivamente.

Análisis para un $C_v=0.65$.

Huracán Otto con estación de Bijagua

En este caso en la Figura 96 se puede observar el mapa de profundidades, donde el promedio de la profundidad es alto con 5.52 m con una desviación estándar de 4.06 m y se observan profundidades de hasta 20.25 metros que se hayan principalmente en los puntos donde los caudales se ingresaron, lo cual no son representativas con el daño que el flujo dejó. Velocidades de hasta casi 9.96 m/s en algunos sectores del canal se presentan en la Figura 97, lo cual representa un peligro en el cauce por erosión y arrastre de sedimentos. La peligrosidad es de un 100% alto y se puede apreciar en la Figura 98, sin embargo, esta concentración de sedimento ya tiene un comportamiento de deslizamiento y no de flujo de detritos, razón por la que se presentan dichas alturas, sobre todo en los nodos de entrada de caudal.

Simulación de 100 años con distribución de Otto

El periodo de retorno de 100 años presenta niveles muy altos de profundidad, de alrededor 20 metros y se debe al gran ingreso de sedimento y comportamiento de deslizamiento. Posterior a este, el flujo se vuelve de una altura de 2 m casi en todo el canal, lo cual es de esperar por el comportamiento de deslizamiento en los lugares de ingreso de caudal. En el caso de la peligrosidad un 73% del área está en un riesgo alto, como se observa en la Figura 101. Las velocidades igualmente se mantienen en un promedio de 2.02 m/s con una desviación estándar de 1.97 m/s, mientras que la profundidad promedio es de 5.71 m con una desviación estándar de 4.38 m como se muestra en la Figuras 98 y 99 respectivamente. La diferencia en altura promedio es de 0.26 m con el caso del huracán y 0.013 m/s en la velocidad promedio.

En el Cuadro 14 se puede observar las diferencias entre los mapas de la profundidad de flujo de agua limpia o Newtoniano con cada una de las concentraciones de sedimentos (altura de flujo con sedimentos menos altura de flujo con agua limpia) presentándose los valores mínimos, máximos, promedios y desviaciones estándares. Mediante un análisis de ANOVA, se obtiene que existen diferencias significativas en los valores de promedio por cada uno de los escenarios hidráulicos, sin embargo, no existen diferencias significativas en los valores para el huracán y el periodo de retorno de 100 años, lo cual es de esperar ya que el huracán se aproxima a un periodo de retorno de 100 años. En el Anexo 5 se pueden observar los resultados de estos. Para un Cv de 0.3 hay 0.8 m de diferencia en la profundidad promedio del agua, con un aumento de 1.14 m para un Cv de 0.45 y valores de 3.36 m y 5.51 m para 0.55 y 0.65 respectivamente.

Cuadro 14. Comparación de profundidades de flujo entre agua limpia y concentración de sedimentos.

	Profundidad del flujo (m)							
	Mínimo		Máximo		Promedio		Des. Std.	
Cv	Otto	P.R. 100 años	Otto	P.R. 100 años	Otto**	P.R. 100 años**	Otto	P.R. 100 años
0.3*	-0.012	-0.03	2.79	2	0.8	0.725	0.49	0.41
0.45*	-0.031	-0.061	5.14	4.41	1.94	1.47	1.93	0.77
0.55*	-0.03	-0.032	9	10.51	3.36	3.81	1.488	1.678
0.65*	-0.029	-0.53	23.9	24.1	5.51	5.88	3.78	4.27

*: existen diferencias significativas entre las concentraciones de sedimentos con un valor, $p=0.00019$; **: no existen diferencias significativas, $p=0.96$.

Además, se realizó una comparación en el cambio de las áreas de la mancha de inundación y entre los niveles de peligrosidad. Se comprueba que conforme aumenta la concentración de sedimento, aumenta las áreas de inundación y aumenta la peligrosidad. Sólo en agua limpia presenta áreas con nivel bajo de peligrosidad, mientras que para valores de 0.55 y 0.65, en un 98% o más presenta áreas de peligrosidad alta

Cuadro 15. Cambio en las áreas de inundación y en áreas de peligrosidad de los modelos hidráulicos.

Escenario	Área (km ²)			
	Área inundada	Peligrosidad		
		Baja	Mediana	Alta
Otto Agua limpia	1.12	0.19	0.23	0.3
Otto, Cv:0.3	1.2	0	0.16	0.76
Otto, Cv:0.45	1.51	0	0.15	1.28
Otto, Cv: 0.55	1.72	0	0.03	1.62
Otto, Cv:0.65	1.88	0	0.01	1.82
100 años, Agua limpia	1.17	0.19	0.23	0.33
100 años, Cv: 0.3	1.26	0	0.24	0.82
100 años, Cv: 0.45	1.40	0	0.19	1.10
100 años, Cv: 0.55	1.85	0	0.02	1.77
100 años, Cv: 0.65	2.01	0	0.02	1.93

Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante observación de las imágenes satelitales y verificación en visitas de campo con el objeto de reproducir lo sucedido con el modelaje hidráulico. El primer lugar que se debe de considerar para la validación es el puente que comunicaba el pueblo de Zapote con Bijagua. En la actualidad este puente ya no existe por causa del flujo de detritos que destruyó por completo y dejó sin acceso al pueblo. Mediante la Figura 52 y las líneas de contorno, se realizó una aproximación de la altura posible del puente y se

obtuvo que la superficie de rodaje del puente estaba a una altura aproximada de 3.5 m sobre el nivel del agua. Además, en la imagen de abril del 2016, se puede observar el cambio radical que tuvo el cauce del río después del evento, mostrado en la Figura 40.



Figura 40. Ubicación del puente y condiciones del río en abril del 2016. [Fuente: Google Earth]

En la Figura 41 se puede apreciar como este lugar se ve en la actualidad donde ya el puente no cruza por el mismo lugar que en el 2016. En la actualidad existe un puente nuevo localizado aguas abajo de este.



Figura 41. Puente en estado actual.

Según los resultados generados mediante el modelo FLO-2D, a un C_v de 0.45 de concentración de sedimentos, en este punto la altura del agua correspondiente es de 3.28 m, mientras que a un C_v de 0.65 la altura es de 4.94 m. Asumiendo un espesor del puente de 50 cm, el despeje total es de alrededor de 3 m. Ambas concentraciones podrían provocar un represamiento en este punto que lleve el puente al colapso, dadas las velocidades generadas en este lugar. Es posible que para una concentración de 0.3, este no llegue a colapsar el puente.

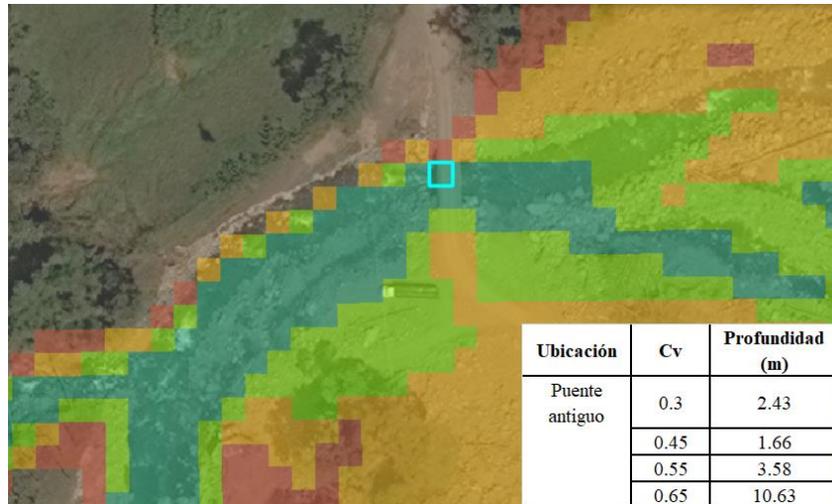


Figura 42. Altura del nivel del agua antes del puente antiguo.

Cercano a este punto, se encuentra el puente que se construyó recientemente. Esta imagen nos permite corroborar que el puente se encuentra seguro en caso de algún otro evento extremo, ya que se encuentra unos metros más alto de la altura máxima a la que puede llegar el flujo. La altura máxima del flujo posible para el huracán es de 7.48 metros (Cv de 0.65), mientras que, para el periodo de retorno de 100 años, no sobrepasa los 7 metros, sin embargo, el puente se encuentra a 10 m del suelo como se puede apreciar en la Figura 43.

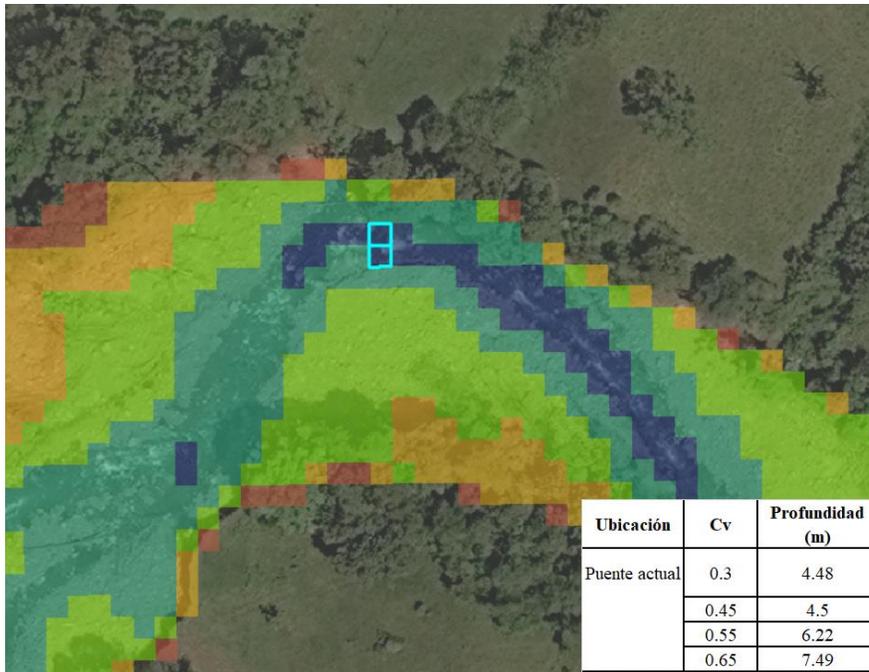


Figura 43. Altura del nivel del agua antes del puente actual.

Otro punto importante para considerar es la casa de máquinas de la central hidroeléctrica. No se tienen datos de la marca del agua ya que fue reconstruida, sin embargo, se sabe que quedó inundada y los testigos reportan que pudo haber llegado a los 2 metros de altura.



Figura 44. Nivel del agua en la casa de máquinas de la central hidroeléctrica.



Figura 45. Altura de alrededor 2 m donde testigos dicen que llegó el agua.

Otro punto a considerar es la planicie de inundación cercana a la represa, donde se recopiló muestra de suelo para el análisis y donde se sufrió inundación, lo cual la modelación debe asegurar que el agua haya alcanzado ese punto. No se conoce la altura a la que el flujo pasó por este lugar ya que nadie presencié el evento. Se puede observar en la Figura 46 que, a ambas concentraciones, llegan a inundar esta planicie.

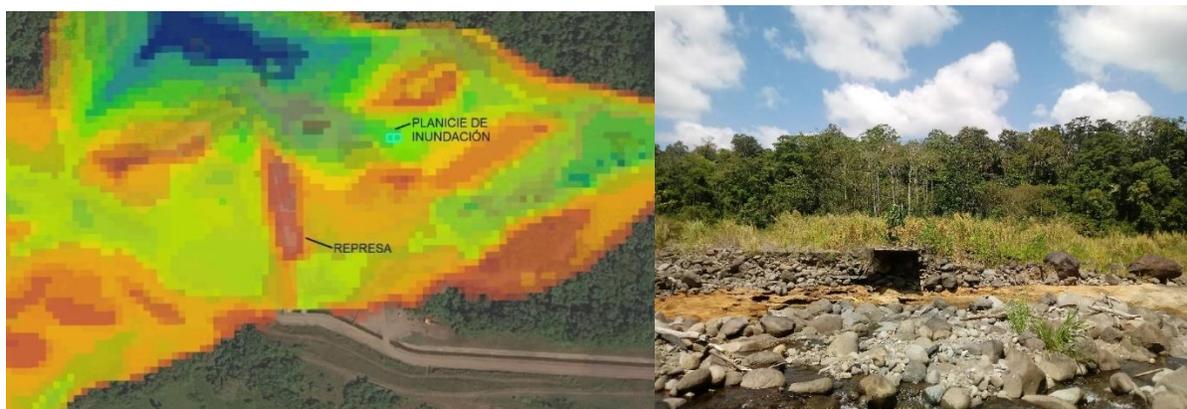


Figura 46. Alturas en la planicie de inundación donde testigos dicen que llegó el agua.

Los testigos dijeron que la presa de la central fue cubierta por la inundación, resultados que sólo la concentración de 0.55 y 0.65 muestran. La concentración de 0.45 sólo muestra una parte cubierta en alrededor 15 metros de largo. En el cuadro 16 se muestra el resumen de los resultados de la verificación en campo.

Cuadro 16. Resumen de verificación del modelo con visita de campo.

Ubicación	Cv	Profundidad (m)
Puente antiguo Figura 42	0.3	2.43
	0.45	1.66
	0.55	3.58
	0.65	10.63
Puente actual Figura 43	0.3	4.48
	0.45	4.50
	0.55	6.22
	0.65	7.49
Casa de máquinas Figura 44	0.3	4.56
	0.45	2
	0.55	2.74
	0.65	4.12
Planicie de inundación Figura 46	0.3	2.43
	0.45	1.66
	0.55	3.58
	0.65	10.63

Además de la visualización de los puntos en campo, se realizó una verificación mediante la imagen satelital confrontando distintos lugares donde el agua pudo haber llegado dada las marcas en el terreno e impresas en la imagen satelital, mostrada en la Figura 47. En el cuadro 17 se puede observar un resumen de los resultados en los puntos analizados.

A un Cv de 0.3 un punto no es inundado cuando la imagen muestra que sí inundó, sin embargo, puntos en concentración mayor a 0.3 muestra que hubo inundación cuando en la imagen parece no haber rastro. Sin embargo, no se puede concluir que en esos puntos no haya pasado agua, alturas de 0.36 m o hasta 1 m pueden no dejar rastro. Alturas mayores a 1.5 m posiblemente si deje rastros y socavación del cauce. Es por esto que se concluye que el flujo tuvo una concentración de sedimentos de entre 0.45 y 0.55 para las condiciones modeladas. Además, el modelo muestra que el Cv a 0.45 tuvo un ingreso de 2.95 millones de m³ de sedimentos y con un Cv de 0.55 un volumen de 3.95 millones de m³. Con los resultados de volumen de deslizamientos calculados anteriormente se acerca a lo estimado por los deslizamientos que tuvo un valor de 4.34 millones de metros cúbicos.

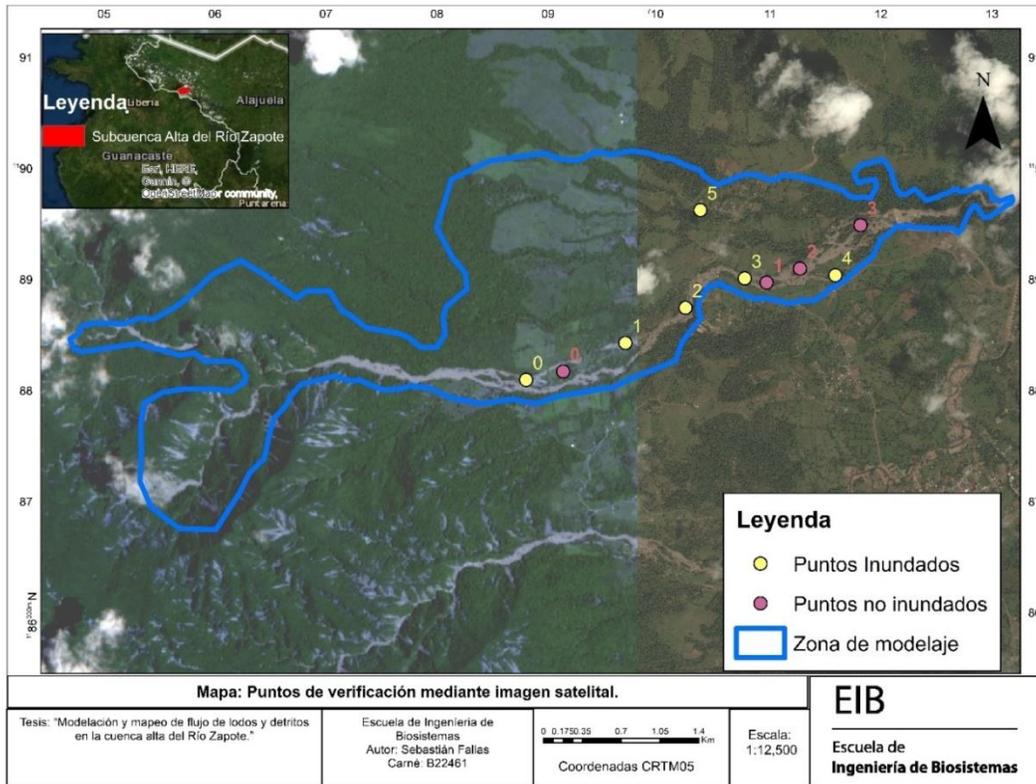


Figura 47. Verificación de zonas de inundación por mapa.

Cuadro 17. Verificación de puntos observables inundados y no inundados por imagen satelital.

CV	Puntos inundado, altura (m)						Puntos no inundados, altura (m)			
	FID						FID			
	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3
0.3	0	1.47	2.44	0.82	0.24	0.17	0	0	0	0.74
0.45	0.52	1.48	2.21	1.52	0.87	2.56	0	0.95	0.36	1.07
0.55	0	2.30	3.55	2.86	2.26	4.23	0	3.02	2.28	1.90
0.65	1.21	2.10	6.51	3.88	2.17	3.72	0	3.93	2.75	4.35

Capítulo 5. Conclusiones

La subcuenca cuenta con altos promedios mensuales de lluvia entre 350 y 400 mm, estos volúmenes de lluvia a lo largo del año pueden provocar saturación de suelos que favorece la escorrentía en el lugar.

El evento del Huracán Otto en cuatro días acumuló 311.4 mm de lluvia alcanzando los promedios mensuales. Los suelos al ser en su mayoría andisoles, favorecen el drenaje del agua, pero la topografía con fuertes pendientes en la zona más alta y una pendiente leve en las partes bajas propicia flujos de alta velocidad.

Los suelos están caracterizados por ser de origen volcánico y de remoción de masas ocasionadas por deslizamientos en las fuertes pendientes de la montaña, lo cual hace propensa la zona del cauce del río a flujos de detritos.

Mediante la imagen satelital se obtuvo un conteo de 127 deslizamientos en la cuenca con un área deslizada de 0.96 km². Los deslizamientos ocurridos durante el evento fueron influenciados por la lluvia excesiva acumulada durante el evento, además de temblores ocurridos en los meses de julio y octubre que dejaron el suelo inestable.

De los 127 deslizamientos contabilizados, 74 contribuyen directamente al cauce principal con un área de aporte de 0.72 km² que, dependiendo del espesor desplazado, se podría tener entre 3.25 a 6.08 millones de metros cúbicos de material aportado.

La lámina máxima del evento fue de 7 mm y una intensidad de 84 mm/hr a las 8 p.m. del 25 de noviembre del 2016, hora aproximada en la que los testigos en la parte alta de la cuenca reportan estruendos en el río.

La modelación hidrológica estimó que el huracán tuvo un caudal pico de 298.3 m³/s, el cual es levemente menor al generado por la precipitación con un período de retorno de 100 años (323.3 m³/s), sin embargo, no se cuenta con un registro de lluvia suficiente para afirmar lo anterior, dadas además las características del huracán Otto.

La comparación de la simulación hidrológica usando el algoritmo del Hydro-Estimator y la estación meteorológica de Bijagua a 1 hora de resolución temporal presenta una subestimación del 28.61% del caudal pico.

El volumen total de escorrentía generado fue de 199.35 mm para el Hydro-Estimator, mientras que la simulación con la estación meteorológica presentó 172.34 mm, con una diferencia del 15.67%.

Existe un desfase de 3 horas en los tiempos al caudal pico del evento entre las simulaciones del Hydro-Estimator y la estación meteorológica, sin embargo, el segundo caudal pico generado por el Hydro-Estimator coincide con el pico generado por la modelación de la estación meteorológica.

El método del Hydro-Estimator se ve afectado por altas temperaturas en el tope de las nubes, lo cual es común en zonas tropicales, sin embargo, su desempeño demuestra ser muy útil en zonas con poca cobertura de estaciones meteorológicas prediciendo el comportamiento del caudal en río con una tendencia a la subestimación.

Los caudales y las velocidades generadas con la simulación hidráulica con flujo Newtoniano no fue lo suficientemente intensa para producir el desastre sucedido en la zona.

La verificación del modelo hidráulico mostró mejores resultados con valores de concentración de sedimentos entre 0.45 a 0.55, principalmente en la casa de máquinas de la represa de CoopeGuanacaste, el antiguo puente y la verificación visual de la fotografía aérea.

El puente nuevo que se construyó que comunica el pueblo de Zapote con Bijagua presenta una elevación de rodaje seguro ya que ninguna de las concentraciones de sedimentos con un periodo de retorno de 100 años llega a la altura donde éste se localiza.

Mediante un análisis de ANOVA se obtiene que existen diferencias significativas en los valores de las diferencias promedio de profundidad del agua con cada uno de los escenarios hidráulicos con diferentes concentraciones de sedimentos. Sin embargo, no existen diferencias significativas en las diferencias de las profundidades del agua generadas por el evento del huracán Otto y la modelación del periodo de retorno de 100 años tanto para flujo Newtoniano como no Newtoniano, indicando que la inundación generada por el huracán Otto se aproxima a un periodo de retorno de 100 años.

Las modelaciones con flujo de detritos impactan incrementando la velocidad del fluido y la profundidad de la inundación aumentando la peligrosidad y el efecto destructivo de estos flujos.

El evento del Huracán Otto presentó un incremento en área de categoría “peligrosidad alta” de 0.3 km^2 a 1.28 km^2 para la modelación con flujo Newtoniano y una concentración volumétrica de sedimentos de 0.45, respectivamente, o de 1.62 km^2 para una concentración Cv de 0.55.

La modelación hidráulica con lluvia de un periodo de retorno de 100 años presenta un área de 0.33 km^2 con categoría de peligrosidad alta modelada con flujo Newtoniano y 0.82 km^2 con un Cv de 0.45 y en el caso del Cv 0.55 se genera un área de 1.77 km^2 .

Es relevante empezar a incluir en las modelaciones hidráulicas bidimensionales diferentes concentraciones de sedimentos volumétricas para predecir y anticipar el comportamiento de las inundaciones en áreas propensas a deslizamientos y flujo de detritos debido a los incrementos importantes en profundidades de flujo, velocidades y área de peligrosidad de categoría alta, donde el poder destructivo es alto y afecta a personas y estructuras.

El modelo de FLO-2D muestra buenos resultados y se recomienda para el uso de modelaciones de flujo de detritos cuando se cuenta con topografía de alta calidad donde se represente adecuadamente las secciones transversales del río y las planicies de inundación.

Capítulo 6. Recomendaciones

Se recomienda una recopilación de muestras y alturas de inundación post-evento, para conocer las características del flujo de sedimentos.

Instrumentar adecuadamente la cuenca con estaciones meteorológicas principalmente en la zona alta cerca del cráter si existe acceso y espacio disponible y seguro para su colocación. Además, estaciones limnigráficas, recomendablemente en la represa de CoopeGuanacaste, ya que esta cuenta con infraestructura adecuada para su colocación. Estas mejorarían estudios posteriores de eventos extremos que ocurran en el lugar y favorecen la calibración de los modelos.

Se recomienda revalorar la magnitud del evento cuando se cuente con un registro de los datos de lluvia lo suficientemente longevo para estimar la lluvia para un periodo de retorno de 100 años.

Un estudio más detallado en propiedades reológicas del suelo como pruebas de viscosidad y esfuerzo cortante mejoraría la obtención de los parámetros del flujo de detritos. Así como aumentar el muestreo de suelo de los deslizamientos, ya es esto estuvo limitado por el acceso a los lugares de los deslizamientos y el tiempo transcurrido post evento.

Se recomienda realizar modelaciones en otro software bidimensional, de esta manera, se podría comparar los resultados de FLO-2D con otros modelos numéricos y comprobar cual aproxima mejor las planicies inundables.

Además, se podrían crear más escenarios en FLO-2D como el rompimiento de la represa de CoopeGuanacaste, represamientos generados por deslizamientos en la parte alta del río, modificaciones en la n de Manning, tipo de sedimento, número de Courant, número de Froude y escenarios de caudales de entrada para analizar la sensibilidad del modelo.

Se recomienda tener un programa de monitoreo de zonas con alto riesgo a deslizamientos con información topográfica de alta resolución que capture el antes y después de un deslizamiento, lo que facilitaría la precisión en el estudio de aporte de sedimentos volumétrico mejorando el conocimiento de la concentración del sedimento dentro del modelo hidráulico.

Se recomiendan los mapas generados en este trabajo de graduación como una guía para definir las planicies susceptibles a eventos extremos, mejorando la evacuación y preparación del evento, ayudaría a salvar más vidas, así como para la elaboración de planes de ordenamiento territorial.

Realizar diseño y evaluación de estructuras Sabo y/o quiebra- gradientes en FLO-2D para la mitigación del impacto de la inundación y el transporte de escombros principalmente en la zona de la represa de CoopeGuanacaste, localizada 1.07 km aguas arriba de la salida del modelo.

Anexos.

Anexo 1. Distribución granulométrica de las muestras de suelo tomadas en el lugar.

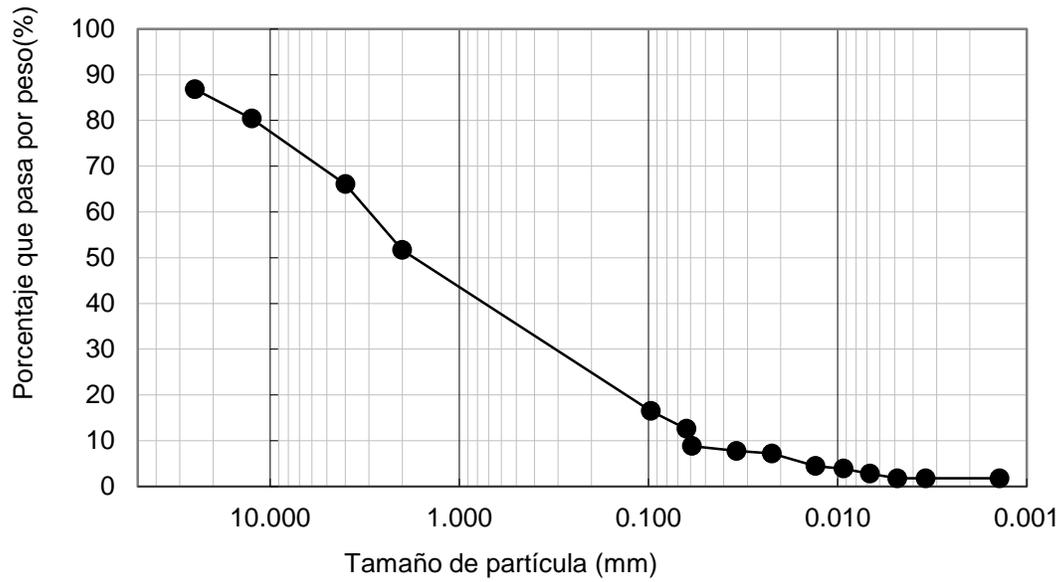


Figura 48. Resultados de la prueba granulométrica para la Toma 2 (Planicie de inundación).

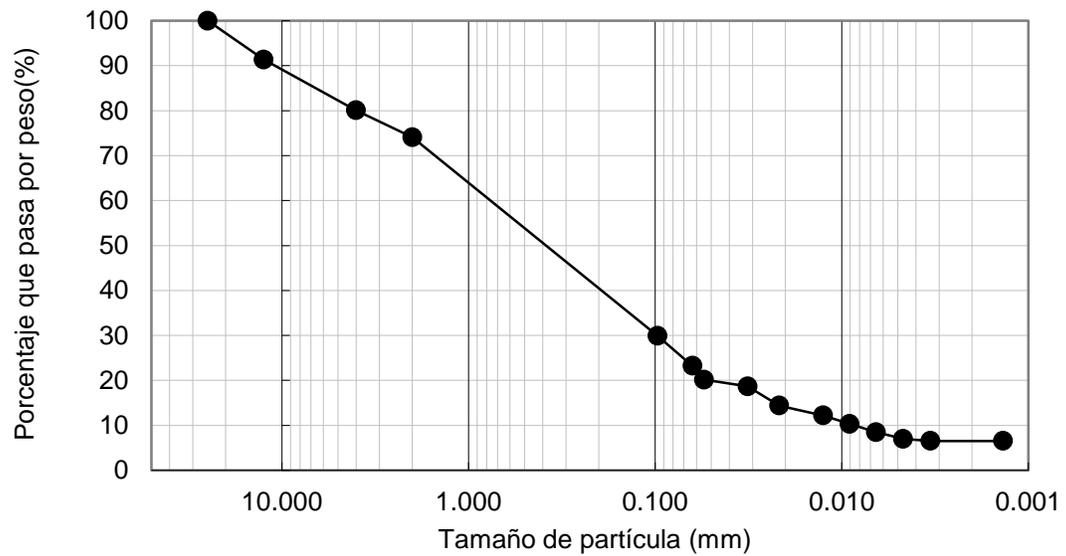


Figura 49. Resultados de la prueba granulométrica para el Canal 1 (Toma en el canal del río).

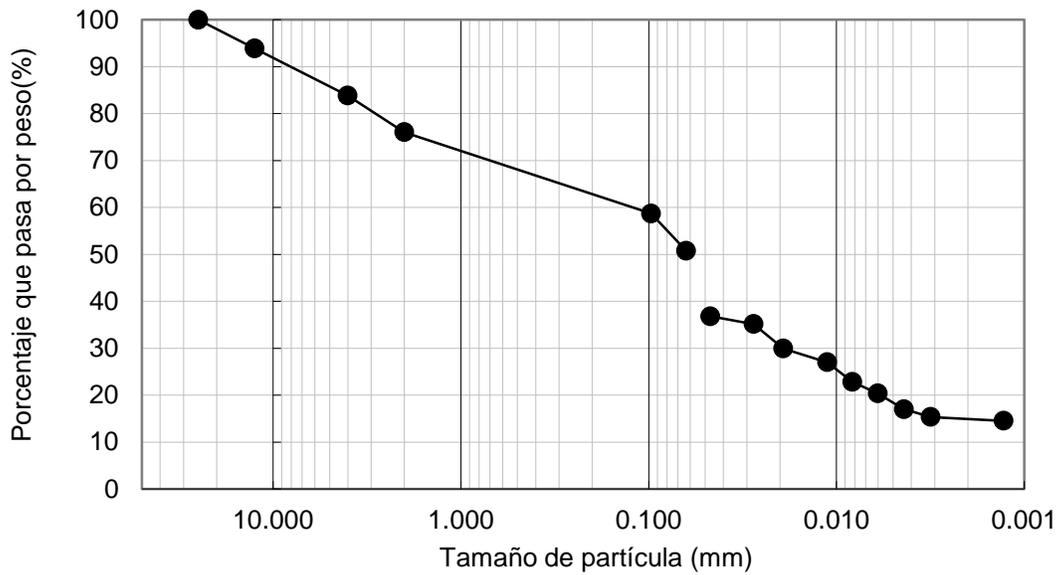


Figura 50. Resultados de la prueba granulométrica para el Banco 1 (Banco izquierdo aguas abajo en el río).

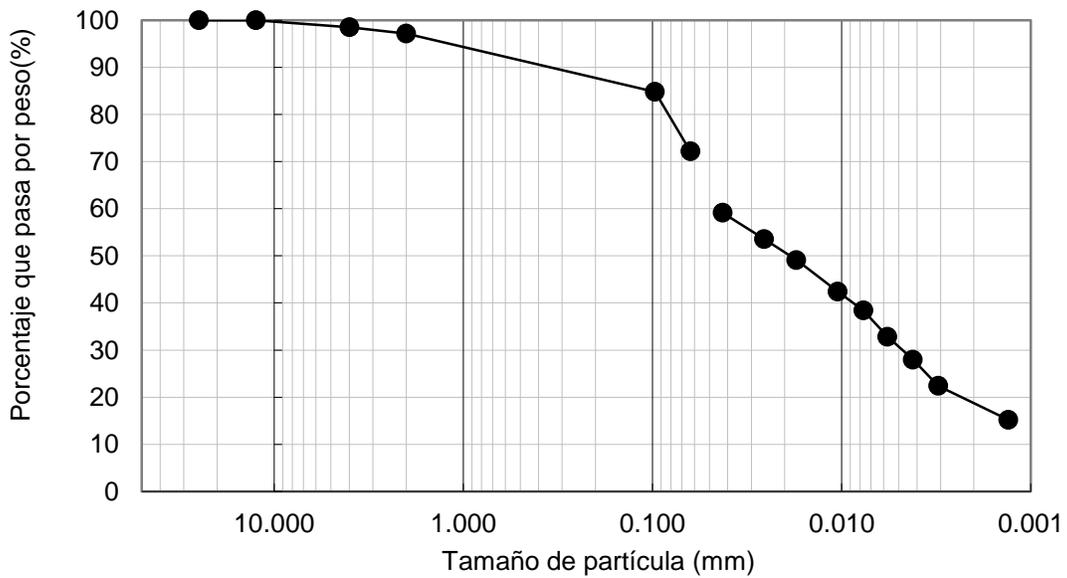


Figura 51. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 20 (Lecho del río a 20 cm de profundidad).

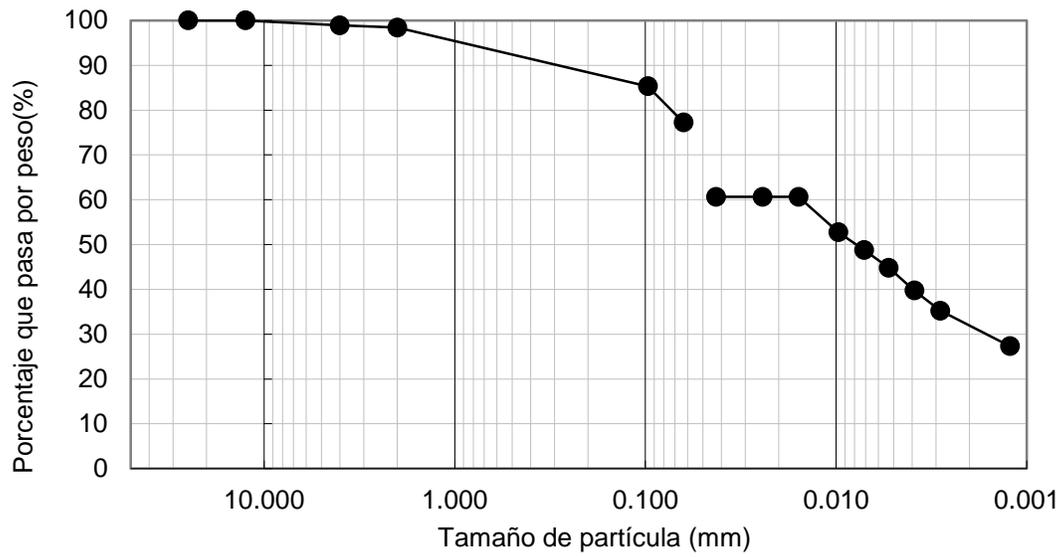


Figura 52. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 30 (Lecho del río a 30 cm de profundidad).

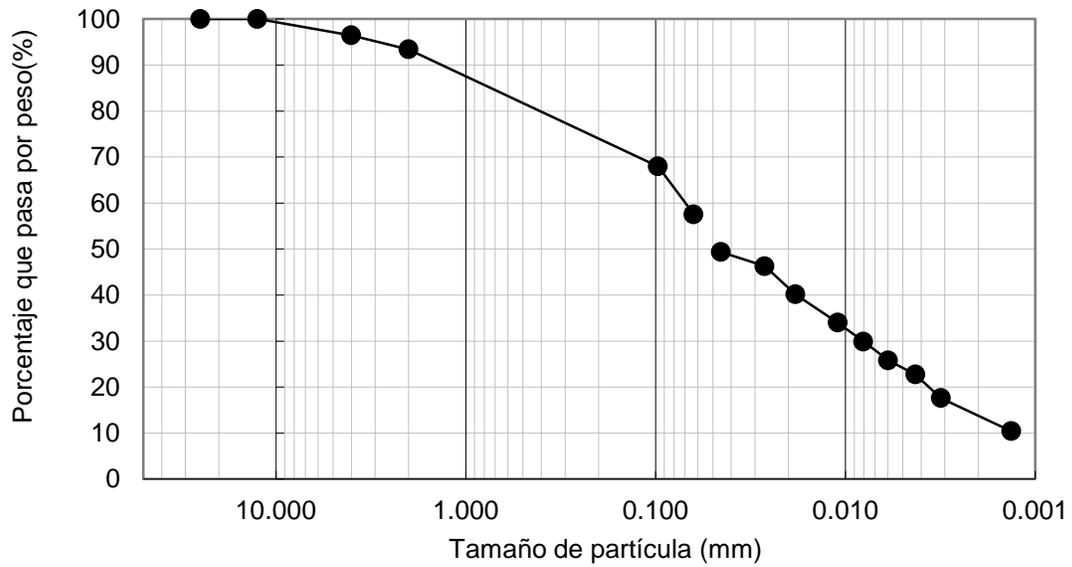


Figura 53. Resultados de la prueba granulométrica para el Lecho 60 (Lecho del río a 20 cm de profundidad).

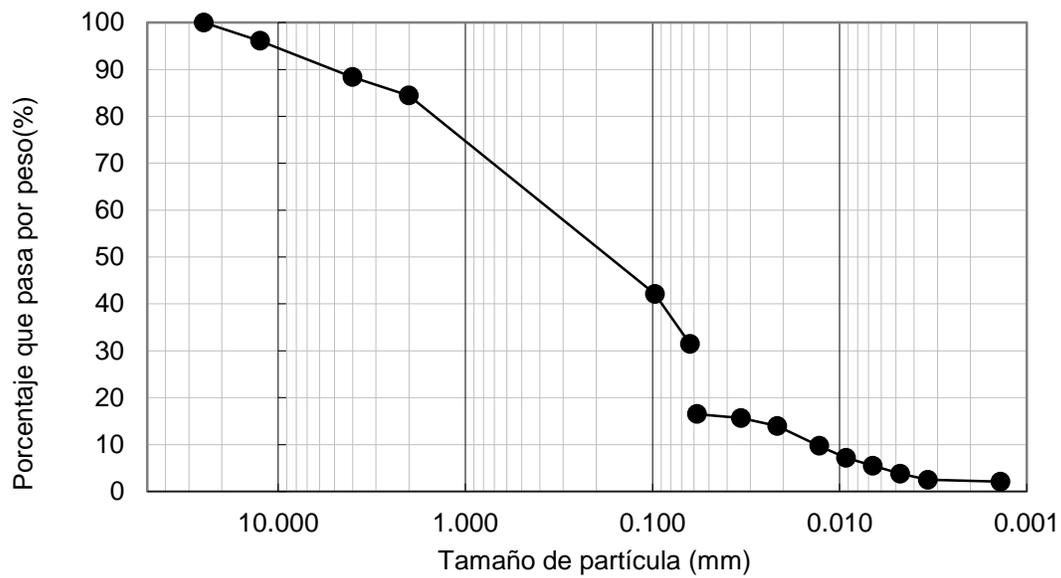


Figura 54. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 20 (Planicie de inundación en la represa a 20 cm de profundidad)

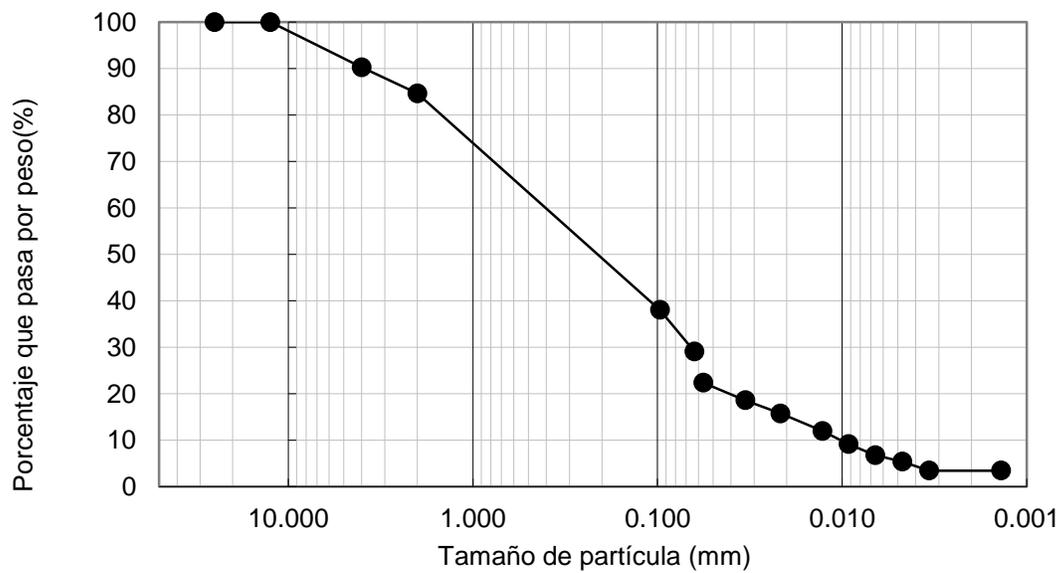


Figura 55. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 30 (Planicie de inundación en la represa a 30 cm de profundidad).

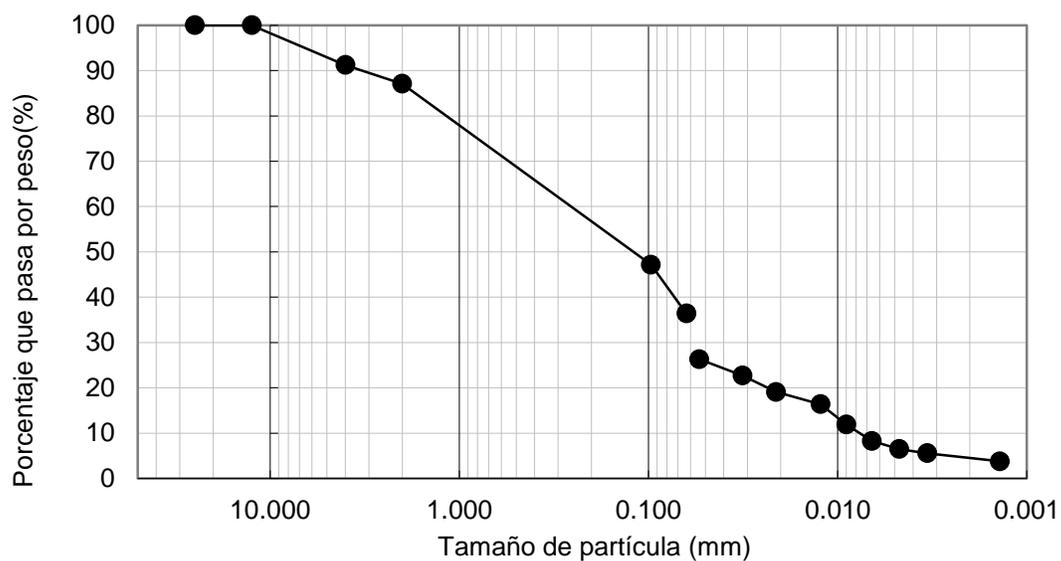


Figura 56. Resultados de la prueba granulométrica para la Represa 60 (Planicie de inundación en la represa a 60 cm de profundidad).

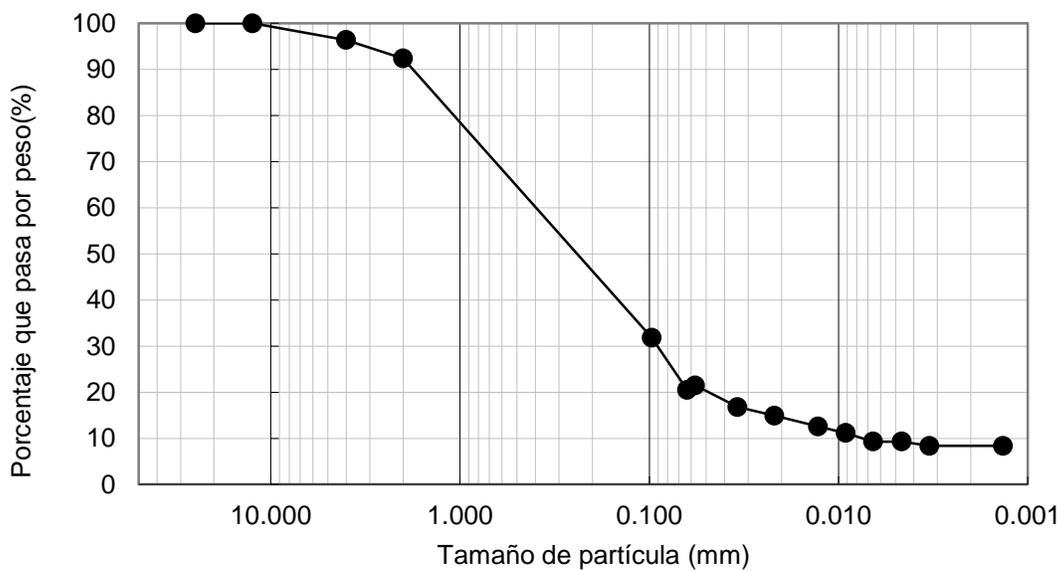


Figura 57. Resultaos de la prueba granulométrica para la Toma 4 (Planicie de inundación).

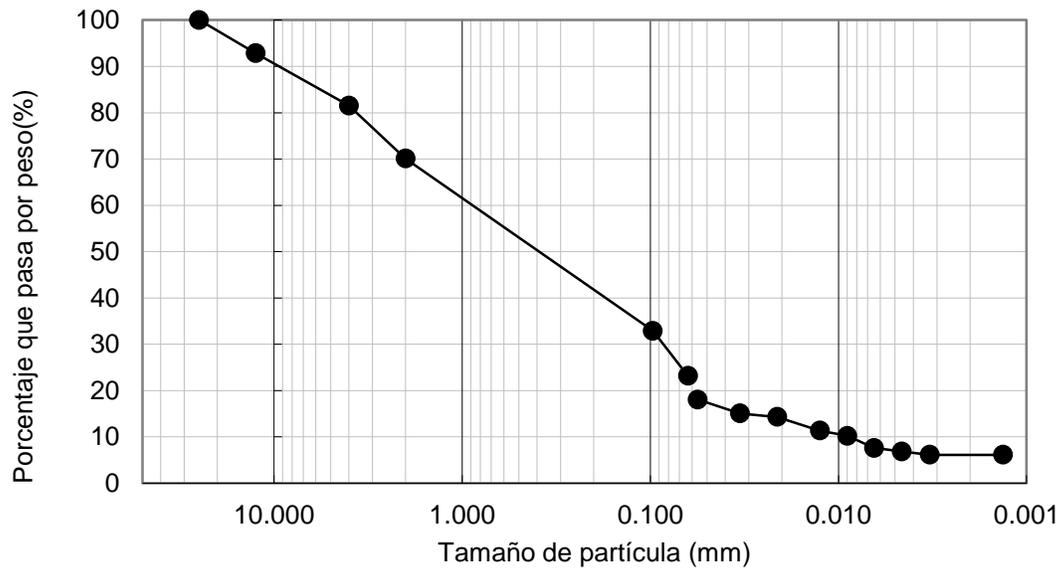


Figura 58. Resultados de la prueba granulométrica para la Toma 3 (Planicie de inundación).

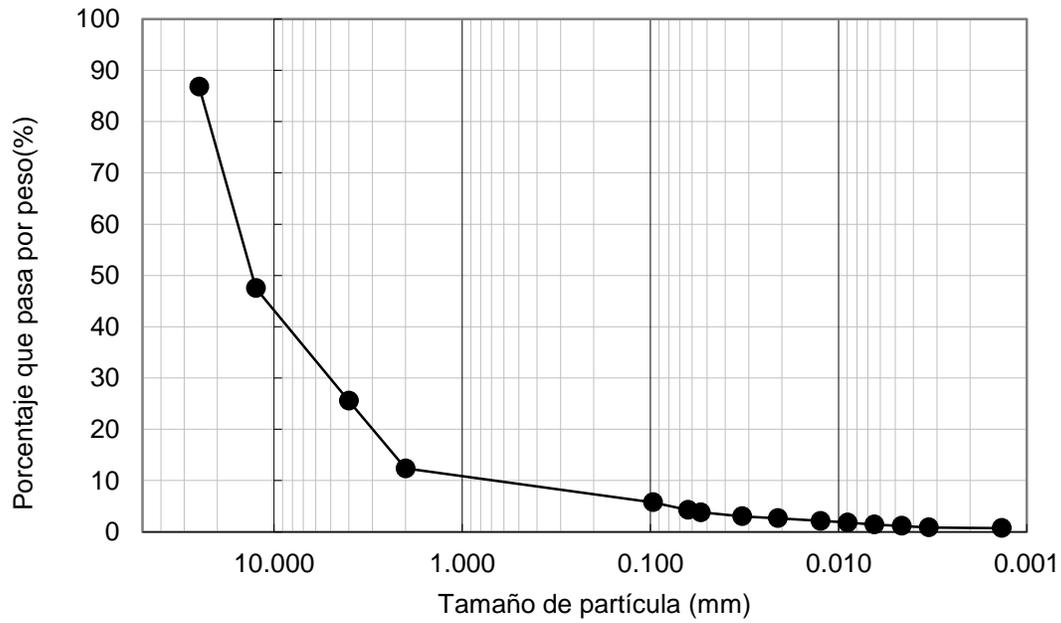


Figura 59. Resultados de la prueba granulométrica para el BD2 (Banco derecho aguas abajo).

Anexo 2. Hidrogramas de salida de la modelación hidrológica en HEC-HMS para las subcuencas 7, 14, 13.

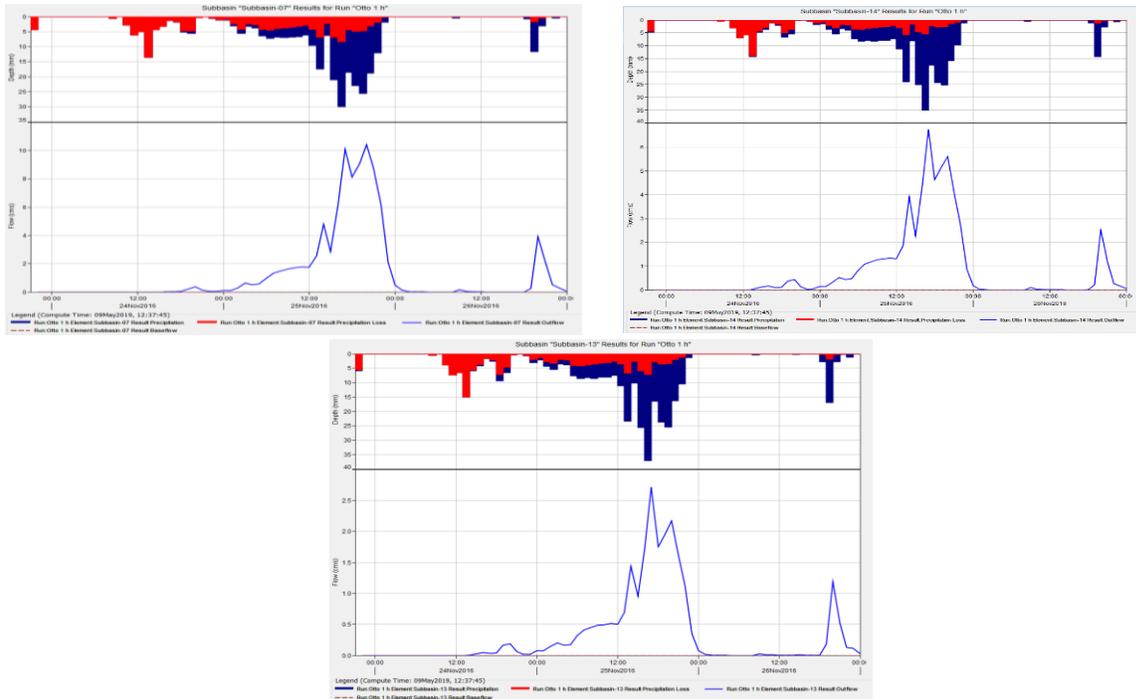


Figura 60. Hidrogramas de salida del Hydro-Estimator.

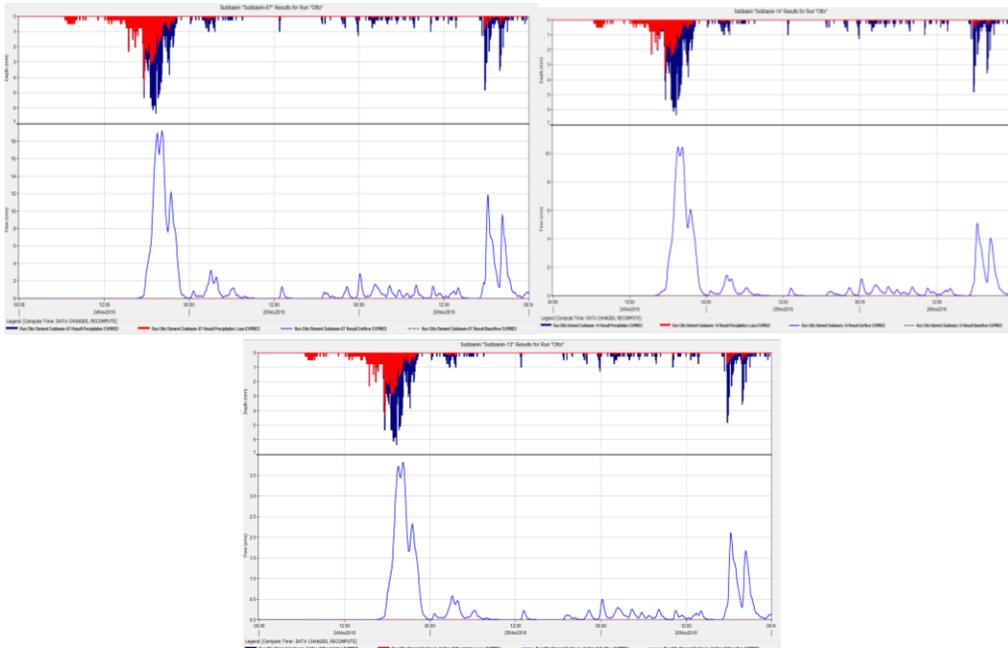


Figura 61. Hidrogramas de salida del huracán Otto.

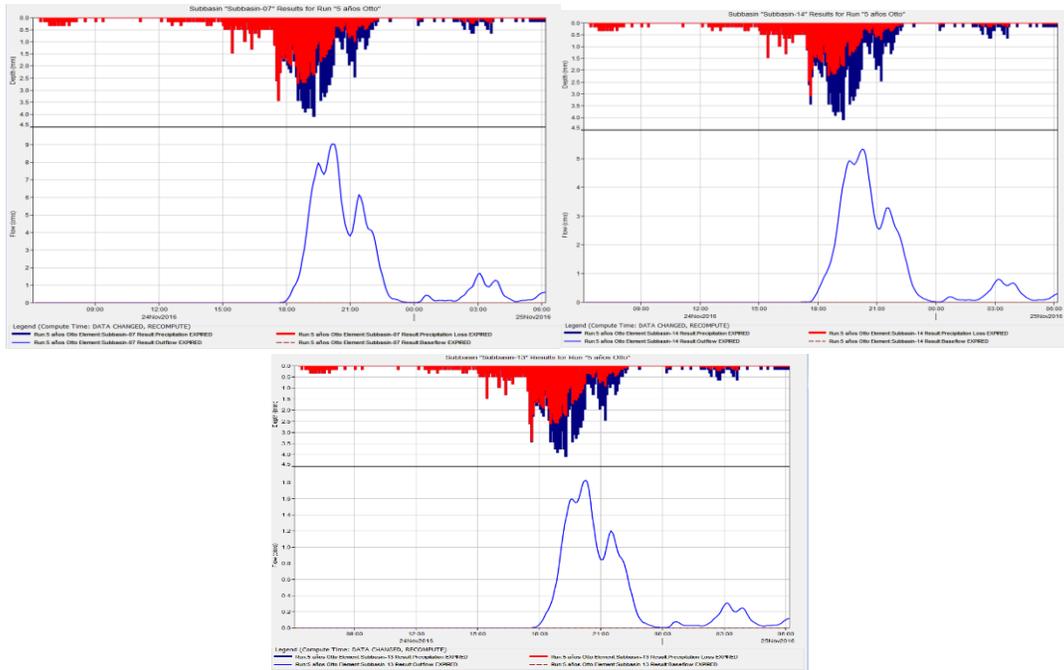


Figura 62. Hidrogramas de salida para 5 años de periodo de retorno.

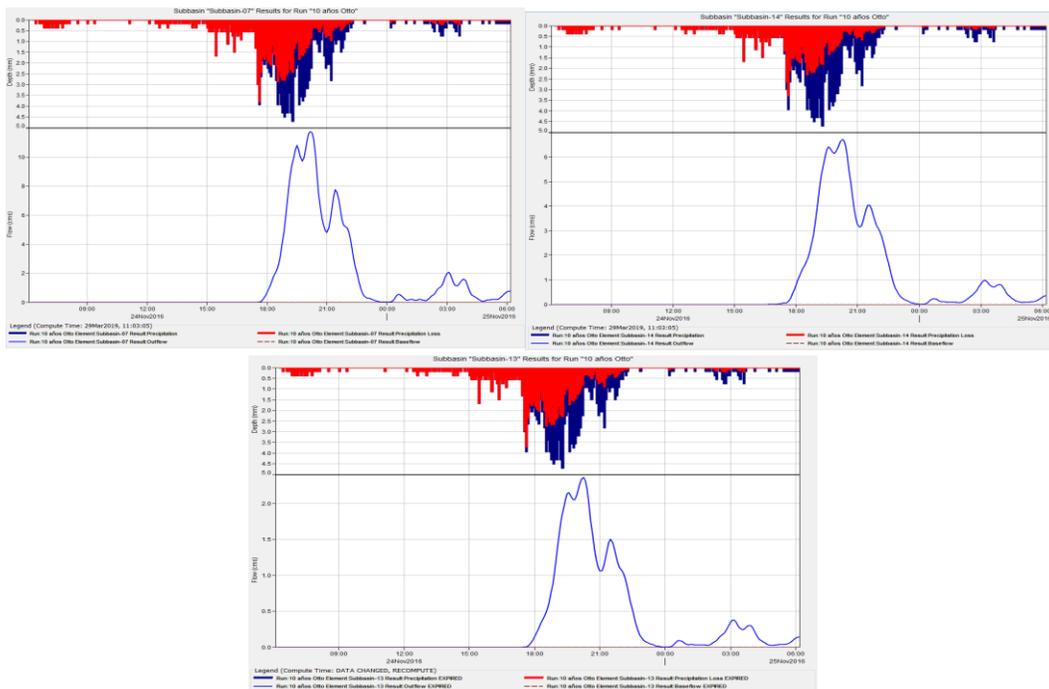


Figura 63. Hidrogramas de salida para 10 años de retorno.

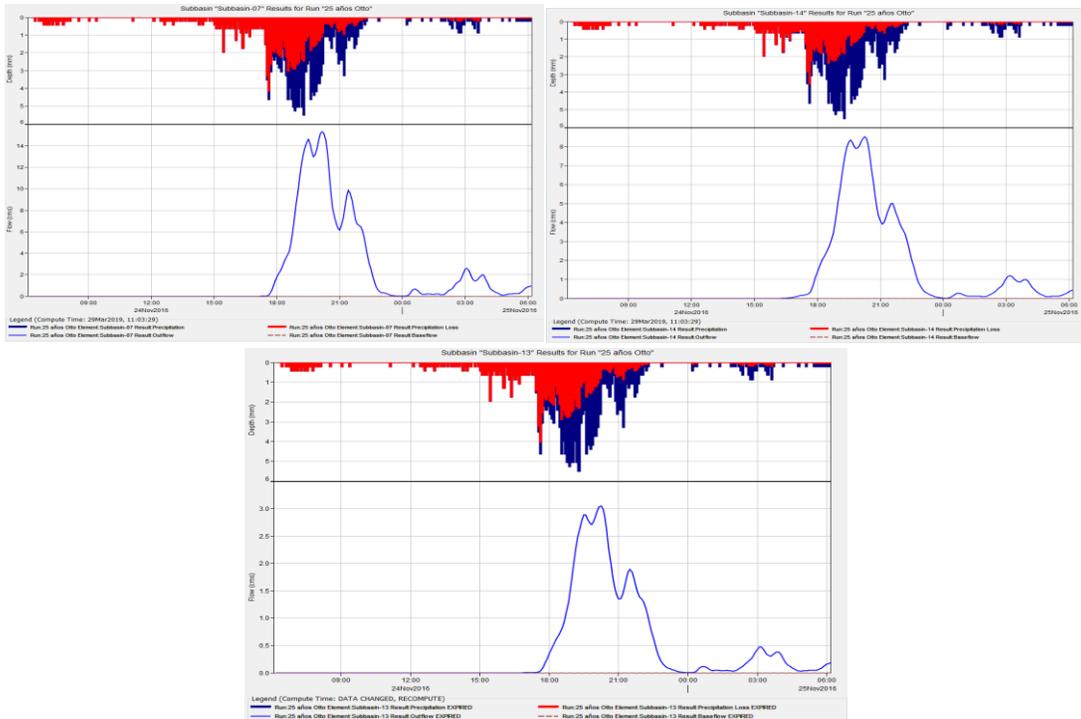


Figura 64. Hidrogramas de salida para 25 años de periodo de retorno.

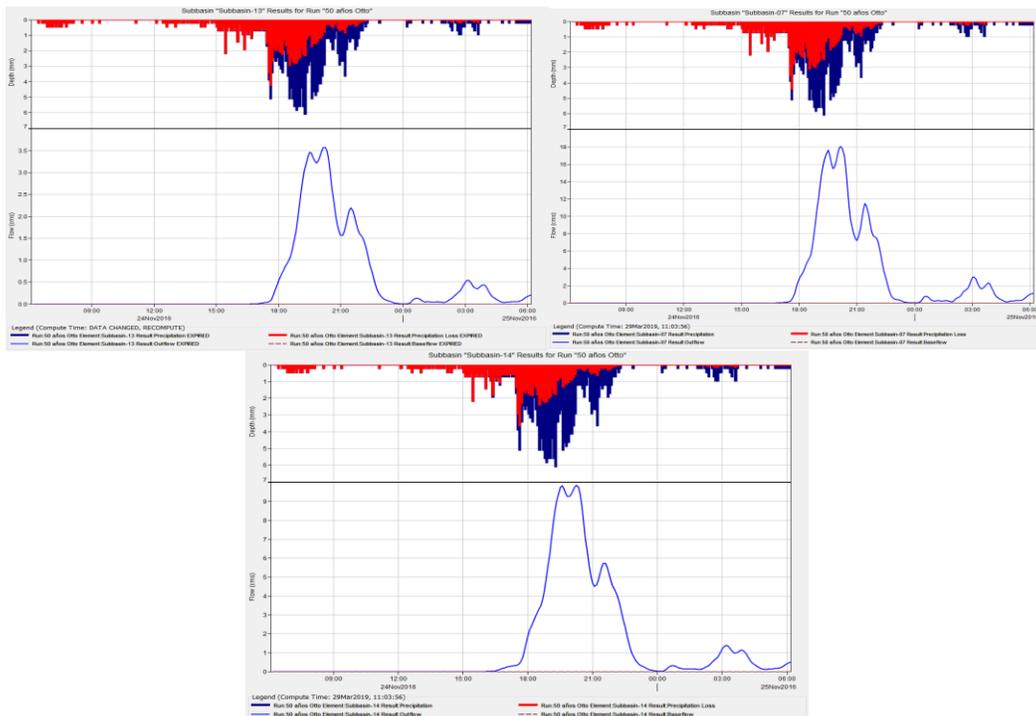


Figura 65. Hidrogramas de salida para 50 años de periodo de retorno.

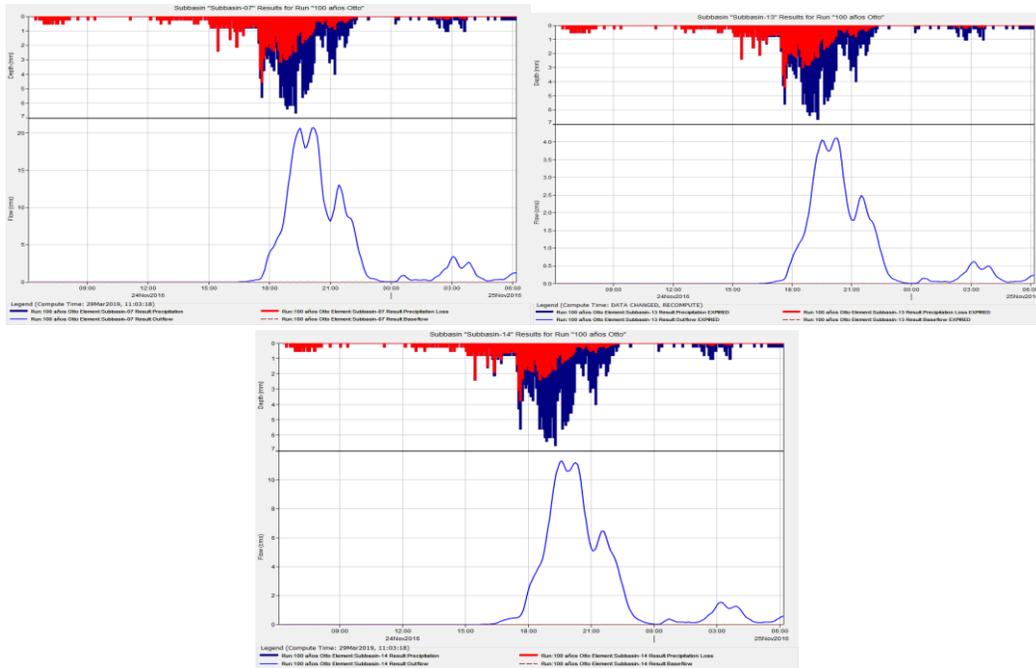


Figura 66. Hidrogramas de salida para 100 años de periodo de retorno.

Anexo 3. Pruebas de laboratorio.



Figura 67. Prueba de Bouyoucos para la muestra en el lecho del río a 20 cm, en la etapa de separación de sedimento.

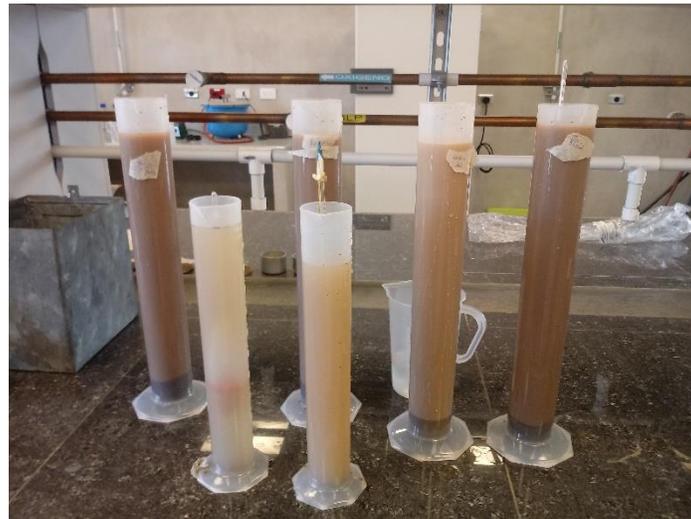


Figura 68. Prueba de Bouyoucos para la muestra BD2 en la etapa de separación de sedimento.



Figura 69. Muestra de suelo de Banco 1 después del último secado en la prueba de granulometría posterior al tamizado para ser pesado.



Figura 70. Muestra de suelo retenida en el tamiz No. 40 en el proceso de tamizado.



Figura 71. Prueba de límite de Atterberg para la muestra en planicie de inundación de la represa a 60 cm de profundidad.

Anexo 4. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad para cada uno de los escenarios hidráulicos planteados.

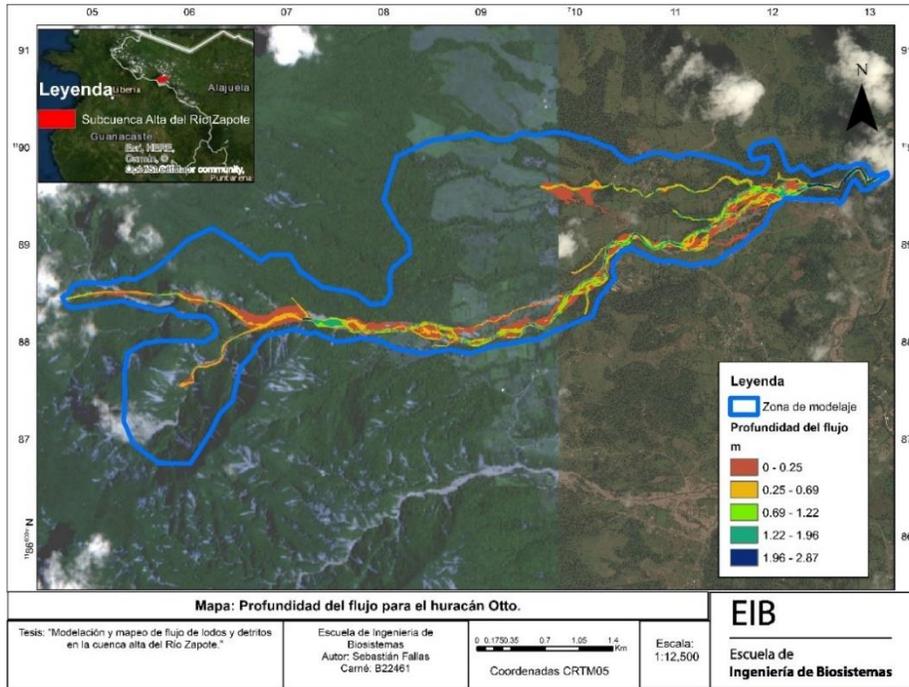


Figura 72. Profundidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.

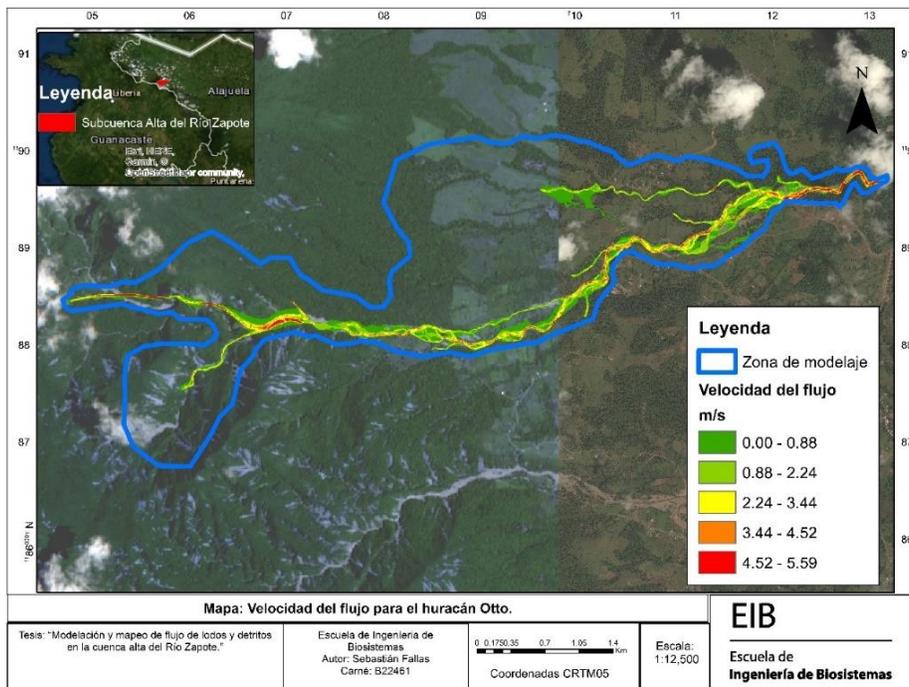


Figura 73. Velocidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.

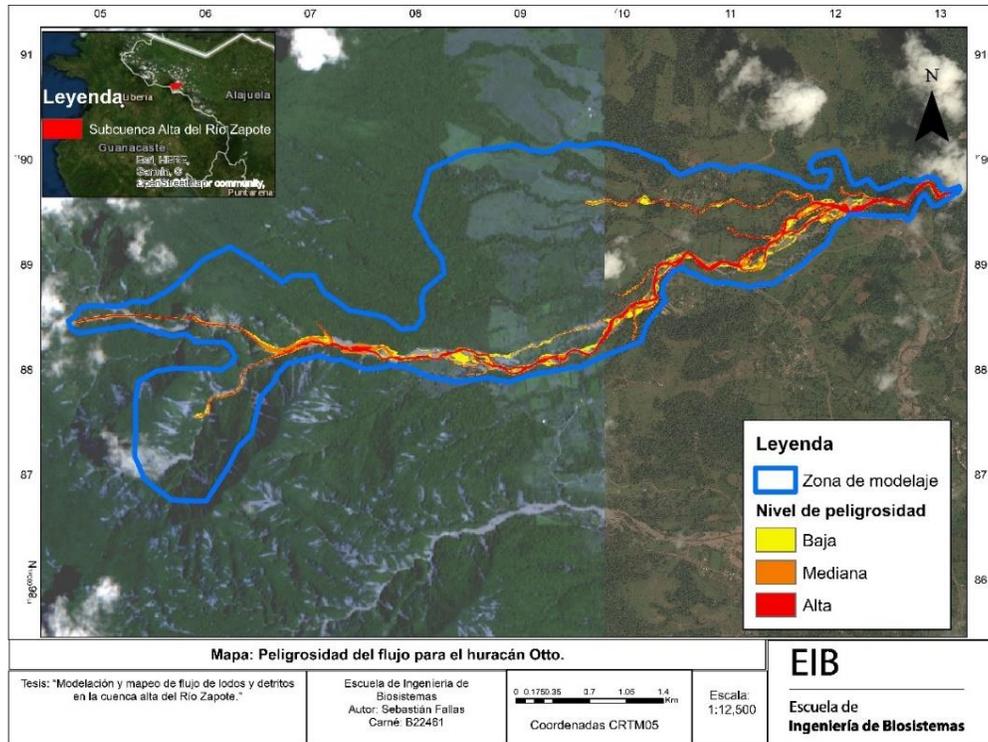


Figura 74. Peligrosidad de flujo para el huracán Otto con agua limpia.

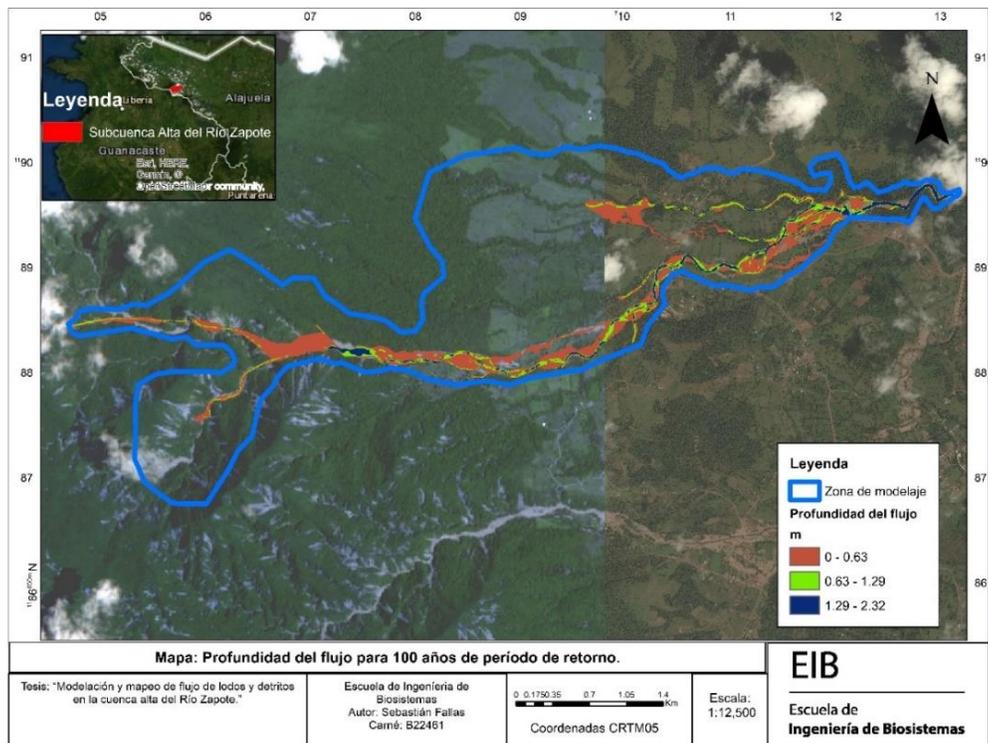


Figura 75. Profundidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.

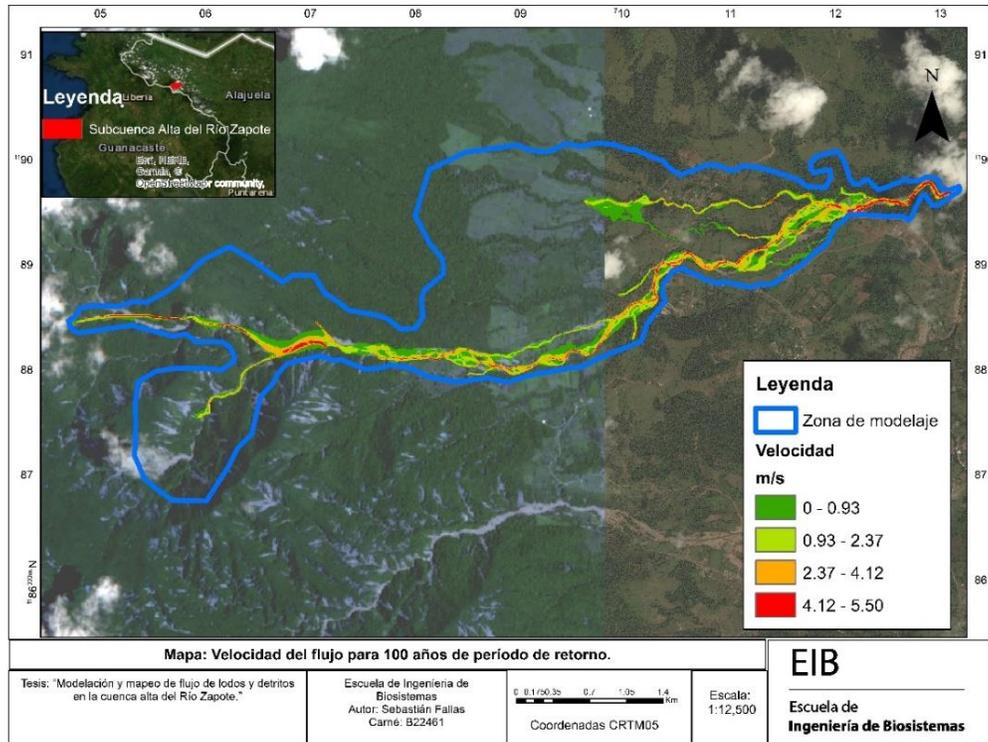


Figura 76. Velocidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.

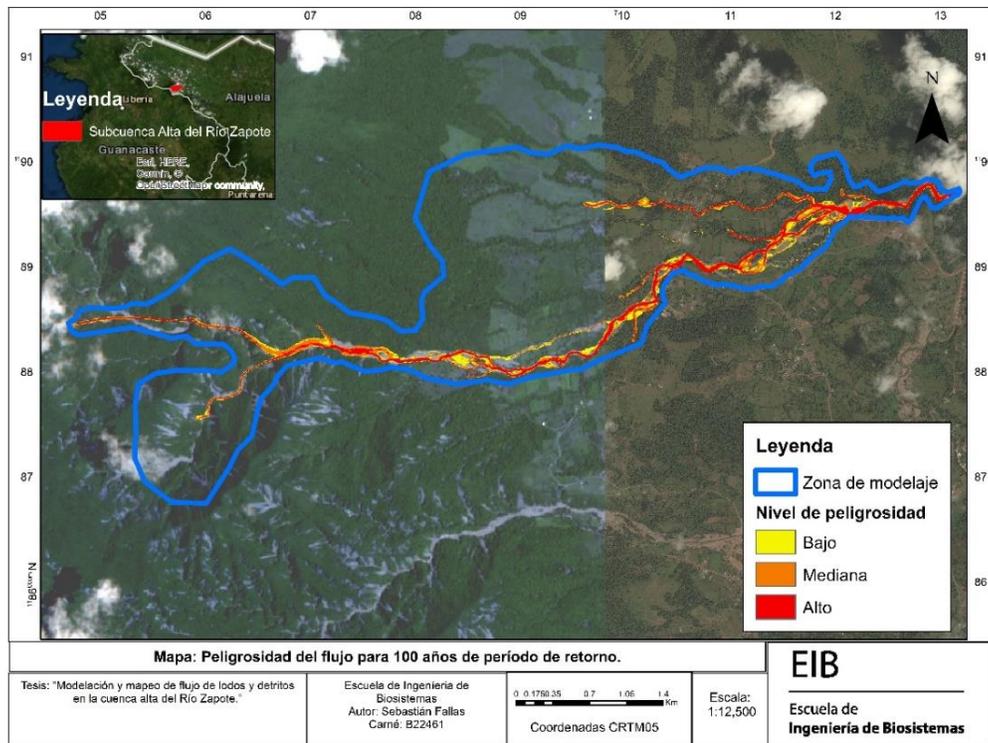


Figura 77. Peligrosidad de flujo para 100 años de período de retorno con agua limpia.

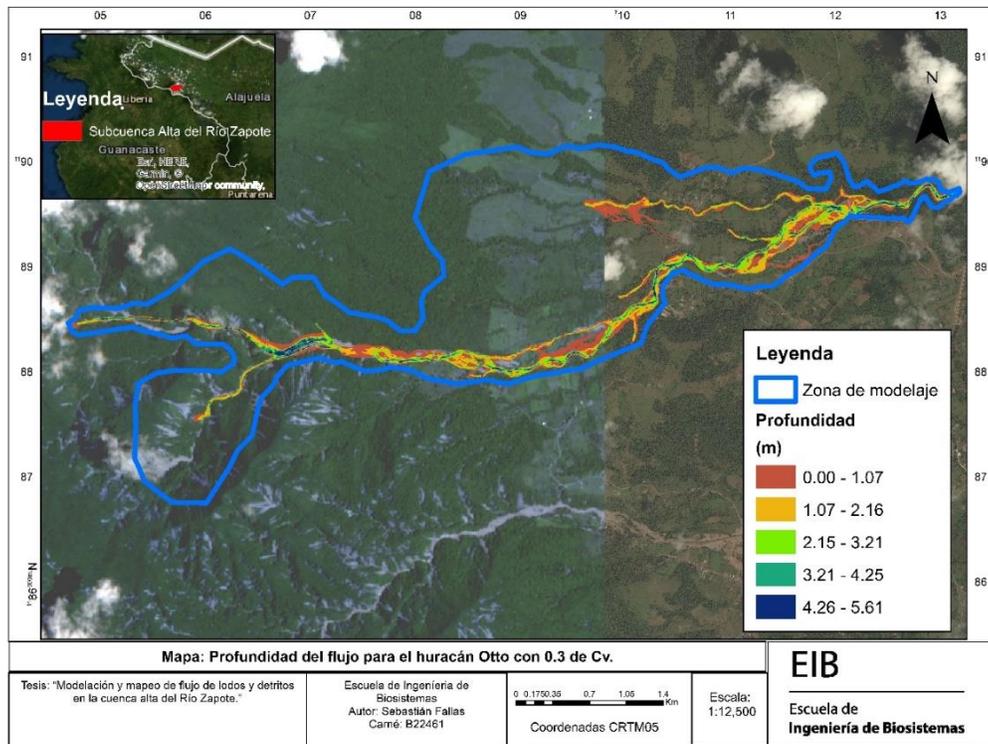


Figura 78. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.

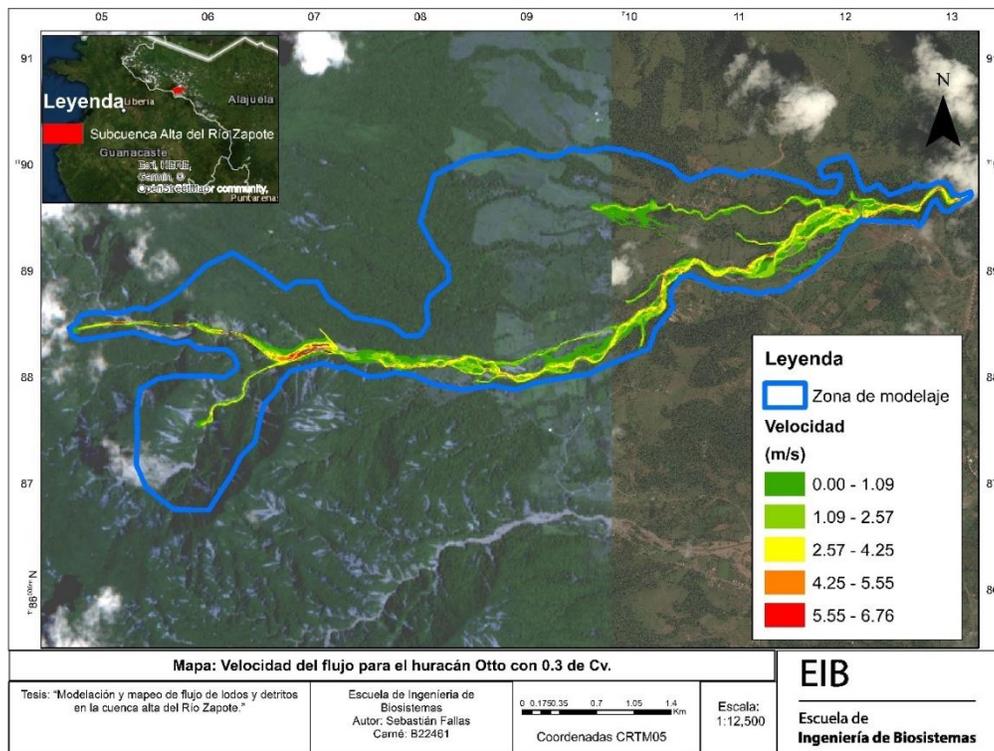


Figura 79. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.

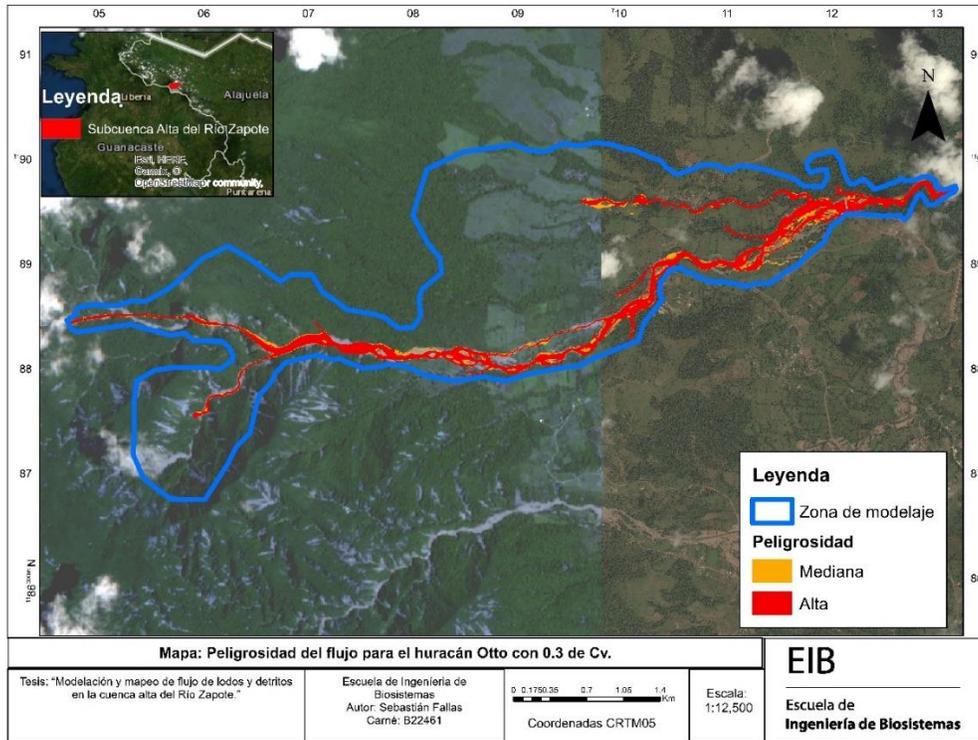


Figura 80. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.3.

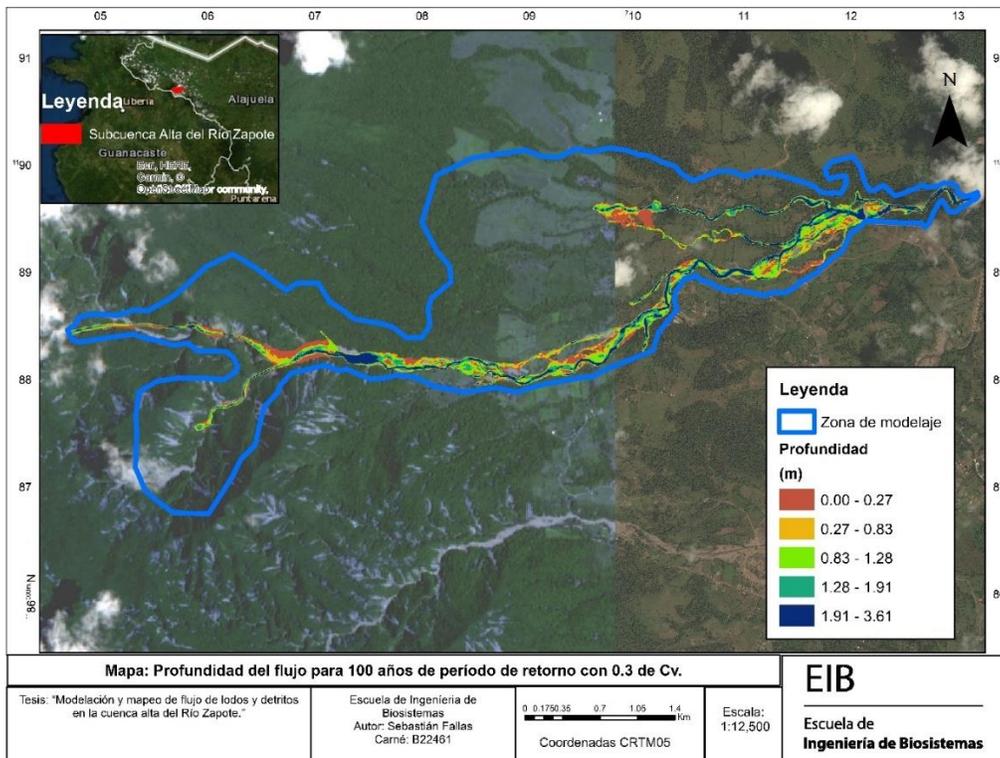


Figura 81. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.

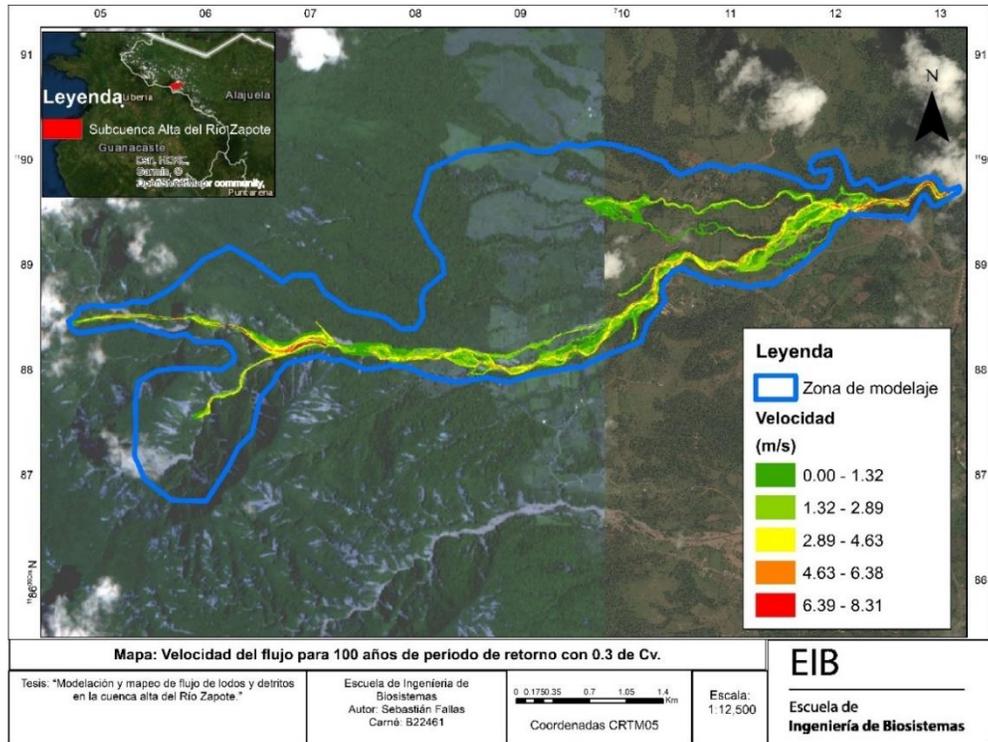


Figura 82. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.

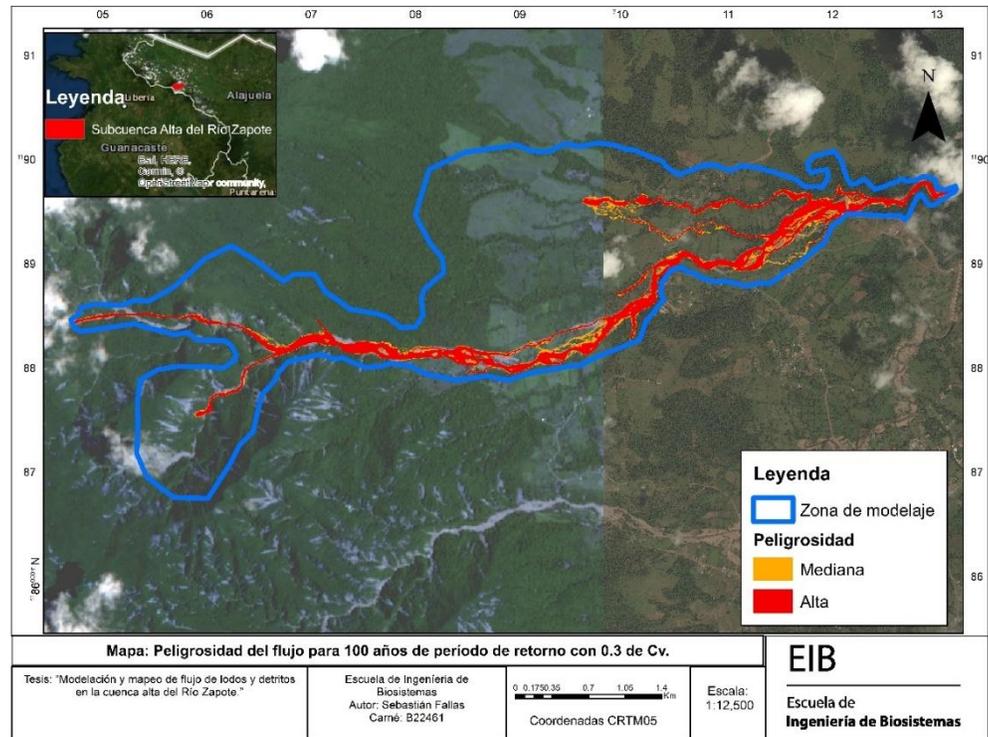


Figura 83. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.3.

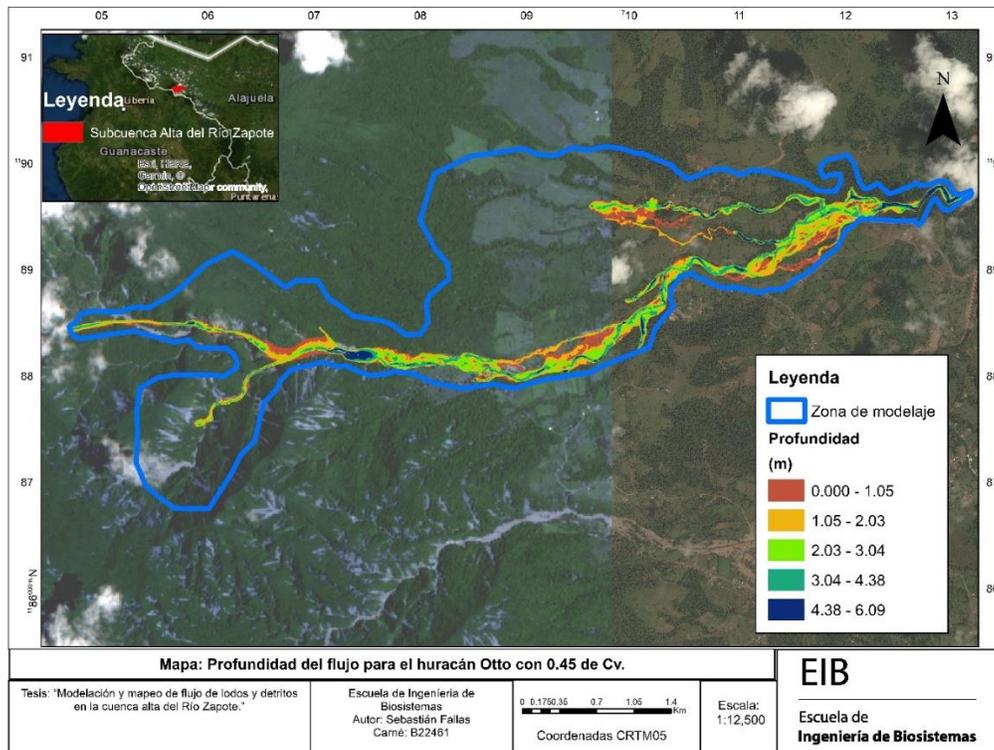


Figura 84. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.

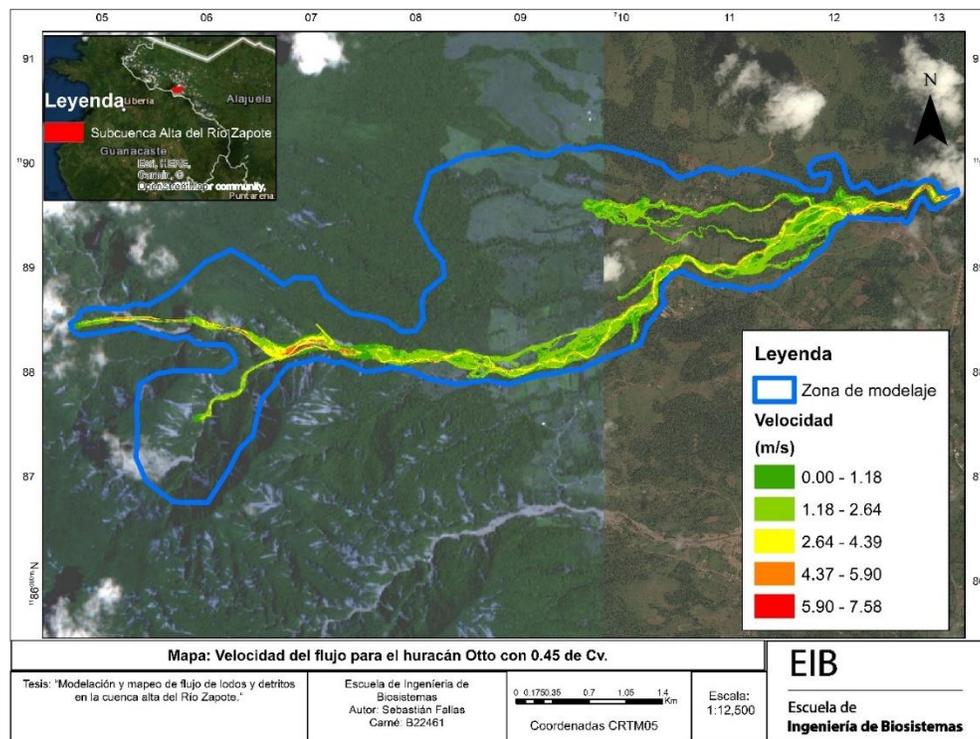


Figura 85. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.

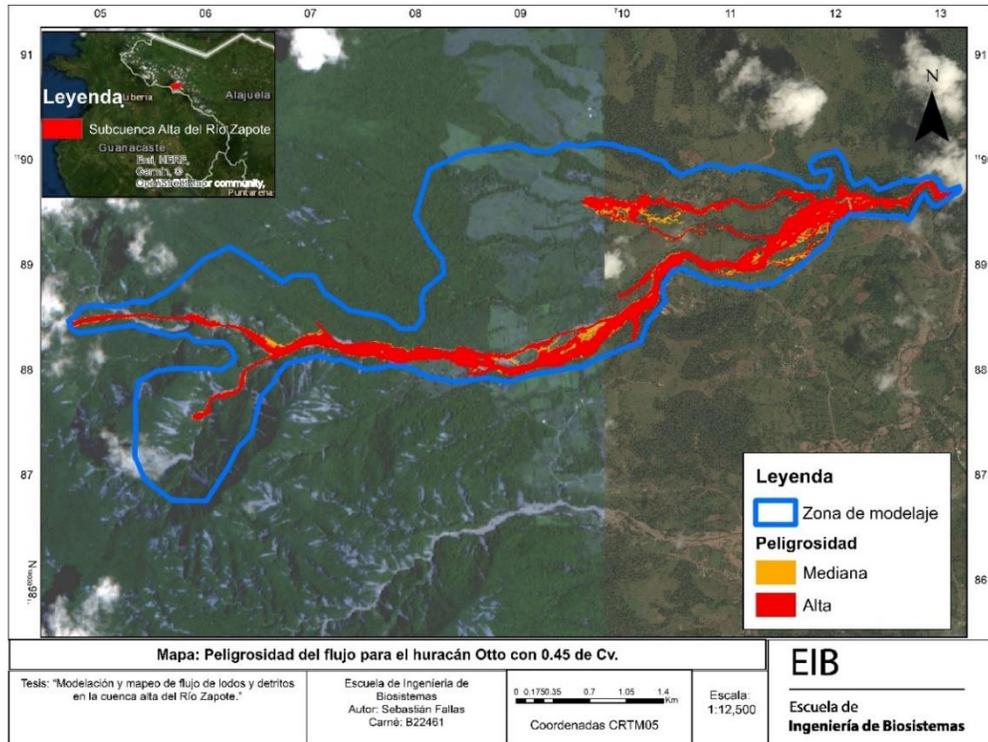


Figura 86. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.45.

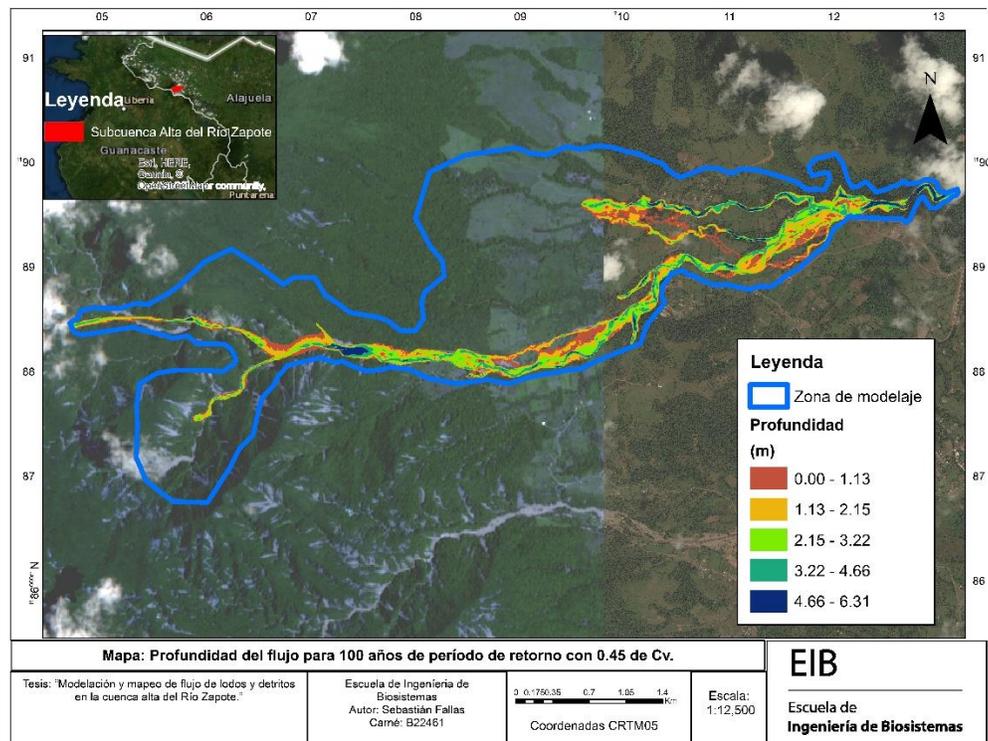


Figura 87. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.

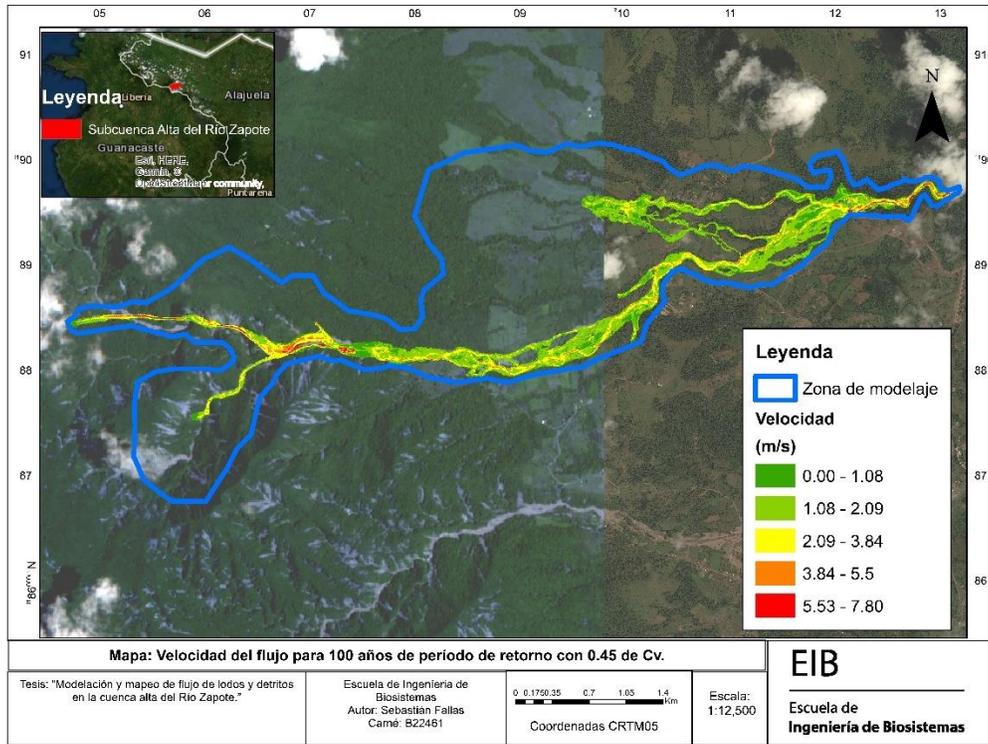


Figura 88. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.

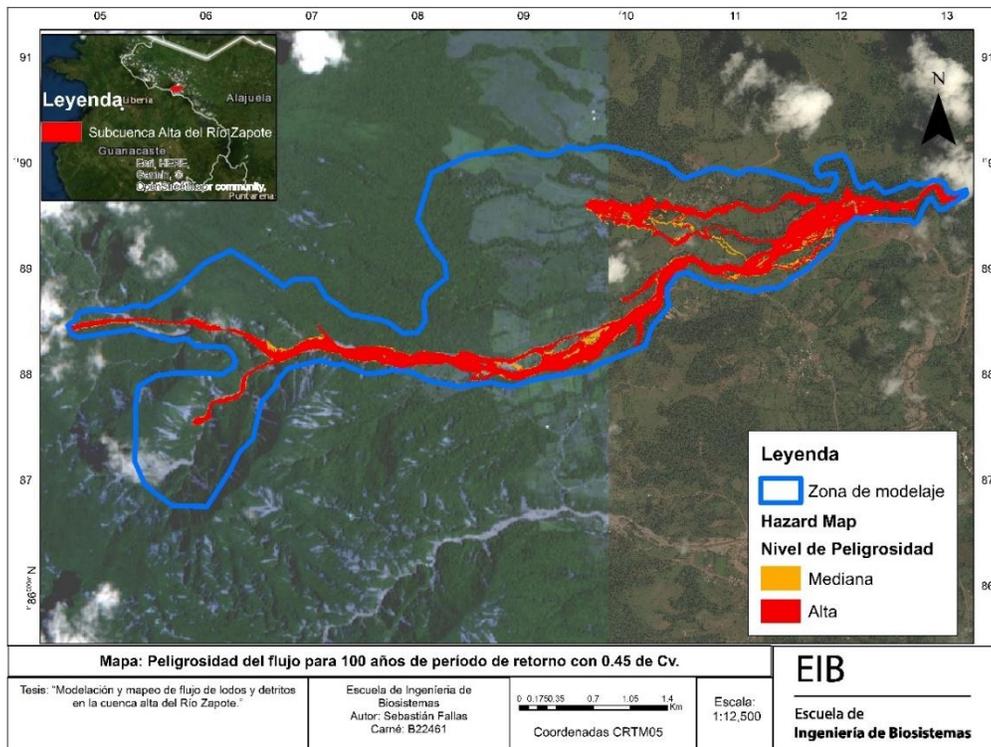


Figura 89. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.45.

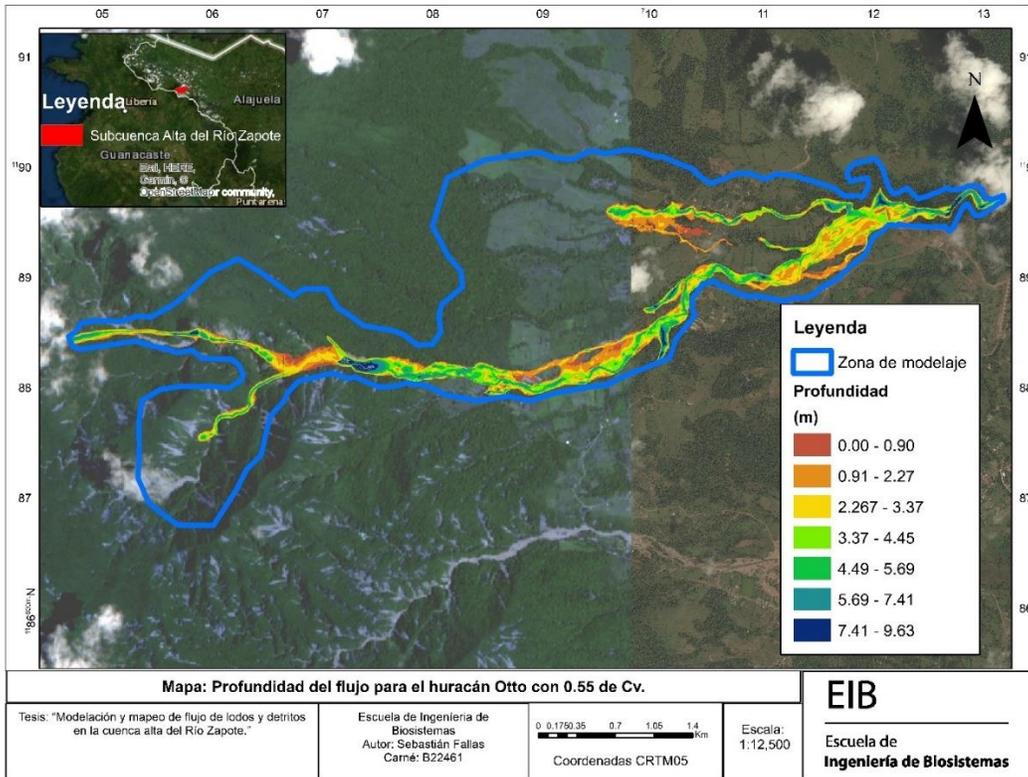


Figura 90. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.

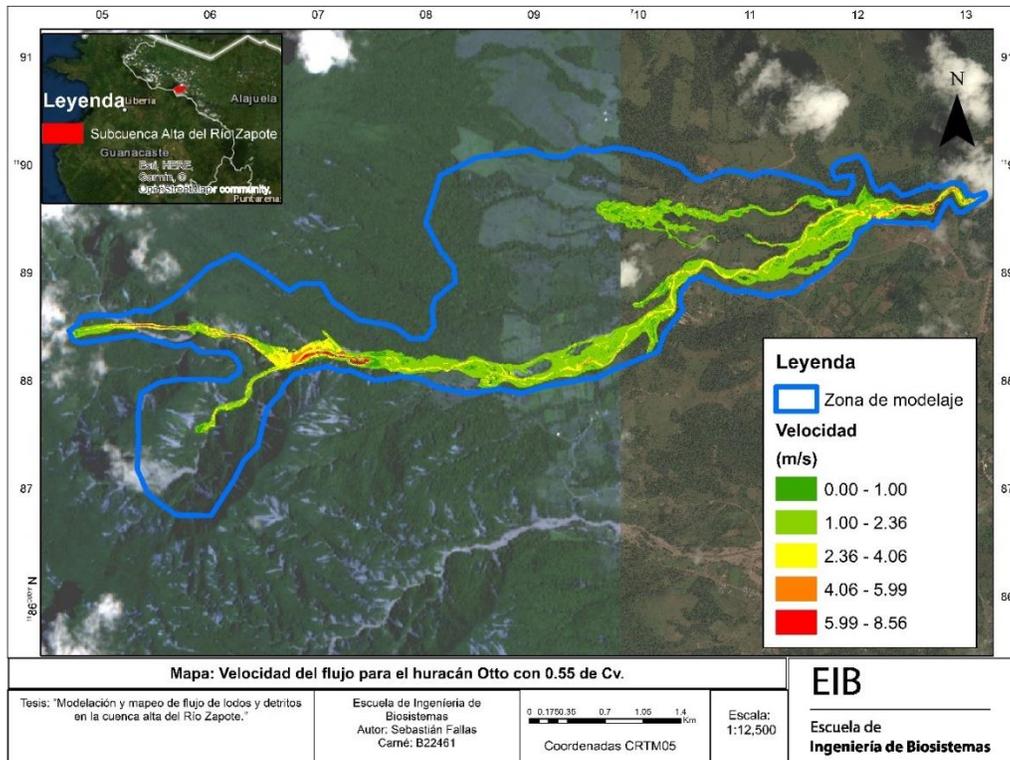


Figura 91. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.

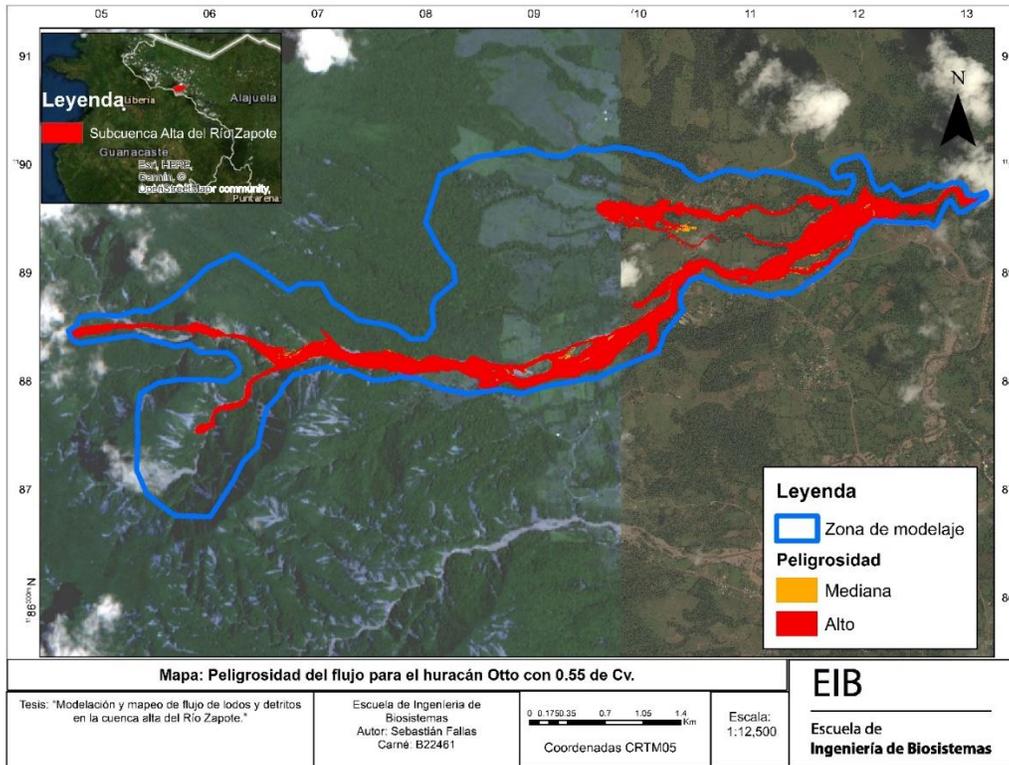


Figura 92. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.55.

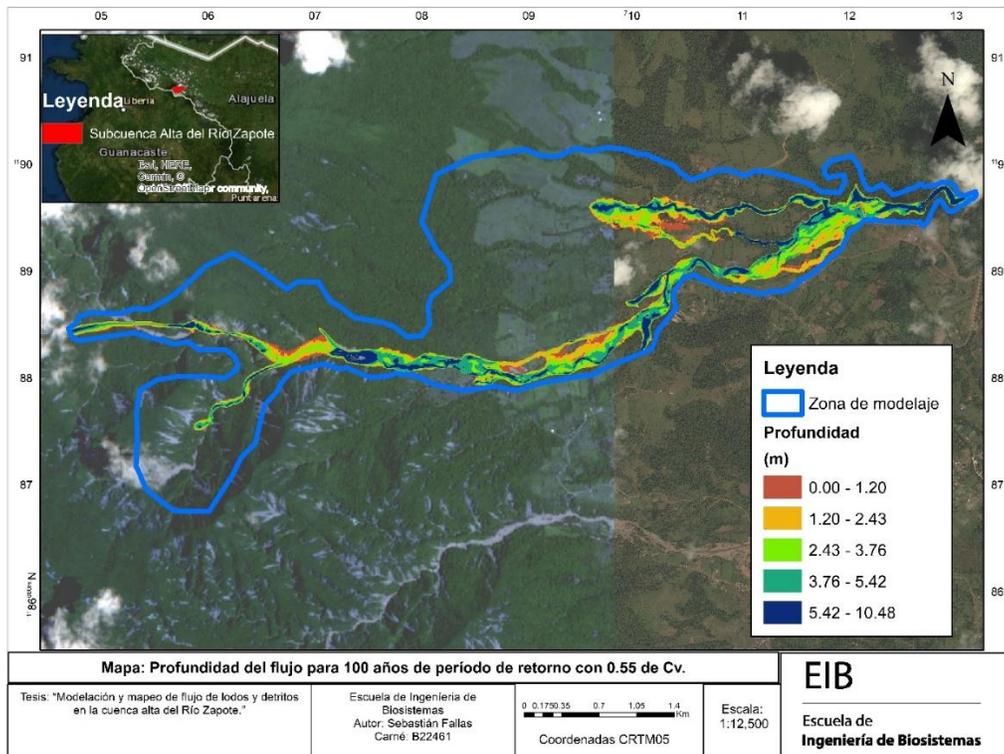


Figura 93. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.

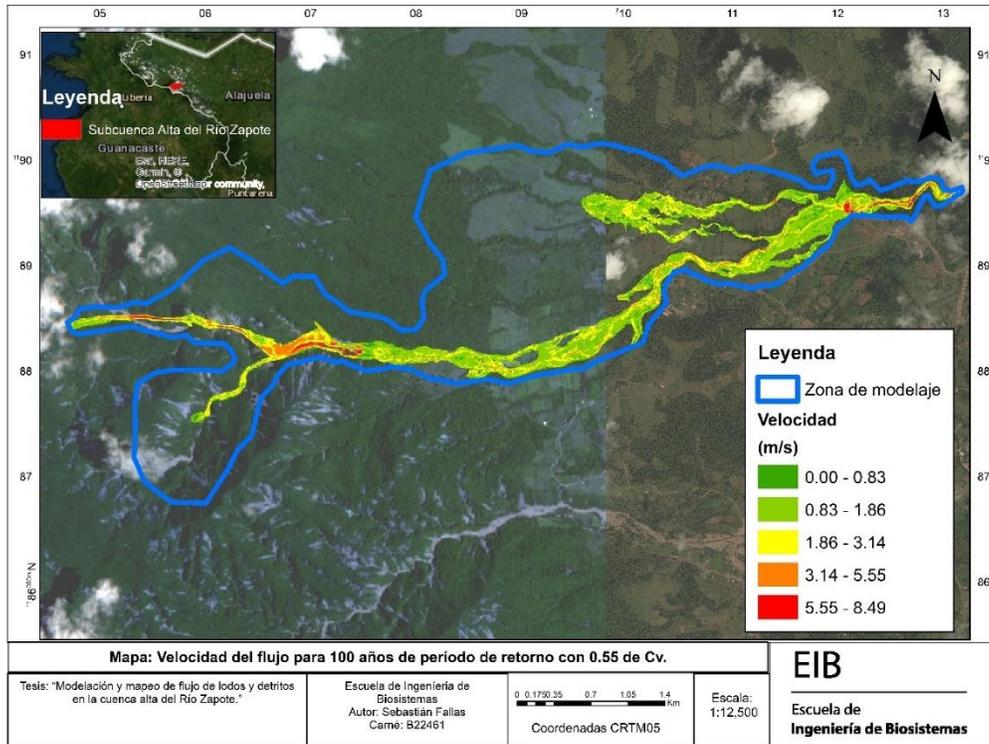


Figura 94. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.

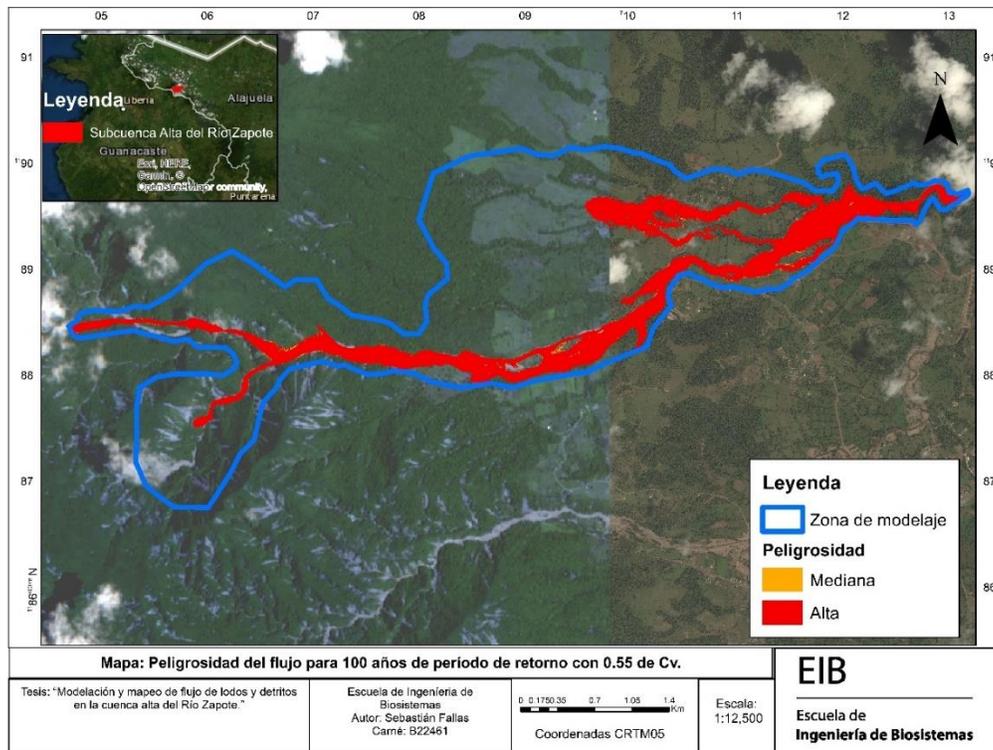


Figura 95. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.55.

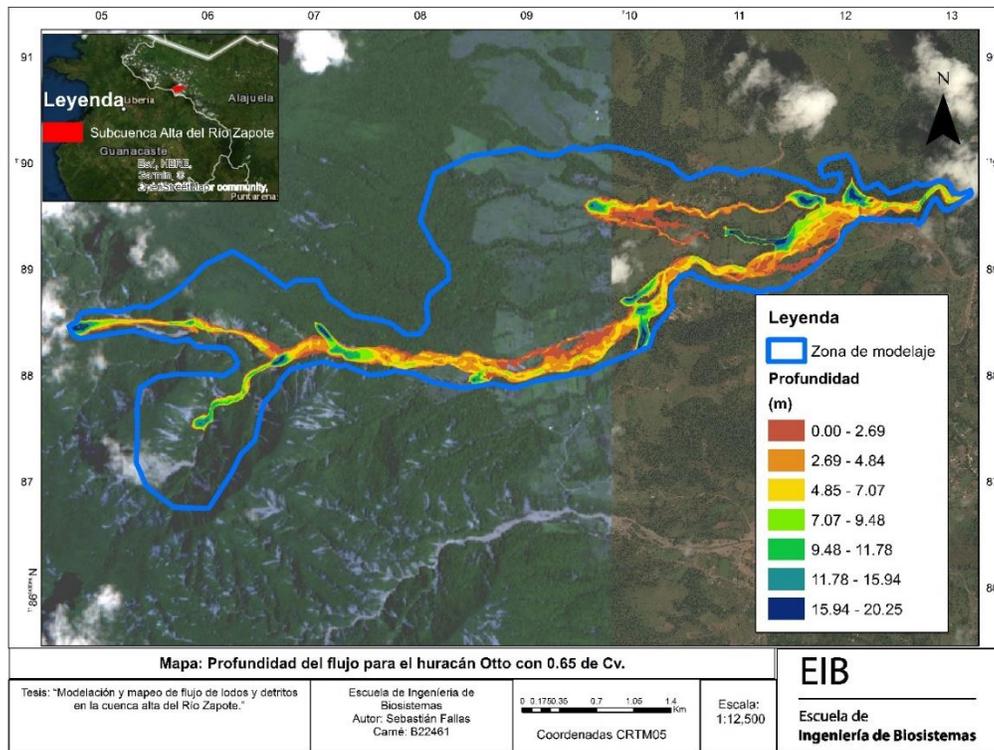


Figura 96. Profundidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.

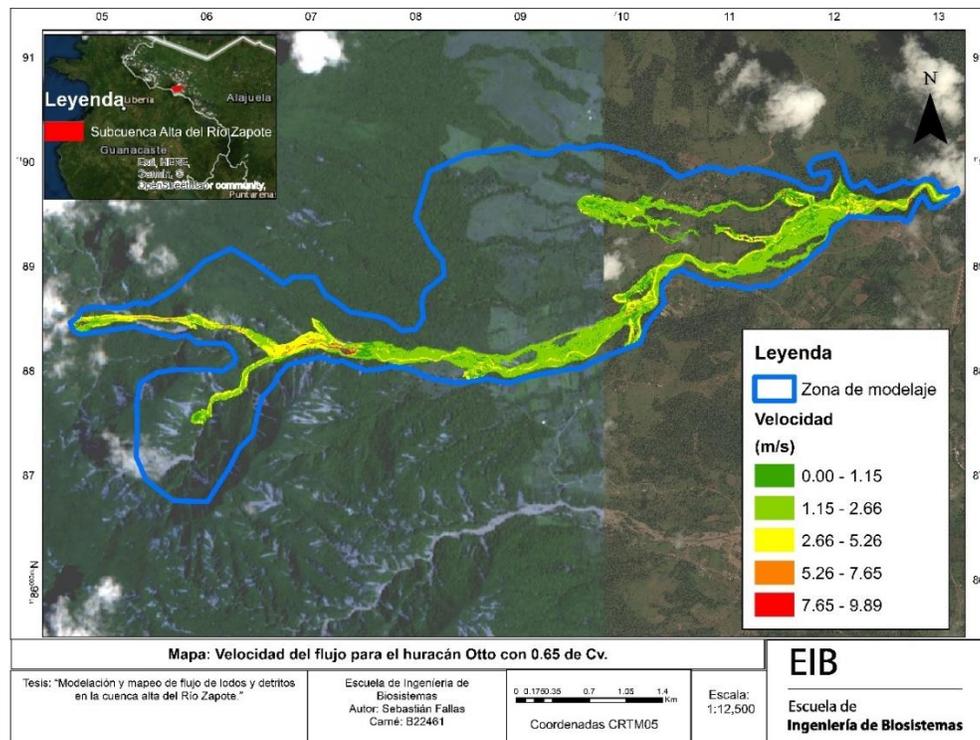


Figura 97. Velocidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.

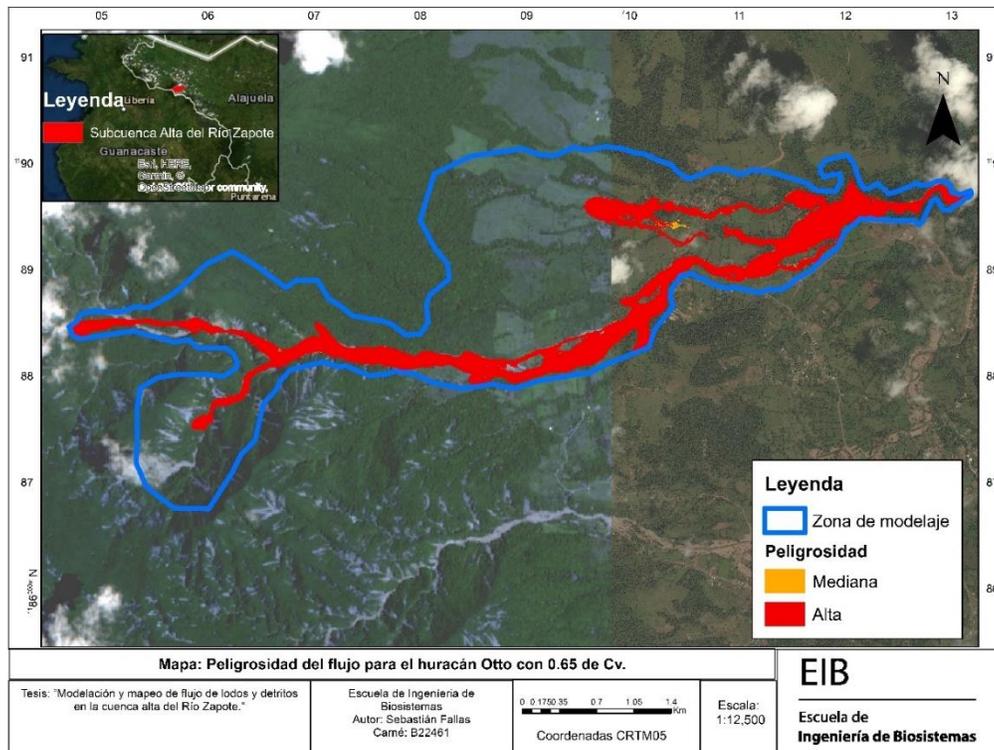


Figura 98. Peligrosidad del flujo para el huracán Otto con Cv de 0.65.

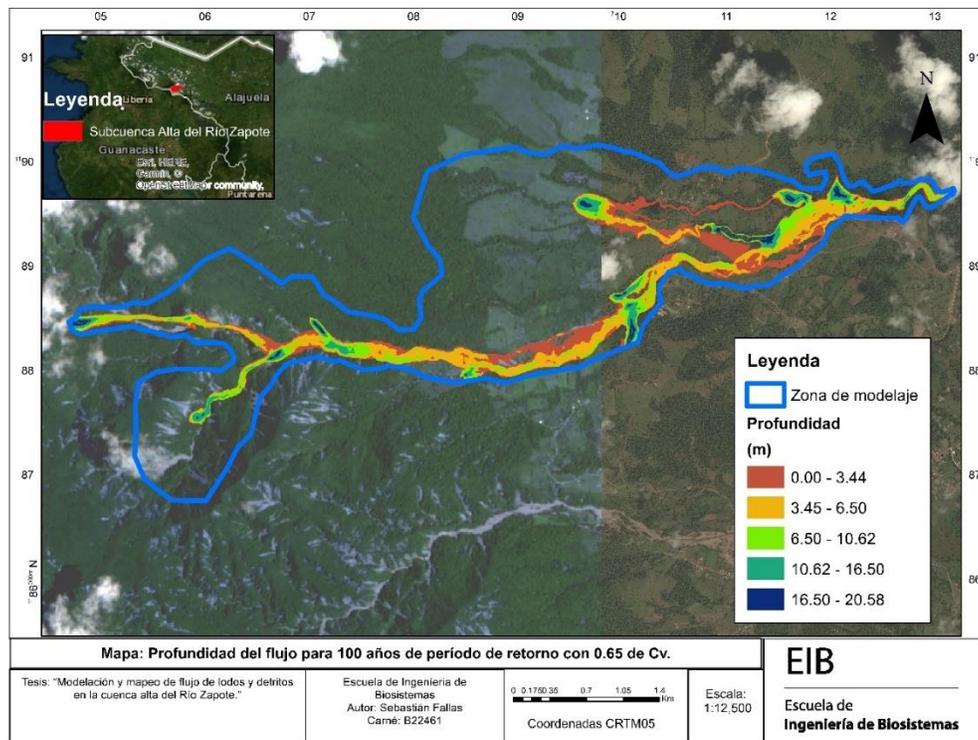


Figura 99. Profundidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.

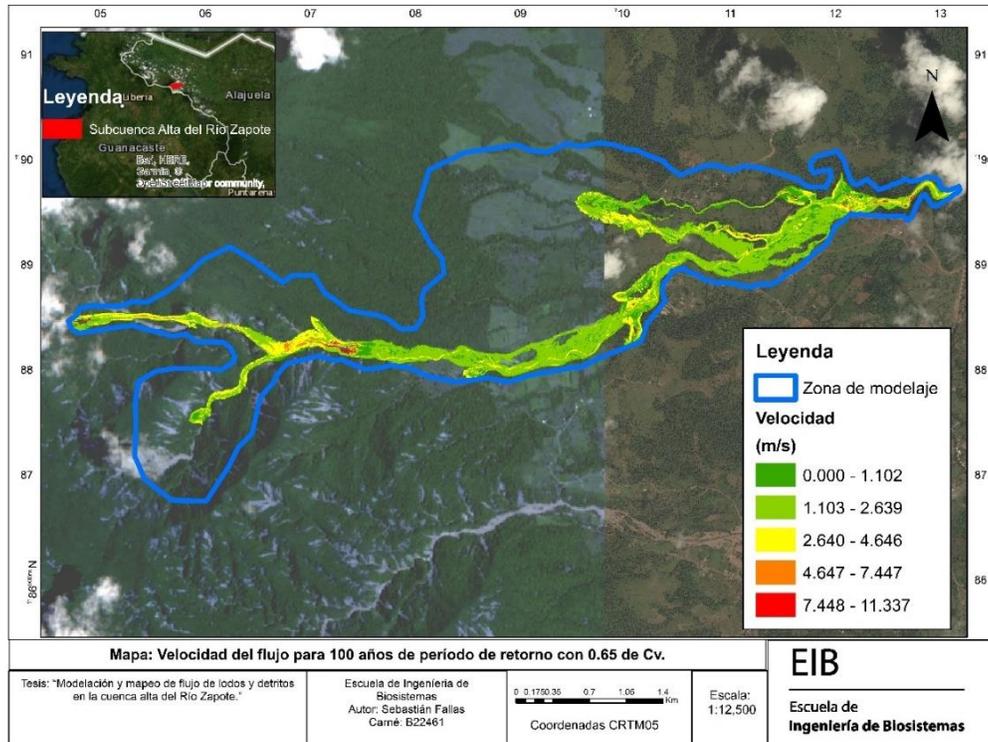


Figura 100. Velocidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.

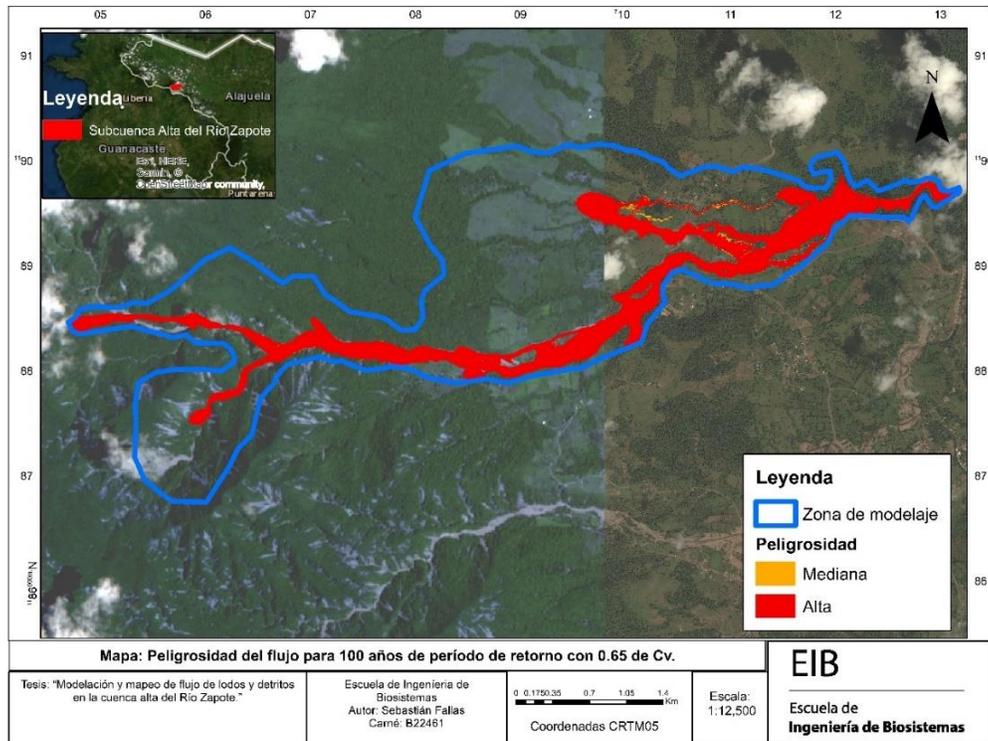


Figura 101. Peligrosidad del flujo para 100 años de período de retorno con Cv de 0.65.

Anexo 5. Resultados de la prueba de ANOVA para las diferencias de altura de inundación.

Cuadro 18. Resumen de resultados para prueba estadística entre concentraciones de sedimento.

Grupos	Cuenta	Suma (m)	Promedio (m)	Varianza (m)
Fila 1	2	1.52	0.76	0.003
Fila 2	2	3.41	1.71	0.11
Fila 3	2	7.17	3.59	0.10
Fila 4	2	11.39	5.70	0.07
Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	134.51	0.0002	6.59	

Cuadro 19. Resumen de resultados para prueba estadística entre el huracán Otto y 100 años de período de retorno.

Grupos	Cuenta	Suma (m)	Promedio (m)	Varianza (m)
Columna 1	4	11.61	2.90	4.12
Columna 2	4	11.89	2.97	5.49
Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	0.002	0.97	5.99	

Bibliografía

- [1] Instituto Meteorológico Nacional. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica [monografía en internet]. Costa Rica: IMN; 2008 [citado 1 de setiembre del 2017]. Disponible en: http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf
- [2] Instituto Meteorológico Nacional. Huracán Otto Informe técnico [monografía en internet]. Costa Rica: IMN; s.f. [citado 17 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+IMN+Hurac%C3%A1n+Otto>
- [3] La Nación. Huracán Otto afectó directamente a 10.831 personas en Costa Rica [página principal en internet]. Costa Rica: La Nación; c2016. [actualizado noviembre 2016; citado 17 de diciembre 2017]. [aprox. 15 pantallas]. Disponible en: <http://www.nacion.com/sucesos/desastres/huracan-otto-afecto-directamente-a-10-831-personas-en-costa-rica/3U4WJCSIKBCXXDX3U3T4XPRF5E/story/>
- [4] Brenes, A. Gestión de amenazas en Costa Rica e impactos del huracán Otto [monografía en internet]. Costa Rica: PEN; 2017. [citado el 8 de diciembre 2017]. Disponible en: https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Brenes_A_2017.pdf
- [5] Coto, S. Thermomanía creó parque temático para atraer a los turistas después de Otto [página principal en internet]. Costa Rica: La Teja. c2017. [citado el 19 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://www.lateja.cr/sucesos/video-thermomania-creo-parque-tematico-para/GN5RKCF7LRB6JGDAD2S5OJ72ME/story/>
- [6] Arguedas, C. Otto sepultó a nueve personas en sus casas en Bagaces y Upala [página principal en internet]. Costa Rica: La Nación. c2016. [actualizado noviembre 2016; citado el 19 de diciembre 2017]. [aprox. 15 pantallas]. Disponible en: <http://www.nacion.com/sucesos/desastres/otto-sepulto-a-nueve-personas-en-sus-casas-en-bagaces-y-upala/K5DPGF6J6ZGSZBBSXECFB4I7XI/story/>
- [7] Arce, J. CNE en alerta por deslizamientos provocados por huracán en Upala [página principal en internet]. Costa Rica: AMPrensa. c2017. [actualizado febrero 2017; citado 19 de diciembre 2017]. [aprox. 10 pantallas]. Disponible en: <http://www.amprensa.com/2017/02/cne-alerta-deslizamientos-provocados-huracan-upala/>
- [8] Murillo, A. ¿Por qué el huracán Otto azotó así a Upala? [página principal en internet]. Costa Rica: Semanario Universidad. c2016. [actualizado noviembre 2016; citado el 19 de diciembre 2017]. [aprox. 10 pantallas]. Disponible en: <https://semanariouniversidad.com/pais/huracan-otto-azoto-asi-upala/>
- [9] Arroyo, L. Costa Rica: Análisis de la incidencia espacial de inundaciones y deslizamientos por provincias y cantones, años 2000-2006. Costa Rica: Revista Geográfica de América Central. 2011. [citado el 28 de octubre del 2019]
- [10] Jarquín MF. Análisis del tránsito de avenidas ante la posibilidad de un deslizamiento en el Cerro Tapezco mediante el uso del modelo hidráulico FLDWAV. Universidad de Costa Rica; 2001.

- [11] Kumar Bhattacharjya R, Guwahati A. CE 311: Hydrology & Water Resources Engineering [Internet]. [citado el 24 de abril del 2019]. Disponible en: <http://www.iitg.ac.in/rkbc/CE311/L 1 Introduction.pdf>
- [12] Díaz Delgado C, Mamadou Bâ K, Iturbe Posadas A, Esteller M, Reyna Sáenz F. Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Cienc ergo-sum* [Internet]. 1999;6(2):124–34. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10401504>
- [13] Saavedra A, Castellanos LA. Clasificación fisiográfica. Región del Bajo Usumacinta. Eco-regionalización y planificación. México: Centro Público de Investigación. 2014. [citado el 24 de octubre del 2019]
- [14] Salas-Aguilar VM, Pinedo-Álvarez C, Viramontes-Olivas OA, Báez-González AD, Quintana-Martínez RM. Morfometría de la cuenca del río Nazas-Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial [Internet]. Vol. V. 2011 [citado el 24 de abril del 2019]. Disponible en: http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v5n1/data/Morfometria_de_la_cuenca_del_rio_Nazas_Rodeo_aplicando_tecnologia_geoespacial_en_Durango_Mexico.pdf
- [15] Máximo VB. Apuntes Hidrología. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica; 2002
- [16] Seguí LA, García D, Guerrero H. Huella hídrica: análisis como instrumento estratégico de gestión para el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos. 2016;(Diciembre):76–101.
- [17] Chow VT, Maidment D, Mays L. Hidrología Aplicada. Colombia: McGraw-Hill. 1994.
- [18] Grimaldi S, Kao SC, Castellarin A, Papalexiou SM, Viglione A, Laio F, et al. Statistical Hydrology. Vol. 2, Treatise on Water Science. 2010. 479-517 p.
- [19] USGS. Estimating Basin Lag time and Hydrograph-Timing Indexes Used to Characterize Stormflows for Runoff-Quality Analysis [Internet]. Virginia; 2012 [citado el 3 de octubre del 2019]. Disponible en: https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5110/pdf/sir2012-5110_text.pdf
- [20] Carrera C. Capítulo 6 hidrograma [Internet]. 2016 [citado el 24 de abril del 2019]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/AngelAroquipa/capitulo-6-hidrograma>
- [21] Claudio Galvão do Valle Junior L, Buchala Bicca Rodrigues D, Tarso Sanches de Oliveira P. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed Estimativa da razão de abstração inicial e Curve Number usando dados de chuva e vazão em uma bacia tropical. [citado el 10 de octubre del 2019]; Disponible en: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>
- [22] Ponce V, Magallon L. Initial abstraction revisited, runoff curve number method, surface water hydrology, Victor M. Ponce and Luis Magallon [Internet]. [citado el 10 de octubre del 2019]. Disponible en: http://ponce.sdsu.edu/initial_abstraction_revisited.html
- [23] Woodward DE. Runoff curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Vol. 85721, Tucson. Bozeman; 2005.

- [24] Yucel I, Kuligowski RJ, Gochis DJ. Evaluating the hydro-estimator satellite rainfall algorithm over a mountainous region. *Int J Remote Sens.* 2011;32(22):7315–42.
- [25] Kuligowski R, Oceanic N. Application of the Hydro-Estimator Rainfall Algorithm Over Hawaii. 2013;(December).
- [26] Ixtlitzin Bravo-Carvajal RJ, Garnica-Peña, LC, López-Bravo L, Alcántara-Ayala I. Landslide Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and GIS: Nueva Colombia, Chiapas, Mexico. Introduction to landslides Part 3: Use of Remote sensing for landslide mapping
- [27] Ettema R. Hydraulic Modeling Concepts and Practice MSCE. Virginia; 2000.
- [28] Demissie M, Keefer L, Lian Y, Yue F, Larson B. Hydrologic and Hydraulic Modeling and Analyses for the Cache River for the Purposes of Evaluating Current Conditions and Alternative Restoration Measures.
- [29] Balmforth NJ, Craster R V. 2 Geophysical Aspects of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Department of Applied Mathematics and Statistics, University of California. USA. 2001.
- [30] Scotto A, Santolo D, Pellegrino AM, Evangelista A. Experimental study on the rheological behaviour of debris flow. *Hazards Earth Syst Sci* [Internet]. 2010 [citado el 31 de octubre de 2019];10:2507–14. Disponible en: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/2507/2010/
- [31] Rohrig, B. No Hit Wonder D-30 [monografía en internet]. USA: ACS; s.f. [citado el 18 de diciembre 2017] Disponible en: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/issues/2016-2017/February%202017/chemmatters-feb2017-d3o.pdf>
- [32] Barbero A. Fluidos [Internet]. 2010 [citado el 3 de enero del 2019]. Disponible en: <https://previa.uclm.es/profesorado/ajbarbero/Teoria/FluidosDinamica2010.pdf>.
- [33] Subramanian, R. Non-Newtonian Flows [Internet]. [citado el 3 de enero del 2019]. Disponible en: [http://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Non-Newtonian Flows.pdf](http://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Non-Newtonian%20Flows.pdf)
- [34] Fille, L. Back calculation of Debris flow Run-Out & Entrainment Using the Voellmy Rheology [Internet]. [citado el 7 de septiembre del 2018]. Disponible en: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2457822/16897_FULLTEXT.pdf?sequence=1
- [35] Kanji, M. Debris flows in areas of residual soils: occurrence and characteristics [monografía en internet]. Brasil: Universidad de Sao Paulo; S.f. [citado el 10 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/129130165/Kanji>
- [36] Chandra Barman, P., Kairi, RR., Das, A. & Islam, MR. An Overview of Non-Newtonian Fluid. *Int J Appl Sci Eng* [Internet]. 2016 [citado el 31 de agosto del 2018]; 4(2):97–101. Disponible en: <http://ndpublisher.in/admin/issues/IJASEV4N2f.pdf>
- [37] Vivas, M. Aplicación del modelo FLO-2D para evaluar medidas de mitigación ante la ocurrencia de huacos [monografía en internet]. Perú: USMP; s.f. [citado el 12 de diciembre 2017]. Disponible en: <http://usmp.edu.pe/idp/wp-content/uploads/2015/11/Maria-Isabel.pdf>

- [38] Jakob, M. & Hungr, O. Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. Reino Unido: Praxis. 2005.
- [39] Nettleton, I., Martin, S., Hencher, S. & Moore, R. 4 Debris Flow Types and Mechanisms 4.1 Flows 4.1.1 Classification of Flows [Internet]. [citado el 3 de enero del 2019]. Disponible en: <http://www.geoffice.it/files/Download/0015327.pdf>
- [40] Castillo, L. Aplicación de un modelo numérico de flujos de detritos y lodo en una quebrada en el Perú. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- [41] Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnicos. Colombia: Universidad Industrial de Santander. 2009.
- [42] Rymer, M. Above Wrightwood, California and its engineered debris-flow chutes. [citado el 8 de setiembre del 2018] Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/38037974@N00/4012937909/>
- [43] Iverson, R. The physics of debris flows. Rev. USA: Geophysics. 1997.
- [44] Marchi, L. Debris-flow monitoring in the Alps [monografía en internet]. Italy: Institute of the Italian National Research Council; 2014 [citado 28 de agosto del 2018] Disponible en: <http://www.irpi.cnr.it/wp-content/uploads/2016/01/focus-debris-flow-monitoring-in-the-alps-22.pdf>
- [45] Novotný J. Varnes landslide classification (1978) [Internet]. República Checa; 2013 [citado el 31 de octubre de 2019]. Disponible en: http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification.htm
- [46] Marchi L. Debris-flow monitoring in the Alps [Internet]. [citado el 31 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://www.irpi.cnr.it/wp-content/uploads/2016/01/focus-debris-flow-monitoring-in-the-alps-22.pdf>
- [47] Notifronteras. Quebrada La Taruca en Mocoa, tragedia anunciada de proporciones inimaginables, que las autoridades han hecho caso omiso. | Noti-Fronteras [Internet]. [citado el 3 de enero del 2019]. Disponible en: <http://notifronteras.com/ultimas-noticias/quebrada-la-taruca-en-mocoa-tragedia-anunciada-de-proporciones-inimaginables-que-las-autoridades-han-hecho-caso-omiso/>
- [48] Jakob M, Hungr O. Debris Flow Hazards and Related Phenomena. Praxis.
- [49] Takashi T. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Reino Unido: CRC Press. 2014.
- [50] Lee SHH, Widjaja B. Phase concept for mudflow based on the influence of viscosity. Soils Found. 2013; 53(1):77–90.
- [51] Quan Luna B, Blahut J, Van Westen CJ, Sterlacchini S, Van Asch TWJ, Akbas SO. Natural Hazards and Earth System Sciences The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. Hazards Earth Syst Sci [Internet]. 2011 [citado el 31 de octubre de 2019]; 11:2047–60. Disponible en: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/2047/2011/

- [52] Lin, P, Lee, J, Chang, C. Application of the FLO-2D model to debris flow simulation- a case study of Song-Her district in Taiwan [monografía en internet]. Taiwan: Universidad Nacional de Chung Hsing; 2001. [citado 19 de setiembre 2017]. Disponible en: http://www.ijege.uniroma1.it/rivista/5th-international-conference-on-debris-flow-hazards-mitigation-mechanics-prediction-and-assessment/topic-8-prediction-and-assessment-of-debris-flow-hazards/an-application-of-the-flo-2d-model-to-debris-flow-simulation-a-case-study-of-song-her-district-in-taiwan/ijege-11_bs-lee-et-alii.pdf
- [53] FLO-2D. USER'S MANUAL. Arizona. 2007.
- [54] Cesca, M, D'Agostino V. Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites [monografía en internet]. Italia: Universidad de Padova; 2008. [citado 19 de setiembre 2017]. Disponible en <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/DEB08/DEB08020FU1.pdf>
- [55] O'Brien, J., Julien, P. and Fullerton, T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. [monografía en internet] EUA: Jornal de Ingeniería Hidraulica; 1993. [citado el 19 de setiembre 2017]. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281993%29119%3A2%28244%29>
- [56] Sepulveda, A., Patiño, J. Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia [monografía en internet]. Colombia: Pontífica Universidad Javeriana; 2016 [citado el 8 de setiembre 2017]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/18828/SepulvedaBelloAmanda2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [57] Wan, Z. & Wang, Z. Sediment Concentration. [citado el 1 de enero del 2019] Disponible en: <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/553/c5.pdf>
- [58] Santa Clara Valley Water District. Attachment 7: Technical Justification of Projects [Internet]. [citado el 1 de enero del 2019]. Disponible en: [https://water.ca.gov/LegacyFiles/irwm/grants/docs/Archives/Prop1E/Submitted_Applications/P1E_Round2_SWFM/Santa Clara Valley Water District \(201243210024\)/Attachment 7 - Att7_SWF_TechJust_1of3.pdf](https://water.ca.gov/LegacyFiles/irwm/grants/docs/Archives/Prop1E/Submitted_Applications/P1E_Round2_SWFM/Santa%20Clara%20Valley%20Water%20District%20(201243210024)/Attachment%207%20-%20Att7_SWF_TechJust_1of3.pdf)
- [59] Castillo, L. Herramientas para el modelamiento de flujos hiperconcentrados [monografía en internet]. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería; S.f. [citado el 18 de setiembre 2017]. Disponible en: http://www.cip-civil.com/wp-content/uploads/2013/08/Modelacion_de_huaycos_2013JUL23_I_IngCastillo.pdf
- [60] O'Brien, J. Sediment Loading, Hyperconcentrated Sediment Flows, Mud and Debris Flows [Presentación de Power Point]. FLO-2D Software Inc: USA. S.f.
- [61] O'Brien, J. & Julien PY. Laboratory analysis of mudflow properties. J of Hyd. Eng. 1988; 114(8):877-887.
- [62] Vettorelo P. Curva granulométrica de la arena ensayada. [Internet]. 2010 [citado el 1 de noviembre de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curva-granulometrica-de-la-arena-ensayada_fig1_273763156
- [63] FLO-2D. Mapper Manual Pro. 2017.

- [64] Mergili M, Fellin W, Moreiras SM, Stötter J, Mergili M, Fellin W, et al. Simulation of debris flows in the Central Andes based on Open Source GIS: possibilities, limitations, and parameter sensitivity. 2012 [citado el 21 de enero del 2019];61:1051–81. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11069-011-9965-7.pdf>
- [65] Cesca M, D’agostino V. Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. 2008 [citado el 22 de enero del 2019]; Disponible en: www.witpress.com
- [66] Wu YH, Liu KF, Chen YC. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. *J Mt Sci*. 2013;10(2):293–304.
- [67] Frekhaug MH. An assessment of prediction tools to Norwegian debris flows. Norwegian University of Science and Technology; 2015.
- [68] Moase E, Strouth A. A comparison of different approaches for modelling a fine-grained debris flow at Seton Portage, British Columbia, Canada [Internet]. Vancouver; [citado el 22 de enero del 2019] Disponible en: [http://www.hkges.org/JTC1_2nd/files/Papers/Extened/A1_Moase et al_2018_Comparison of FLO2D and DAN3D on Bear Creek.pdf](http://www.hkges.org/JTC1_2nd/files/Papers/Extened/A1_Moase_et_al_2018_Comparison_of_FLO2D_and_DAN3D_on_Bear_Creek.pdf)
- [69] Quan Luna B, Blahut J, Van Westen CJ, Sterlacchini S, Van Asch TWJ, Akbas SO. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Hazards Earth Syst Sci* [Internet]. 2011 [citado el 22 de enero del 2019]; 11:2047–60. Disponible en: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/2047/2011/
- [70] Szu-Hsien P, Shih-Chung LU. FLO-2D Simulation of Mudflow Caused by Large Landslide Due to Extremely Heavy Rainfall in Southeastern Taiwan during Typhoon Morakot [Internet]. 2013. [citado el 22 de enero del 2019]. Disponible en: <http://ir.lib.ctu.edu.tw/bitstream/310909700/6384/3/FLO-2D+Simulation+of+Mudflow+Caused+by+Large+Landslide+Due+to+Extremely+Heavy+Rainfall.all.pdf>
- [71] Lin P-S, Lee J-H, Chang C-W. An Application of the FLO-“D Model to Debris-Flow Simulation-A Case Study of Song-Her District in Taiwan. 2011 [citado el 22 de enero del 2019]; Disponible en: www.ijge.uniroma1.it
- [72] Hsu SM, Chiou LB, Lin GF, Chao CH, Wen HY, Ku CY. Natural Hazards and Earth System Sciences Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan [Internet]. Vol. 10, *Hazards Earth Syst. Sci*. 2010 [citado el 22 de enero del 2019]. Disponible en: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/535/2010/
- [73] Fick SE, Hijmans RJ. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017 [citado el 22 de enero del 2019].
- [74] Highland L. The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides [Internet]. Colorado; [citado el 3 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/Sections/Section1.pdf>
- [75] Mapa digital de Suelos de Costa Rica [Internet]. [citado el 13 de febrero del 2019]. Disponible en: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

- [76] USDA. Urban Hydrology for Small Watersheds [Internet]. 1986 [citado el 13 de febrero del 2019]. Disponible en:
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- [77] Marchi M, Sinjur I, Bozzano M, Westergren M. Evaluating WorldClim version 1 (1961-1990) as the baseline for sustainable use of forest and environmental resources in a changing climate. *Sustain*. 2019; 11(11):1–14
- [78] Delgado O, Córdoba G. Informe Comunidades Fronterizas Upala [Internet]. San José; 2012 [citado el 7 de febrero del 2019]. Disponible en:
https://www.mivah.go.cr/Documentos/investigaciones_diagnosticos/diagnosticos_planes_intervencion/2012/UPALA_ALAJUELA/MODELO_PLAN_INTERVENCION_UPALA_FRONTERA.pdf
- [79] OVSICORI. Sismicidad Anual [Internet]. [citado el 1 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/sismicidad-anual>.
- [80] Kugligowski B. Hydro-Estimator [Internet]. [citado el 23 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://www.isac.cnr.it/~ipwg/algorithms/inventory/HE.pdf>
- [81] Manning’s Roughness Coefficients [Internet]. [citado el 31 de octubre de 2019]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/amp/mannings-roughness-d_799.html
- [82] Brisbane City Council. Manning’s Roughness [Internet]. [citado el 31 de octubre de 2019]. Disponible en: https://www.brisbane.qld.gov.au/sites/default/files/ncd_appendixc_part3.pdf
- [83] Barnes HI. Roughness Characteristics of Natural Channels [Internet]. USGS; 1967 [citado el 31 de octubre de 2019]. 219 p. Disponible en:
https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1849/pdf/wsp_1849-test-2.pdf