UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TÍTULO A OBTENER: INGENIERO AMBIENTAL

TEMA:
ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL RIESGO DE INUNDACION MEDIANTE SIMULACION EN LOS RIOS PUYO Y PINDO GRANDE, EN LA CIUDAD DE PUYO

AUTORES:
David E. Caicedo Ballesteros
Cristian R. Hernández Lascano

DIRECTOR DE PROYECTO:
MsC. Maria Khatarina Elisabeth de Decker

CO-DIRECTOR DE PROYECTO
MsC. Juan Carlos Caicedo Ballesteros

PUYO - ECUADOR
2020 – 2021

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Hernández Lascano Cristian Rai, con cédula de identidad N°.1600422776 y Caicedo Ballesteros David Enrique N° 1600646994 declaro que las actividades realizadas para la elaboración y culminación del presente proyecto de investigación y desarrollo, que tiene como tema: Análisis Espacio-Temporal del riesgo de inundación mediante simulación en los ríos Puyo y Pindo Grande, en ciudad de Puyo, no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en la presente investigación.

Los criterios emitidos en el proyecto de investigación, así como también los contenidos, ideas, análisis, conclusiones y recomendaciones son de exclusiva responsabilidad de nosotros, como autores de este trabajo de grado.

Cristian Rai Hernández Lascano
C.I 1600422776

David Enrique Caicedo Ballesteros
C.I 1600646994

CERTIFICADO DE APROVACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACION

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: "**ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL RIESGO DE INUNDACION MEDIANTE SIMULACION EN LOS RIOS PUYO Y PINDO GRANDE, EN LA CIUDAD DE PUYO**".







Certificado No. 89-SAU-UEA-2021

Puyo, 22 de febrero de 2021

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Trabajo de Integración Curricular correspondiente a los estudiantes: David E. Caicedo Ballesteros con C.I. 1806646964 y Cristian R. Hurtado Lascano con C.I. 1804422776, con el Tema: **"Análisis espacio-temporal del riesgo de inundación mediante simulación en los ríos Puyo y Pindo grande, en la ciudad de Puyo."**, de la carrera, Ingeniería Ambiental; Director de la investigación Ing. María de Docker, MSc., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 4%, **Informe** generado con fecha 22 de febrero de 2021 por parte de la directora conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA –.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, por haberme brindado las fuerzas para no rendirme y seguir adelante con lo que me propongo, por darme la sabiduría para poder culminar mis estudios universitarios, por guiarme por el camino de bien y hacerme mejor persona. A mis queridos padres, Juan Caicedo Y Consuelo Ballesteros, quienes me enseñaron la importancia de la responsabilidad y el esfuerzo que día a día realizamos para seguir adelante. Este proyecto se lo dedico a mi hermano Juan Carlos Caicedo quien me ha dado el ejemplo de superación para seguir con mis estudios. A mi novia Erika Guerrero quien en los últimos años de mi vida universitaria estuvo alentándome para que no me rindiera brindándome su amor y consejos que me fueron de gran ayuda. A los docentes de la Universidad Estatal Amazónica por brindarme sus conocimientos en todo el periodo académico. Y por último quiero agradecer a mis amigos quienes siempre estuvieron ahí para Aconsejarme y motivarme para seguir adelante.

David Caicedo

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiarme, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. A mis padres Klever Hernández, Patricia Lascano por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, a mi abuela María Luisa Freire por aportar a mi formación tanto profesional como ser humano, de igual manera a mis hermanos quienes son un pilar importante, y por compartir un sueño más cumplido junto a mí, a aquellos compañeros que fueron parte de esta larga trayectoria y que logramos una menta en común. Agradezco a la Universidad Estatal Amazónica, a los docentes por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación profesional.

Cristian Hernández

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador, apoyo moral y a su vez darnos las fuerzas necesarias para continuar en este proceso de obtener uno de tantos sueños por cumplir. A nuestros padres, por su amor, paciencia, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en profesionales. A nuestros hermanos por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vida.

RESUMEN

La siguiente investigación presenta un análisis espacio-temporal de riesgo de inundación mediante simulación espacial, en los ríos Puyo y Pindo Grande de la ciudad de Puyo, que incluye, modelos hidrológicos, espaciales e hidráulicos, para las zonas altas, medias y bajas de los ríos objeto de estudio. Para esto fue necesario la caracterización de la microcuenca, mediante la obtención de parámetros fisiográficos, geomorfológicos y de la red de drenaje, así como el análisis estadístico de los datos de precipitación registrados por la estación meteorológica Puyo (M0008), que aporto con datos de 1990 al 2020.

Se realizaron procesos de interpolación espacial para la determinación de los regímenes de precipitación en un rango de 30 años, dando como resultado las curvas IDF de la microcuenca y la estimación de los hietogramas de diseño, para diferentes periodos de retornos en años, que tributaron al desarrollo de las simulaciones.

Mediante la simulación del modelo hidrológico con ayuda del software HEC-HMS se consiguieron los caudales máximos e hidrogramas de crecida para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, y 100 años, posteriormente con la simulación del modelo espacial se realizaron las geometrías para modelos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) con el software QGIS y el complemento RiverGIS, finalmente con la situación del modelo hidráulico, basado en el Software HEC-RAS, se generó un análisis dinámico de inundaciones, asumiendo un entorno critico de escorrentía en dos dimensiones .

Como resultado del estudio se obtuvieron áreas de inundación en la simulación 1D, para el último periodo de retorno analizado (TR 100 años), de 23.7118ha zona alta, 9.9574ha zona media y 8.5571ha zona baja, para el río Puyo. Para el río Pindo grande se obtuvieron áreas de 12.46ha zona alta, 8.0293ha zona media y 7.4763ha zona baja. Para la simulación 2D, se obtuvieron áreas de inundación para el TR 100 años, de 40.5587ha para la zona alta, 10.544 ha zona media y 11.9631 zona baja del río Puyo y para el río Pindo Grande fueron áreas de, 20.3204 zona alta, 8.111ha zona media y 8.9673ha zona baja. Las coberturas de suelo más afectadas fueron, las áreas pobladas, infraestructura antrópica, vegetación arbustiva, bosque nativo y los cuerpos de agua.

Palabras clave: simulación, modelo, Puyo, Pindo Grande, inundación.

ABSTRACT

The following research presents a spatio-temporal analysis of flood risk through spatial simulation in the Puyo and Pindo Grande rivers in the city of Puyo. Which includes hydrological, spatial and hydraulic models for the upper, middle and lower zones of the rivers under study. For this purpose, it was necessary to characterize the micro-watershed by obtaining physiographic, geomorphological and drainage network parameters, as well as the statistical analysis of the precipitation data recorded by the Puyo meteorological station (M0008), which provided data from 1990 to 2020.

Spatial interpolation processes were carried out to determine the precipitation regimes over a 30-year range, resulting in the IDF curves of the micro-watershed and the estimation of the design hyetograms for different return periods in years, which contributed to the development of the simulations.

By simulating the hydrological model with the help of the HEC-HMS software, the maximum flows and flood hydrographs for the return periods of 2, 5, 10, 25, 50, and 100 years were obtained. Afterwards, with the simulation of the spatial model, geometries for one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) models were made with the QGIS software and the RiverGIS add-on. Finally, with the hydraulic model situation, based on the HEC-RAS software, a dynamic flood analysis was generated, assuming a critical runoff environment in two dimensions.

As a result of the study, flood areas were obtained in simulation 1D, for the last return period analyzed (TR 100 years), of 23.7118 ha high zone, 9.9574 ha middle zone and 8.5571 ha low zone, for the Puyo river. For the Pindo Grande river, areas of 12.46 ha in the high zone, 8.0293 ha in the medium zone and 7.4763 ha in the low zone were obtained.

For the 2D simulation, flood areas were obtained for the 100-year TR of 40.5587 ha for the upper zone, 10.544 ha for the middle zone and 11.9631 ha for the lower zone of the Puyo River, and for the Pindo Grande River, 20.3204 ha for the upper zone, 8.111 ha for the middle zone and 8.9673 ha for the lower zone.

The most affected land covers were populated areas, anthropic infrastructure, shrub vegetation, native forest and water bodies.

Key words: simulation, model, Puyo, Pindo Grande, flooding.

Índice de Contenido

CAPÍTULO I **1**

1.1. INTRODUCCIÓN **1**

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA **2**

1.3. OBJETIVO **2**

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS **2**

CAPÍTULO II **3**

2.1. ANTECEDENTES **3**

2.1.1. Cantón Pastaza **3**

2.1.2. Parroquia Puyo **3**

2.1.3. Clima **3**

2.1.4. Hidrografía **3**

2.2. BASES TEÓRICAS **4**

2.2.1. Variables Hidrometereológicas **4**

2.2.1.1. Cuenca Hidrográfica **4**

2.2.1.2. Geomorfología de la Cuenca **4**

2.2.1.3. Precipitación **5**

2.2.1.4. Caudal **6**

2.2.1.5. Tratamiento estadístico **6**

2.2.1.6. Determinación de la probabilidad **7**

2.2.1.7. Análisis de frecuencia **8**

2.2.1.8. Períodos de retorno de diseño **8**

2.2.1.9. Relaciones Intensidad, Duración y Frecuencia **8**

2.2.1.10. Funciones de distribución de probabilidad **9**

2.2.1.11. Distribución de Gumbel **9**

2.2.1.12. Relación de precipitaciones de 24 horas de duración 10
2.2.1.13. Curvas Intensidad, Duración, Frecuencia IDF 10
2.2.1.14. Cálculo de ecuaciones de intensidad 11
2.2.1.15. Ecuación de intensidad en función de la duración y el período de retorno 11
2.2.1.16. Hietogramas de diseño 12
2.2.1.17. Número de curva de la cuenca 13
2.2.1.18. Hidrograma Unitario SCS 15
2.2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 16
2.2.2.1. GIS 16
2.2.2.2. RPAS 16
2.2.2.3. Uso de RPAS en topografía 17
2.2.2.4. Fotogrametría 17
2.2.3. SISTEMAS DE SIMULACIÓN 17
2.2.3.1. Sistema simulación de modelamiento hidrológico HEC-HMS 17
2.2.3.2. Sistema de simulación de modelamiento Espacial QGIS 18
2.2.3.3. Complemento RiverGIS 19
2.2.3.4. Sistemas de simulación de modelamiento Hidráulico HEC-RAS 19
CAPÍTULO III 20
3.1. LOCALIZACIÓN 20
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN 21
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN 21
3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 21
3.4.1. Identificación de la zona de estudio 21
3.4.2. Caracterización de la microcuenca 22
3.4.2.1. Parámetros fisiográficos 22

3.4.2.2. Parámetros Geomorfológicos 24

3.4.2.2.1. Altitud media de la cuenca H_m (m) 24

3.4.2.2.2. Curva Hipsométrica 24

3.4.2.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas 25

3.4.2.3. Parámetros del Sistema de Drenaje 25

3.4.3. SIMULACIÓN 31

3.4.3.1. Simulación Hidrológica 31

3.4.3.2. Simulación Espacial 34

3.4.3.3. Simulación Hidráulica 36

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 39

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MICROCUENCA 39

4.1.1. Parámetros Fisiográficos 39

4.1.2. Parámetros Geomorfológicos 39

4.1.3. Parámetros de la Red de Drenaje 40

4.2. SIMULACIÓN 42

4.2.1. Simulación Hidrológica 42

4.2.2. Cálculo de la distribución pluviométrica 43

4.2.2.1. Determinación de la precipitación máxima diaria 44

4.2.2.2. Cálculo de la intensidad de la lluvia 45

4.2.2.3. Cálculo de los Hietogramas de precipitación 47

4.2.2.4. Simulación del modelo hidrológico 49

4.2.3. Simulación espacial 50

4.2.4. Simulación hidráulica 53

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 77

4.3. CONCLUSIONES 77

4.4. RECOMENDACIONES 78

4.5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79

ANEXOS 83

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas 10

Tabla 2. Grupos hidrológicos del suelo 13

Tabla 3. Condiciones de humedad 14

Tabla 4. Estimación del número de curva para condiciones de humedad II 15

Tabla 5. Factor de forma de la cuenca 24

Tabla 6. Valores de la Densidad de drenaje 26

Tabla 7. Rangos de pendiente del cauce 27

Tabla 8. Coeficientes de rugosidad para cauces naturales 36

Tabla 9. Parámetros Fisiográficos de la microcuenca del Río Puyo 39

Tabla 10. Parámetros de la red de drenaje de la microcuenca Río Puyo 41

Tabla 11. Datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas. 42

Tabla 12. Datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas. 44

Tabla 13. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias. 44

Tabla 14. Resumen de aplicación de regresión potencial. 46

Tabla 15. Áreas de inundación zona Malecón río Puyo. 62

Tabla 16. Áreas de inundación zona la Isla río Puyo. 62

Tabla 17. Áreas de inundación zona media río Puyo. 63

Tabla 18. Áreas de inundación zona baja río Puyo. 63

Tabla 19. Áreas de inundación zona alta río Pindo Grande. 64

Tabla 20. Áreas de inundación zona media río Pindo Grande. 64

Tabla 21. Áreas de inundación zona baja río Pindo Grande. 65

Tabla 22. Áreas de inundación zona Malecón río Puyo. 73

Tabla 23. Áreas de inundación zona la Isla río Puyo. 73

Tabla 24. Áreas de inundación zona media río Puyo. 74

Tabla 25. Áreas de inundación zona baja río Puyo. 74

Tabla 26. Áreas de inundación zona alta río Pindo Grande. 75

Tabla 27. Áreas de inundación zona media río Pindo Grande. 75

Tabla 28. Áreas de inundación zona baja río Pindo Grande. 76

Índice de Figuras

Figura 1. Parámetros morfométricos 5

Figura 2. Curvas IDF (Ponce, 1989) 12

Figura 3. Hietograma de diseño 13

Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio. 20

Figura 5. Mapa de ubicación de la zona alta, media y bajo de estudio. 22

Figura 6. Número de Curva 28

Figura 7. Flujograma del proceso de simulación hidrológica 33

Figura 8. Flujograma del proceso de simulación espacial 35

Figura 9. Flujograma del proceso de simulación hidráulica 38

Figura 10. Curva Hipsometrica e Histograma de frecuencias altimetricas de la microcuenca Río Puyo 40

Figura 11. Perfil del río de la microcuenca Río Puyo 41

Figura 12. Histórico de precipitaciones máximas anuales 43

Figura 13. Regresión potencial 46

Figura 14. Curva (*IDF*) para los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50, 100 y 500 años con una duración de 5 horas de lluvia. 47

Figura 15. Hietogramas para periodo de retorno T2 48

Figura 16. Hietogramas para periodo de retorno T5 48

Figura 17. Hietogramas para periodo de retorno T10 48

Figura 18. Hietogramas para periodo de retorno T25 48

Figura 19. Hietogramas para periodo de retorno T50 48

Figura 20. Hietogramas para periodo de retorno T100 48

Figura 27. Geometría modelo 1D 51

Figura 28. Geometría modelo 2D 51

Figura 29. Geometría modelo 1D 52

Figura 30. Geometría modelo 1D 52

Figura 31. Sección geometría modelo 1D – Valores de Manning 53

Figura 32. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR2 54

Figura 33. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR5 54

Figura 34. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR10 54

Figura 35. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR25 54

Figura 36. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR50 54

Figura 37. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR100 54

Figura 38. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR2 55

Figura 39. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR5 55

Figura 40. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR10 55

Figura 41. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR25 55

Figura 42. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR50 55

Figura 43. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno

TR100 55

Figura 44. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR2 56

Figura 45. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR5 56

Figura 46. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR10 56

Figura 47. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR25 56

Figura 48. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR50 56

Figura 49. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR100 56

Figura 50. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR2 57

Figura 51. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR5 57

Figura 52. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR10 57

Figura 53. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR25 57

Figura 54. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR50 57

Figura 55. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR100 57

Figura 56. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR2 58

Figura 57. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR5 58

Figura 58. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR10 58

Figura 59. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR25 58

Figura 60. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR50 58

Figura 61. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR100 58

Figura 62. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....59

Figura 63. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5.....59

Figura 64. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....59

Figura 65. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....59

Figura 66. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....59

Figura 67. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....59

Figura 68. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....60

Figura 69. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5.....60

Figura 70. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....60

Figura 70. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....60

Figura 71. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....60

Figura 72. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....60

Figura 73. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....60

Figura 74. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....61

Figura 75.Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de

retorno TR5.....61

Figura 76.Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....61

Figura 77.Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....61

Figura 78.Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....61

Figura 79. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....61

Figura 80. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR2.....66

Figura 81. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR5.....66

Figura 82. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR10.....66

Figura 83. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR25.....66

Figura 84. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR50.....66

Figura 85. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR100.....66

Figura 86. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR2.....67

Figura 87. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR5.....67

Figura 88. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR10.....67

Figura 89. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR25.....67

Figura 90. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR50.....67

Figura 91. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR100.....67

Figura 92. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR2 68

Figura 93. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR5 68

Figura 94. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR10 68

Figura 95. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR25 68

Figura 96. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR50 68

Figura 97. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR100 68

Figura 98. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR2.....69

Figura 99. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR5.....69

Figura 100. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR10 69

Figura 101. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR25 69

Figura 102. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR50 69

Figura 103. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR100 69

Figura 104. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....70

Figura 105. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5.....70

Figura 106. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....70

Figura 107. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....70

Figura 108. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....70

Figura 109. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....70

Figura 110. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....71

Figura 111. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5.....71

Figura 112. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....71

Figura 113. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....71

Figura 114. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....71

Figura 115. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....71

Figura 116.Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2.....72

Figura 117. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5.....72

Figura 118. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10.....72

Figura 119. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25.....72

Figura 120. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50.....72

Figura 121. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100.....72

CAPÍTULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Según Ordoñez (2011), las cuencas hídricas son espacios geográficos donde las lluvias se filtran y escurren a un cauce principal, formando manantiales, ríos y lagos, cualquier lugar de la tierra forma parte de una cuenca. Por medio de las infiltraciones, se incorpora agua procedente de las lluvias y aguas superficiales.

Los ríos constituyen un sistema dinámico de flujo de agua y sedimento que controlan la función biológica de la tierra. Son los corredores activos más importantes que tiene la naturaleza y dependen de estos para el equilibrio de la vida (Bateman, 2007). Los ríos reciben, almacenan y transportan el agua de lluvia y este caudal fluctúa de acuerdo a ciclos naturales y a la estacionalidad de cada región (Encalada 2016). Sin embargo, a causa de la contaminación ambiental se producen lluvias intensas o continuas que sobrepasan la capacidad de campo del suelo, supera el volumen máximo de transporte del río y el cauce principal se desborda y se inundan los terrenos circundantes (Sivincha, 2017)

El fenómeno natural de las inundaciones, genera grandes afectaciones a nivel social, económico y ambiental, ocasionando pérdidas humanas, daños a la infraestructura e impactos negativos en los ecosistemas, el riesgo es más evidente en las zonas ribereñas a los ríos, donde gran parte de la población establece sus domicilios.

La zona urbana de la parroquia Puyo, es atravesada por los ríos Puyo y Pindo Grande, además de afluentes menores, que en época invernal han ocasionado varios fenómenos de inundaciones y las graves consecuencias que estos conllevan.

La presente investigación aborda el estudio hidrológico e hidráulico, para el análisis espacio temporal del riesgo de inundación de los ríos Puyo y Pindo Grande en la zona urbana del cantón Pastaza, cuyos resultados permitirán comprender el comportamiento de los ríos en situaciones de máximas avenidas y proporciona información relevante para la correcta gestión de los problemas asociados a estos fenómenos.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las inundaciones en Ecuador se presentan de manera recurrente, especialmente en las cuencas bajas del litoral ecuatoriano, cuencas de la Amazonía y en algunas cuencas de la región Andina (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2014)

Parte de la población de la parroquia Puyo se ubica en áreas susceptibles a inundaciones, generando impactos social, económico y ambiental.

El historial de inundaciones que se ha registrado en los últimos años es muy alto y se presentan de manera periódica, además las fuertes lluvias registradas durante la madrugada del 29 de enero del 2020 provocaron el desbordamiento de los ríos Pindo y Puyo, y el estero Citayaku en la ciudad del Puyo. Eso provocó una inundación en los sectores La Isla, parte del malecón de la ciudad de Puyo y sectores aledaños a las riveras de los ríos (El Comercio, 2020).

1.3. OBJETIVO

Realizar un análisis espacio-temporal de riesgo de inundación mediante simulación espacial en los ríos Puyo y Pindo Grande de la ciudad de Puyo.

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los datos geométricos e hidrográficos de los ríos Puyo y Pindo Grande.
- Simular el riesgo de inundación mediante modelación hidrológica e hidráulica, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers.
- Determinar áreas de inundación en las partes alta, media y baja de la zona de estudio.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Cantón Pastaza

Pastaza es uno de los cuatro cantones de la Provincia de Pastaza, limita al norte con el cantón Arajuno, al sur con la provincia de Morona Santiago, al este con la Republica del Perú, y al oeste con los Cantones Mera y Santa Clara. El cantón Pastaza tiene una superficie de 19944,86 km2 y 14 parroquias (13 rurales y 1 urbana). La cabecera cantonal es Puyo, donde se agrupa gran parte de la población total del cantón (PDOT Pastaza, 2017).

Puyo fue elevada a parroquia en 1910, durante el Gobierno del General Eloy Alfaro, pero la parroquialización no es oficializada hasta el 14 de agosto de 1925, publicado en el Registro Oficial N° 033. (Ledesma, Pastaza, Una Provincia que Apasiona, 2004).

2.1.2. Parroquia Puyo

La parroquia Puyo lleva su nombre debido a que la palabra Puyo proviene del kichwa Puyu que significa nublado-neblina, en vista que en años anteriores generalmente pasaba nublado este sector. Puyo se encuentra a 100 Km de la Ciudad de Ambato (provincia de Tungurahua), 110 Km de Riobamba (provincia de Chimborazo), 79 Km del Tena (provincia de Napo), 129 Km de Macas (provincia de Morona Santiago), 222 Km de Quito (provincia de Pichincha) y a 372 Km de Guayaquil provincia del Guayas.

Se parroquializó el 12 de mayo de 1899. Al 2015, cumple 116 años. La población, según el VII censo de población y VI de Vivienda, realizado por el INEC en el año 2010, es de: 36.659 habitantes; su extensión es de 96.65 km^2 (PDOT Pastaza,2015)

2.1.3. Clima

Pastaza tiene un clima tropical muy húmedo. La temperatura media anual es de 24, 26 °C y la precipitación anual registra un promedio de 3600 mm (PDOT Pastaza, 2017).

2.1.4. Hidrografía

La cuenca del río Puyo tiene una superficie de 304.41 Km^2, forma parte de la gran cuenca del Amazonas y se extiende desde las estribaciones de la Cordillera Real a 1444 msnm hasta la

intersección de su cauce principal con el río Pastaza a 805 msnm. La corriente principal de la cuenca es el río Puyo de aproximadamente 36 Km de longitud que corre de NW-SE hasta la desembocadura con el río Pastaza.

La cuenca hidrográfica del río Puyo es abierta o exorreica y su sistema fluvial está formado por los ríos Pindo Grande, Sandalias, Putuimi y Chigushimi, como tributarios principales; además de otros subsistemas fluviales de menor importancia como Indillama, Chorreras y Chilcayacu. Al constituir ríos de montaña y estar ubicados en áreas de frecuente precipitación, por su condición y régimen fluvial más del 90 % de sus corrientes son perennes (Vallejo, 2019)

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Variables Hidrometereológicas

Según Chow, *et al*., (1994), las precipitaciones y los caudales son variables hidrológicas que son medidas por las estaciones hidrométricas. Éstas son consideradas variables aleatorias y son definidas mediante una función que les asigna un valor, asociado a cada punto del espacio muestral.

2.2.1.1. Cuenca Hidrográfica

Son espacios territoriales delimitados por un parte aguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica) (González *et al*., 2015).

2.2.1.2. Geomorfología de la Cuenca

Estudia determinados rasgos de la superficie terrestre. Los parámetros geomorfológicos de una cuenca esta, su forma, relieve, características de su red de drenaje y las del cauce principal las cuales se describen a continuación: (Centeno, 2015).

En la figura 1 se establecen los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca según (Fuentes, 2004)



Figura 1. Parámetros morfométricos

Fuente. Fuentes, 2004

2.2.1.3. Precipitación

Las precipitaciones representan el elemento más importante del ciclo hidrológico. Para Fernández (1995), la precipitación, junto con la temperatura, es el elemento climático más influyente en el medio natural, ya que afecta directamente en la distribución de las especies vegetales y animales, y a la vez en las actividades del hombre, como son las agrícolas, las forestales y las económicas entre otras.

La precipitación es un fenómeno caracterizado por su alta variabilidad espacio-temporal (Chen, Lui, An, Gorsdorf & Berger, 2015). Información acerca de esta variabilidad es requerida para la mayoría de aplicaciones meteorológicas, hidrológicas y ecológicas (Chélleri, Willens, Buytaert & Feyen, 2007). Mediciones espacio temporales precisas de la precipitación

son importantes para la aplicación en modelos numéricos de clima, modelos lluvia-escorrentía y validación en tierra de sensores (Chen *et al*., 2015).

2.2.1.4. Caudal

Según Pizarro, *et al*., (1993), se denomina caudal o gasto, al volumen de agua que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo, donde la unidad de medida más comúnmente empleada es m^3/s. Para el ingeniero hidrólogo, el caudal es una variable dependiente en la mayoría de los estudios, puesto que la ingeniería hidrológica se dedica principalmente a estimar volúmenes de flujo, o los cambios en estos valores debido a la acción del hombre (Linsley, *et al*., 1988).

Para el cálculo de caudales existen diferentes metodologías, dependiendo del tipo de información que se disponga, la cual puede ser de tipo fluvial o pluvial; si se cuenta con datos fluviométricos, los caudales son calculados en forma directa a través de análisis de frecuencia de los gastos medidos, en cambio sí se cuenta con información pluviométrica, la estimación de crecidas es estimada por medio de modelos basados en las características morfométricas de la cuenca en estudio (Pizarro, *et al*., 1993).

Al considerar los caudales, son de gran importancia los que representan valores máximos. Linsley, *et al*., (1988) señalan que una caudal punta, es un caudal máximo registrado, el cual sobrepasa los valores normales. En un hidrograma de crecidas, es el valor más alto de la curva. El cálculo de este tipo de caudales es una de las máximas preocupaciones de la ingeniería hidrológica, con el fin de que esta información sea útil en el diseño de obras hidráulicas, además de permitir su cuantificación en volumen y poder así definir estrategias de gestión de los recursos hídricos, hecho que cada vez cobra mayor relevancia.

2.2.1.5. Tratamiento estadístico

Según Chow, *et al*., (1994), un conjunto de observaciones de *x1, x2, . . . , xn*, de la variable aleatoria, se denomina muestra. Una muestra es sacada de una población hipotéticamente infinita, que posee propiedades estadísticas constantes. Las propiedades de una muestra pueden cambiar de una muestra a otra y el conjunto de todas las muestras posibles que pueden extraerse de una población, se conoce como espacio muestral, y un evento es un subconjunto muestral. Si las observaciones de una muestra están idénticamente distribuidas, éstas pueden ordenarse para formar un histograma de frecuencia. Ahora bien, si el número de observaciones ni en el intervalo i que cubre un cierto rango, se divide por el número total de observaciones

n, el resultado se conoce como frecuencia relativa. Asimismo, la suma de los valores de la frecuencia relativa hasta un punto dado, es la función de frecuencia acumulada, y en su límite, cuando $n \rightarrow \infty$ y $\Delta\chi \rightarrow 0$, se denomina función de distribución de probabilidad.

2.2.1.6. Determinación de la probabilidad

El diseño y la planeación de obras hidráulicas, están siempre relacionados con eventos hidrológicos futuros, cuyo tiempo de ocurrencia no puede predecirse; es por eso que se debe recurrir al estudio de la probabilidad o frecuencia (Linsley, *et al*., 1988).

Según Pizarro y Novoa (1986), la definición de la probabilidad implica consignar dos conceptos; uno de ellos es el periodo de retorno, el cual está definido, como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales; sea ese tiempo, T. El segundo concepto es la probabilidad de excedencia, que es la probabilidad asociada al periodo de retorno, donde la variable aleatoria toma un valor igual o superior a cierto número *X* y se define como:

$$P(x) = \frac{1}{T} \tag{1}$$

La probabilidad de que un valor de la variable aleatoria no sea excedido, está dado por la función de distribución de probabilidad *F(x)*, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\int_0^x F(X)dX = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T} \tag{2}$$

Luego la probabilidad de que la variable aleatoria sea mayor que *X*, se expresa como:

$$P(x \leq X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T} \tag{3}$$

2.2.1.7. Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales. Es u método basado en procedimientos estadísticos, que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones a períodos de retorno mayores que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución d probabilidades utilizada es más importante, mientras que, en interpolaciones, l incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (Ashkar, *et al*., 1993).

El análisis de frecuencia determina los parámetros de las distribuciones de probabilidad y obtener con el factor de frecuencia, la magnitud del evento para un período de retorno dado. Para determinar la magnitud de eventos extremos, cuando la distribución de probabilidades no es una función fácilmente invertible, se requiere conocer la variación de la variable respecto a la media.

2.2.1.8. Períodos de retorno de diseño

En los diseños de modelamiento hidrológico, deben definirse inicialmente el o los eventos de precipitación que alimentarán los modelos lluvia-caudal. Usualmente se utiliza una tormenta de diseño que tiene asociada una intensidad media de lluvia, una duración y un período de retorno (*Tr).* Dado que la magnitud de un evento extremo es inversamente proporcional a su frecuencia de ocurrencia, se requiere definir el intervalo de recurrencia o período de retorno (*Tr),* que por definición es el tiempo medio entre ocurrencias en el largo plazo (Parizaca, 2012).

2.2.1.9. Relaciones Intensidad, Duración y Frecuencia

Según Chow, *et al*., (1994), Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de un drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o períodos de retorno apropiados para la obra y el sitio. En muchos casos existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (*IDF*) disponibles para el sitio, luego no hay que llevar a cabo este análisis. Sin embargo, es conveniente entender

el procedimiento utilizado para desarrollar estas relaciones. Usualmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los períodos de retorno de diseño.

2.2.1.10. Funciones de distribución de probabilidad

Aparicio (1989), En la estadística existe decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas, de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema particular. Por lo tanto, es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis. Entre las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología, se estudiarán las siguientes:

- Normal.

- Log normal.

- Pearson III.

- Gumbel.

- Funciones para dos poblaciones.

2.2.1.11. Distribución de Gumbel

Una de las distribuciones actualmente más utilizada es la propuesta por Gumbel, para valores extremos, estos valores en materia de hidrología serían las precipitaciones diarias máximas mensuales, entre los 365 valores del año.

Para aplicar esa ley, se debe tener en cuenta que existen muestras, cada una constituida de 365 elementos, del universo de la población infinita de la variable aleatoria que es el caudal o precipitación diaria. De acuerdo con la ley de los extremos, la ley de distribución de la serie de n términos constituidos por los mayores valores de cada muestra tiende asintóticamente para una ley simple de probabilidades, que es independiente de la que rige la variable aleatoria a las diferentes muestras y en el propio universo de la población infinita.

La función de distribución acumulada de Gumbel es:

$$F(x;\mu,\beta) = e^{-e^{\frac{(x-\mu)}{\beta}}} \quad (4)$$

La mediana es

$$\mu - \beta ln * \left(-ln\left(-ln\left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right) \tag{5}$$

La media es

$$\mu + \gamma\beta \; donde \; \gamma = Constante \; de \; Euler - Mascheroni \approx 0.5773 \tag{6}$$

La desviación estándar es

$$\frac{\beta\pi}{\sqrt{6}} \tag{7}$$

La moda es μ

2.2.1.12. Relación de precipitaciones de 24 horas de duración

Gracias a varios estudios realizados por Daniel Campos Aranda se han determinado una seria de parámetros que permiten la obtención de valores de lluvia máxima de duración de 24 horas, según los siguientes coeficientes:

Tabla 1. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

Duraciones, en horas									
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**12**	**18**	**24**
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Fuente. D.F. Campos, 1978

2.2.1.13. Curvas Intensidad, Duración, Frecuencia IDF

Las curvas *IDF*, resultan de unir puntos representativos de la intensidad de un evento de lluvia, en intervalos de diferente duración, a su vez que el conjunto de puntos se asocia a un mismo período de retorno (Témez, 1978, citado Pizarro, Sangüesa, & Martínez, 2003).

Las curvas *IDF* también se pueden definir como gráficas en las cuales se concentran las características de las tormentas en una región, con respecto a sus 3 variables principales: magnitud, duración y frecuencia. (Campos, 1998, citado en Pereyra-Diaz, Ochoa-Martínez, & Pérez-Sesma, 2005).

2.2.1.14. Cálculo de ecuaciones de intensidad

Se procede con el análisis de las variables involucradas en los eventos de precipitaciones, a fin de determinar los modelos de ecuaciones que ayudarán a la obtención de la intensidad máxima para una duración y período de retorno dado. Esto permitirá representar la relación de la intensidad, duración y frecuencia no sólo de forma gráfica, sino también de forma analítica.

Actualmente existen varios modelos que permiten describir el comportamiento de la lluvia, así como sus parámetros, muchos de ellos provienen de relaciones empíricas, partiendo de la relación existente entre la lámina de lluvia generada y su duración. Varias de las expresiones analíticas paramétricas están caracterizadas por un número variable de 3 a 4 parámetros, permitiendo una mayor flexibilidad de ajuste para los cuantiles de precipitación (UNESCO, 2013).

2.2.1.15. Ecuación de intensidad en función de la duración y el período de retorno

De igual manera, se emplea el modelo de ecuación planteado (Aparicio, 1994), con la diferencia que el número de variables disminuye, ahora se relaciona la intensidad diaria para un período de retorno, con la duración del evento:

$$I = \frac{k * Tr^m}{t^n} \tag{8}$$

Donde:

I: es la intensidad de precipitación (mm/hr)

T: es el periodo de retorno (años)

T: es el tiempo de duración de la precipitación (min)

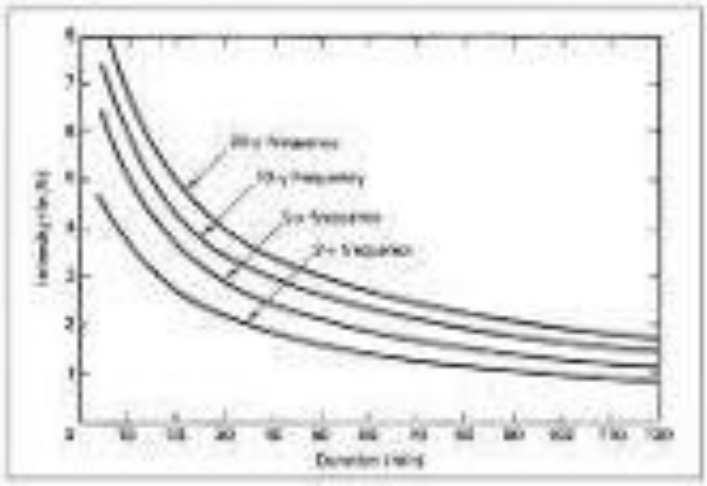


Figura 2. Curvas IDF (Ponce, 1989)

2.2.1.16. Hietogramas de diseño

Fattorelli y Fernández (2011) explican que un hietograma considera la distribución en el tiempo de la lluvia. Este es un diagrama de barras, de lámina o intensidad de la lluvia que está en función del tiempo, donde cada intervalo es de igual duración y la intensidad es constante. Los hietogramas son gráficos en los cuales se expresa la precipitación en intervalos de tiempo.

Los hietogramas son característicos y representan a una determinada tormenta. Representa la intensidad de lluvia durante todo su tiempo de duración y su uso también radica en los softwares que requieren como sucede o evoluciona la lluvia durante todo su tiempo de duración.

Existen una gran variedad de metodologías para poder obtener los hietogramas de diseño, sin embargo, uno de los más usados es la metodología de los bloques alternos. Para la obtención del hietograma de diseño se ordenan los resultados obtenidos, el máximo valor obtenido será el valor central del hietograma, y los valores restantes se alternan uno a uno, lado por lado, y de forma ascendente.

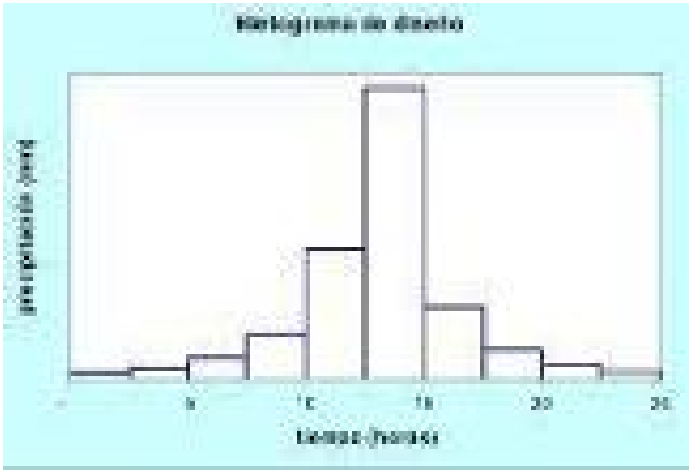


Figura 3. Hietograma de diseño

Fuente: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje Perú, 2008

2.2.1.17. Número de curva de la cuenca

Para la determinación del número de curva *CN* deben considerarse tipo de suelo y uso. Existen cuatro grupos principales de suelos según el punto de vista hidrológico y el potencial de escurrimiento, los que se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Grupos hidrológicos del suelo

Grupo hidrológico del suelo	Potencial de escurrimiento	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos típicos
A	Bajo	Alta	Arenas y gravas excesivamente drenadas.
B	Moderado	Moderada	Texturas medias
C	Alto	Lenta	Texturas finas o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo.
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchables, altamente plásticos y suelos con profundos sobre capas impermeables

Fuente: Hudson, 1997

Las condiciones de humedad indican el estado de humedad del suelo en la cuenca dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta y se resumen en 3 casos como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de humedad

Condición	Tipo de suelo	Descripción
I	Suelo seco	Los suelos están secos pero no hasta el punto de marchitamiento.
II	Suelo con capacidad de campo	Condición promedio. Normalmente en la condición que se considera en el diseño como precedente a las crecientes.
III	Suelo en saturación	Cuando ha llovido mucho el suelo está con muy baja infiltración mínima (casi es posible la infiltración básica)

Fuente: Fattorelli y Fernandez, 2011

Hudson (1997) explica que dependiendo del uso que se le da al suelo la retención aumenta y disminuye la producción de escurrimiento, por lo que se han clasificado dichos usos en diferentes categorías. La Tabla 4 da el valor de *CN* para la condición II, si las condiciones en la cuenca de estudio difieren de las mencionadas deben hacerse las conversiones correspondientes.

El número de curva se determina en función de las condiciones antecedentes de humedad (I) para condiciones secas, (II) para condiciones normales, (III) para condiciones húmedas, los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

$$CN\ (I) = \frac{4.2 * CN\ (II)}{10 - 0.058 * CN\ (II)} \tag{9}$$

$$CN\ (II) = \frac{23 * CN\ (II)}{10 + 0.13 * CN\ (II)} \tag{10}$$

Tabla 4. Estimación del número de curva para condiciones de humedad II

Uso de la tierra		Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales o pastizales	Condición mala	68	79	86	89
	Condición buena	39	61	74	80
Sabanas (tierras de cría)	Condición buena	30	58	71	78
Bosques	Ralo, cobertura pobre	45	66	77	83
	Cobertura buena	25	55	70	77
Espacios abiertos, jardines, prados, campos de golf, cementerios, etc.	Condición buena: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	Condición regular: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Áreas industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial					
Tamaño promedio	% Impermeabilidad				
500 m2 o menos	65	77	85	90	92
1000 m2	38	61	75	83	87
1500 m2	30	57	72	81	86
2000 m2	25	54	70	80	85
4000 m2	20	51	68	79	84
Pavimentos pavimentos, techos accesos, aceras, etc.		98	98	98	98
calles y carreteras					
Calles y caminos	Pavimentos con cunetas y alcantarillas	98	98	98	98
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89

Fuente: Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

2.2.1.18. Hidrograma Unitario SCS

Este método se desarrolló en la década de los setenta por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, el cual permite calcular la transformación lluvia –escorrentía. Su principal aplicación es la estimación de las cantidades de escurrimiento tanto en el estudio de avenidas máximas, como en el caso del cálculo de aportaciones líquidas. (Villón 2002).

El Método surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente, representándose en gráficos, la profundidad de precipitación (*P*) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (*Pe*). Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva *CN*, tal que varía de 1 a 100. Donde un numero de curva *CN* igual a 100, indica que toda la lluvia escurre, y un *CN* igual a 1, indica que toda la lluvia se infiltra por lo que los números de curvas, representan indirectamente coeficientes de escorrentía.

2.2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.2.2.1. GIS

Un Sistema de Información Geográfica (SIG1 o GIS, en su acrónimo inglés Geographic Information System) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística por nombrar unos pocos.

Es una herramienta de análisis de información. La información debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación. (CIESAS, 2012)

2.2.2.2. RPAS

RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System), comúnmente conocido como dron, hace referencia a una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejerce su función remotamente. Un VANT es un vehículo sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.

Puerta (2015), manifiesta que el DRONE es un dispositivo con características muy similares a un avión, su nombre original es Unmanned Aerial Vehicle (UAV), traducido al español significa vehículo aéreo no tripulado. Se los clasifica de acuerdo a su uso, pudiendo ser: de uso militar, de uso investigativo, de uso social. También se los puede clasificar por su aerodinámica en drones de ala fija y con hélices.

2.2.2.3. Uso de RPAS en topografía

Villarreal y Zárate (2015), menciona que los levantamientos topográficos convencionales demandan mayores costos de recursos y tiempo en comparación con la topografía aérea realizada con dron, constituyéndose así en una alternativa considerable al momento de realizar trabajos que cubran grandes extensiones de terreno o de topografía accidentada que dificulte el acceso de personal, con un ahorro significativo de recursos.

2.2.2.4. Fotogrametría

Corredor (2015), asegura que la fotogrametría es la técnica que permite establecer las dimensiones y posición de objetos en el espacio a partir de fotografías aéreas, lográndolo a partir de la intersección de dos o más fotos, obteniendo así modelos digitales de terreno que sirven para múltiples usos en la rama de la ingeniería.

La información cartográfica mundial es resultado de la fotogrametría. Sus inicios tuvieron que ver con la fotogrametría analógica, luego la analítica y en la actualidad gracias a los avances tecnológicos tenemos la fotogrametría digital (Universidad Nacional del Nordeste [UNN], 2012). Coder (2013), considera que la fotogrametría nace a partir de la necesidad de información precisa, es por esto que la precisión de los parámetros internos de la cámara, como es el ajuste, se lo debe hacer por determinados métodos matemáticos, de igual forma la posición de la cámara en la toma de fotografías, siendo todo esto solventado tras la era digital que ha contribuido a la precisión de la fotogrametría aérea UAV.

2.2.3. SISTEMAS DE SIMULACIÓN

2.2.3.1. Sistema simulación de modelamiento hidrológico HEC-HMS

El HEC – HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica del tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una sola cuenca o varias subcuencas (información

resultante: caudales máximos y tiempo pico) a partir de información de lluvia, aplicando para ello métodos de cálculo de transformación de lluvia a escorrentía, perdidas por infiltración y flujo base.

El Sistema de Modelado Hidrológico es una aplicación desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers). Con el modelo HEC-HMS, se puede simular la respuesta que tendrá la cuenca de un río en s escurrimiento superficial, como producto de la precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos.

Cada componente modela un aspecto del proceso de escurrimiento por precipitaciones dentro de una parte de la cuenca comúnmente referida como una subcuenca. Un componente puede representar una identidad de escurrimiento superficial, un canal de flujo o embalse.

La representación de un componente requiere un conjunto de parámetros que especifiquen las características particulares del componente y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. El resultado del proceso del modelaje es el cálculo de los hidrógrafos del flujo en sitios elegidos de la cuenca del río.

2.2.3.2. Sistema de simulación de modelamiento Espacial QGIS

Quantum GIS (QGIS) es un sistema de información geográfica de código abierto.

El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto dentro de Source Forge (repositorio de proyectos en software libre) en junio del mismo año. El objetivo inicial fue proporcionar un visor de datos SIG. QGIS se ha ido desarrollando como una alternativa al software SIG comercial, tradicionalmente caro. Actualmente QGIS puede ser ejecutada en la mayoría de plataformas Unix, Windows y OSX. (SERNANP, 2015) Además, soporta un gran número de formatos ráster y vectoriales, con nuevos soportes fácilmente añadibles utilizando su arquitectura de complementos.

A su vez se ha publicado bajo licencia pública de GNU (GNU General Public License, por sus siglas en inglés GNU GPL). Desarrollar QGIS bajo esta licencia quiere decir que se puede inspeccionar y modificar el código fuente. Con esto se logra que los usuarios siempre tengan acceso a un programa SIG gratis y que pueda ser libremente modificado.

2.2.3.3. Complemento RiverGIS

RiverGIS es un complemento QGIS para crear la geometría del modelo de flujo HEC-RAS a partir de datos espaciales. La funcionalidad es similar a la de HEC-GeoRAS, para el almacén de datos y las operaciones espaciales, necesita una base de datos PostGIS.

Una vez creada la geometría del modelo, podemos exportarlos a HEC RAS para realizar diferentes simulaciones con varias hipótesis de caudal y posteriormente importar desde QGIS los resultados para obtener detalladas ilustraciones de las inundaciones provocadas por una avenida o la rotura de un dique, etc.

2.2.3.4. Sistemas de simulación de modelamiento Hidráulico HEC-RAS

Este software, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologia Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), es una mejora del programa HEC-2, ya que mejora el modo de interactuar el programa con el usuario permitiéndole un mayor dominio del programa. El modelo numérico del programa realiza un análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

El programa HEC-RAS es un programa específicamente desarrollado para el cálculo de modelos hidráulicos en cauces naturales, con las diferencias que existen con respecto al cálculo en secciones prismáticas o bien definidas.

El modelo HEC-RAS simula el flujo unidimensional permanente en canales abiertos. Además, puede calcular el perfil de agua para régimen permanente gradualmente variado y simular flujo subcrítico y supercrítico empleando las ecuaciones de Saint Venant aplicadas a una dimensión. Para esto resuelve la ecuación de la energía para una dimensión, y puntualmente, también soluciona la ecuación de cantidad de movimiento cuando el perfil de agua es rápidamente variado (resaltos hidráulicos, confluencias y puentes).

Con este programa es posible obtener el perfil de la lámina de agua en un tramo de cauce, así como interpretar los resultados de las simulaciones del modelo y calcular las situaciones más frecuentes que se presentan en la realidad, e interactuar los resultados de HEC-RAS a través del uso de un SIG.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

El proyecto de investigación se realizó en la ciudad de Puyo, de la parroquia Puyo, Cantón Pastaza, tomando como objetos de estudio los ríos Puyo y Pindo Grande, ubicados en la unidad hidrográfica cuenca del Pastaza, subcuenca Áreas Menores, específicamente en la microcuenca del río Puyo.

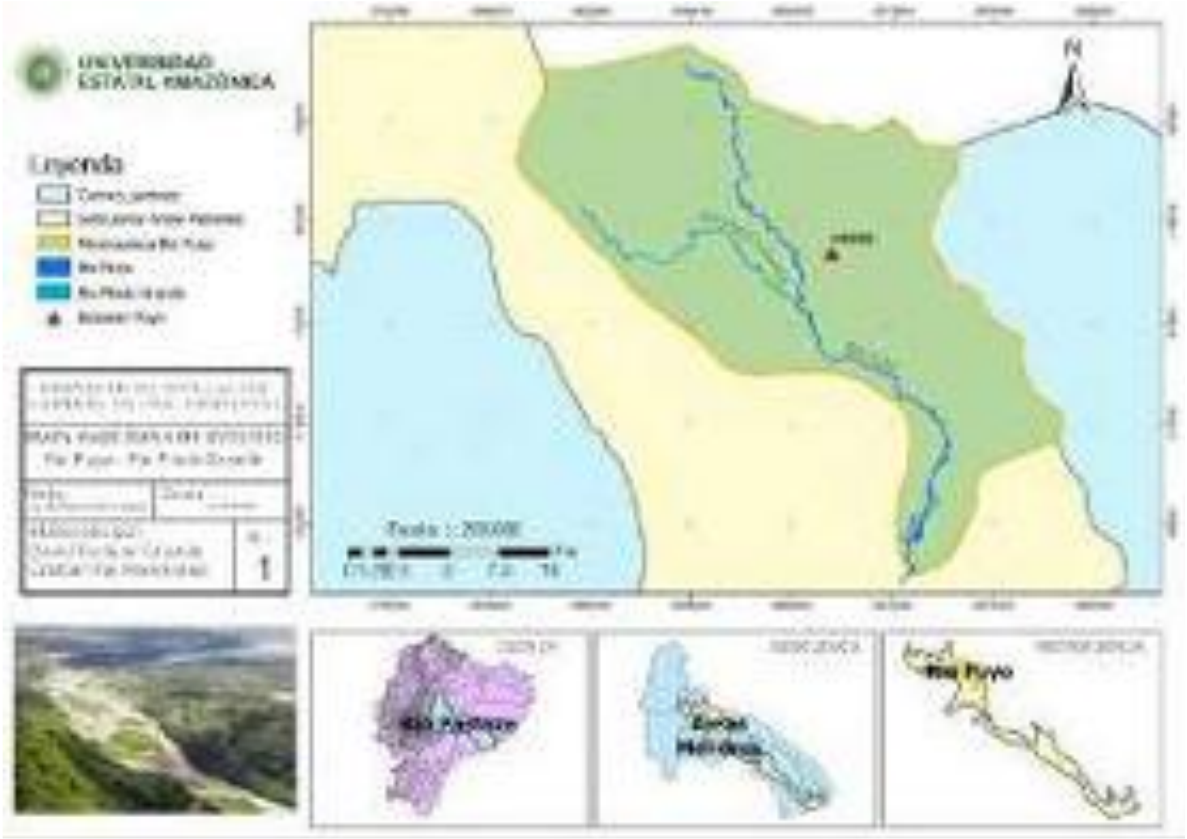


Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Elaborado por: Autores

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se inició el estudio mediante investigación documental, debido a la extensa búsqueda de material bibliográfico necesaria para la comprensión y desarrollo de los diferentes objetivos del presente proyecto.

También se realizó investigación de campo, para la obtención de información, meteorológica, topográfica y ortofotos necesarias para el desenvolvimiento del estudio.

Además de investigación descriptiva, en la cual se determinaron las características hidrográficas, hidrológicas e hidráulicas en las tres zonas definidas para el estudio pertenecientes al río Puyo y Pindo Grande.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación que se empleo es el hipotético - deductivo, en función al planteamiento del problema y a la determinación experimental de las características hidrográficas, hidrológicas e hidráulicas de los fenómenos que se están desarrollando en el área de estudio.

3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1. Identificación de la zona de estudio

Para la determinación de la zona de estudio, en cada río se establecieron tres zonas de interés, de acuerdo a lugares con problemas constantes de inundación y los asentamientos humanos, así como la evolución del desarrollo urbano, definiendo así, una zona alta, una zona media y una zona baja, objeto de estudio.

Las tres zonas de referencia para el río Puyo y río Pindo Grande, fueron definidas cartográficamente mediante el uso de herramienta SIG, posteriormente se organizaron las salidas de campo y planificaciones de vuelo del dron necesarios para la obtención de la topografía del terreno y fotografías aéreas de excelente calidad.



Figura 5. Mapa de ubicación de la zona alta, media y bajo de estudio.

Elaborado por: Autores

3.4.2. Caracterización de la microcuenca

Para la caracterización de la microcuenca del río Puyo, se tomaron en consideración los parámetros fisiográficos, morfométricos y de drenaje más importantes que ayudarían a explicar el comportamiento hidrológico de la microcuenca y los fenómenos que ahí ocurren.

3.4.2.1. Parámetros fisiográficos

3.4.2.1.1. Área de la cuenca *A (km²)*

Es la superficie del terreno de las aguas de las precipitaciones que concurren a un mismo punto de evacuación a través de cauces secundarios o quebradas que se unen a un cauce principal. Se considera como el área a la proyección horizontal incluida dentro de su línea divisoria, medida en kilómetros cuadrados, hectáreas u otras unidades de superficie.

3.4.2.1.2. Perímetro de la cuenca *P (km)*

Es la longitud de la línea divisoria de aguas, iniciando y terminando en el mismo punto, medido en (Km) u otras unidades de longitud como millas. Cuando se compara cuencas de la misma área, este parámetro es útil para diferenciar la forma de la cuenca. Es decir, si es alargada o redondeada. Sirviendo además para calcular varios parámetros que definen una cuenca. En la época previa a las computadoras, este era calculado utilizando herramientas como el planímetro.

3.4.2.1.3. Longitud de la cuenca *L (km)*

La longitud de la cuenca está definida por la longitud de su cauce, siendo la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba.

3.4.2.1.4. Ancho de la cuenca *W (km)*

El ancho se define como la relación entre el área *(A)* y la longitud *(L)* de la cuenca.

$$W = \frac{A}{L} \tag{11}$$

3.4.2.1.5. Pendiente de la cuenca *S (m/m)*

Diferencia entre la cota más alta y más baja divida para la longitud de la cuenca.

$$\boldsymbol{S = \frac{Cmayor - Cmenor}{L * 1000}} \tag{12}$$

3.4.2.1.6. Factor de forma de la cuenca *Ff*

Es uno de los parámetros que explica la elongación de una cuenca. Se expresa como la relación entre el ancho de la cuenca *(W)* y su longitud *(L).*

$$Ff = \frac{W}{L} \tag{13}$$

En función de este parámetro se puede decir que una cuenca es:

Tabla 5. Factor de forma de la cuenca

Factor de forma (valores aproximados)	**Forma de la cuenca**
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

3.4.2.1.7. Coeficiente de compacidad de la cuenca *Kc*

También llamado Índice de Gravelius, representa la relación entre el Perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área igual.

$$K = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}} \tag{14}$$

3.4.2.2. Parámetros Geomorfológicos

3.4.2.2.1. Altitud media de la cuenca H_m *(m)*

Es la sumatoria del producto entre la altitud media entre dos curvas de nivel *(Hi)* consecutivas y el área comprendida entre esas dos curvas *(Ai).* Dividida para el área de la cuenca *(A).*

$$H_m = \frac{\sum(Ai * Hi)}{A} \tag{15}$$

3.4.2.2.2. Curva Hipsométrica

Representa la superficie de la cuenca que se encuentra sobre una cota, permitiendo caracterizar el relieve de la cuenca. También podría verse como la variación media del relieve de la cuenca. Se construye representando en el eje de las abscisas los valores de superficie drenada

proyectada, en Km^2 o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se representa en el eje de las ordenadas, generalmente en metros.

3.4.2.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas

Representa en el eje de las ordenadas, el porcentaje parcial del área de la cuenca, y en el eje de las abscisas el rango de alturas en metros sobre el nivel del mar comprendidas dentro de ese porcentaje. El Histograma de Frecuencias es un complemento de la Curva Hipsométrica y permite determinar los niveles de altura más frecuentes en una cuenca, que se representarán a través del porcentaje más alto del diagrama.

3.4.2.3. Parámetros del Sistema de Drenaje

3.4.2.3.1. Orden de corrientes

Representa una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca.
Para elaborar esta clasificación, es necesario disponer de la Red de Drenaje completa. A los cauces iniciales se les asigna un valor de uno. Cuando dos cauces con valor de uno se juntan forman uno de valor dos. Y así respectivamente con los números más altos.

3.4.2.3.2. Relación de bifurcación *Rb*

Define el cociente entre el número de cauces de cualquier orden y el número de las corrientes del siguiente orden superior, su valor máximo teórico es de 3, y sus valores típicamente suelen estar entre 2 y 2.8.

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \tag{16}$$

3.4.2.3.3. Longitud del río principal *LR (km)*

Representa la longitud del Cauce Principal dentro de la Cuenca Hidrográfica.

3.4.2.3.4. Longitud de tributarios *LTrib (km)*

Es la suma de la longitud de todos los cauces tributarios, sirve como un indicador de la pendiente de la cuenca, así como de su grado de drenaje.

Las áreas escarpadas y bien drenadas, usualmente tienen numerosos tributarios pequeños, mientras que, regiones planas, donde los suelos son profundos y permeables, se tienen solo tributarios largos, que generalmente son corrientes efímeras.

3.4.2.3.5. Longitud total de drenaje *LT (km)*

Es la suma de la longitud del cauce principal y el total de la longitud de los tributarios.

$$L_T = L_R + L_{Trib} \tag{17}$$

3.4.2.3.6. Densidad de drenaje *Dd (km/km²)*

Representa la ocupación de cauces a lo largo de la cuenca. Resulta un indicador de la posible naturaleza de los suelos. Valores altos, representan zonas con poca cobertura vegetal, suelo fácilmente erosionables o impermeables. Por el contrario, valores bajos, indican suelos duros, poco erosionable o muy permeables y con cobertura vegetal densa.

$$D_d = \frac{L_T}{A} \tag{18}$$

Se lo puede clasificar en:

Tabla 6. Valores de la Densidad de drenaje

Densidad de drenaje (valores aproximados)	Clases
0.1 a 1.8	Baja
1.9 a 3.6	Moderada
3.7 a 5.6	Alta

Fuente: Fuentes Juncos, (2004)

3.4.2.3.7. Extensión media de escurrimiento *Es (km)*

Este parámetro representa la distancia media que la Precipitación que se transforma en Escorrentía tendrá que desplazarse por la ladera hasta alcanzar un cauce de agua cercano.

$$E_s = \frac{A}{4 * L_{Trib}} \tag{19}$$

3.4.2.3.8. Frecuencia de ríos Fr *(Nríos/km²)*

Relaciona el número total de todos los ríos de la cuenca, con la superficie total.

$$F_r = \frac{\sum N_i}{A}$$

(20)

3.4.2.3.9. Pendiente media del cauce *SR (m/m)*

Es la diferencia total de elevación del lecho del río dividida por la longitud entre esos dos puntos.

$$S_R = \frac{Cmayor - Cmenor}{L_R * 1000}$$

(21)

Tabla 7. Rangos de pendiente del cauce

Pendiente media (%)	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Pérez, (1979)

3.4.2.3.10. Perfil longitudinal del río

Es el gráfico de la proyección horizontal del cauce principal versus sus alturas, que nos permite tener una idea de la pendiente en distintos tramos.

3.4.2.3.11. Coeficiente de torrencialidad *Ct (Nrios/km^2)*

Este parámetro resulta de la relación entre el número de cauces de agua de orden uno y el área de la cuenca en kilómetros. A mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor. Este resultado significa que el agua recorre muy poco para dirigirse a los cauces principales y la velocidad de descarga es mayor.

$$C_t = \frac{N1}{A}$$

(22)

3.4.2.3.12. Coeficiente de masividad *Cm (m/km^2)*

Este parámetro resulta de la relación entre la altitud media de la cuenca y el área de la

misma. Su resultado es alto para cuencas de cumbres altas y bajo en cuencas donde predominan terrenos planos.

$$C_m = \frac{H_m}{A} \tag{23}$$

3.4.2.3.13. Tiempo de concentración *Tc (min)*

Es el tiempo de viaje del punto más distante de la cuenca. Suele asumirse como el tiempo que requiere la cuenca para alcanzar un estado estacionario tras una tormenta, es decir, el tiempo que pasa para que un río vuelva a tener su caudal normal luego de un evento de crecida.

$$T_c = 0.066 * \left(\frac{L_c}{S^{0.55}}\right)^{0.77} \tag{24}$$

3.4.2.3.14. Precipitación Neta *NP* del Soil Conservation Service

Es un procedimiento empírico, para la obtención de la precipitación efectiva o neta, desarrollado el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service) con base a numerosos datos de cuencas experimentales de dicho país, se basa en la observación de eventos de precipitación ocurridos y las condiciones de la cuenca en dichos eventos.

El método utiliza una serie de curvas, las cuales llevan un número *(CN)* que varía del 1 al 100. Un número de curva de 100 significa que toda la precipitación generaría Escorrentía, y un valor de 1 indica que toda la lluvia se infiltra.

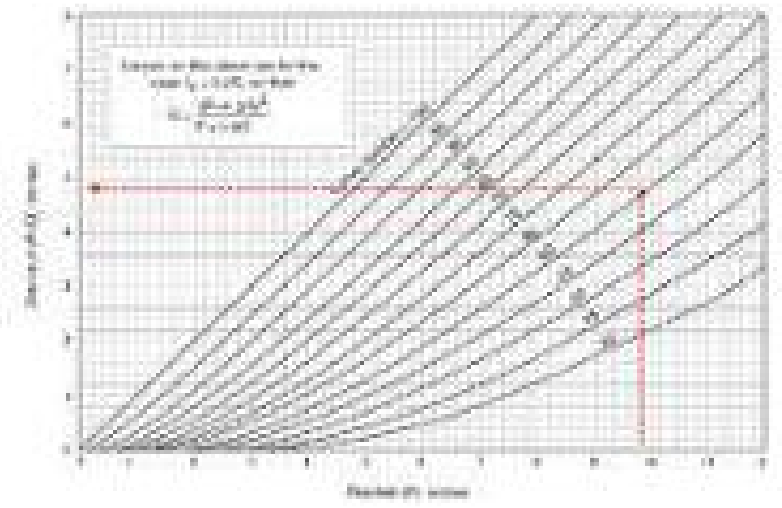


Figura 6. Número de Curva

La formulación matemática del modelo propuesto por la SCS, se basa en relaciones de forma analítica de acuerdo a abstracciones empíricas llegando como resultado al valor de escorrentía que equivale a la precipitación neta.

$$E \approx P_N$$

$$E = 0, si\ p\ \leq 0.2 * S_p \tag{25}$$

$$E = \frac{\left(p - 0.2 * S_p\right)^2}{p + 0.8 * S_p}, si\ p\ > 0.2 * S_p \tag{26}$$

Las Abstracciones Potenciales *(mm)* se calcula de la relación empírica calculada con los datos de diversas cuencas experimentales en función al Número de Curva, llegando a:

$$S_p = 25 * \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \tag{27}$$

3.4.2.3.15. Número de curva *CN*

Los valores del Número de Curva *(CN)*, se obtienen de tablas, estos dependen de las condiciones iniciales de humedad del suelo, la clasificación de los suelos según sus características hidrológicas, la condición hidrológica y los usos del suelo.

3.4.2.3.16. Condiciones iniciales de la cuenca

Debido a las dificultades para determinar las condiciones iniciales, el SCS reduce estas condiciones a los siguientes casos:

Caso 1: Suelo Seco

Caso en que los suelos se secan sin llegar al punto de perder la cohesión; o sea, cuando se puede arar o cultivar en buenas condiciones (lámina 0-35 mm).

Caso 2: Suelo Normal

Caso medio para crecidas anuales, es decir, las condiciones medias existente antes de que se produzca la máxima crecida anual en dichas cuencas (lámina 35-50 mm).

Caso 3: Suelo Húmedo

Cuando en los 5 días anteriores a la tormenta dada, se han producido lluvias fuertes o lluvias

tenues con bajas temperaturas y el suelo está casi saturado (lámina mayor de 50mm).

Clasificación hidrológica de los suelos

Los suelos han sido clasificados en 4 grupos: A, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escorrentía.

Tipo A

En estos el agua se infiltra rápidamente, aun cuando estén muy húmedos. Suelen ser profundos y de texturas gruesas (arenosas o areno-limosas), están excesivamente drenados. **Tipo B**

Cuando están muy húmedos tiene una capacidad de infiltración moderada. La profundidad del suelo es de media a profunda, y su textura franco- arenosa, franca, franco-arcillosa o franco-limosa, según terminología del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Están bien o moderadamente drenados.

Tipo C

Cuando están muy húmedos la infiltración es lenta. La profundidad del suelo es inferior a la media y su textura es arcillo-limosa, limoso o arcillo- arenosa. Son suelos imperfectamente drenados.

Tipo D

Cuando están muy húmedos la infiltración es muy lenta. Tienen horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella y están pobremente o muy pobremente drenados. También se incluyen aquí los terrenos con nivel freático permanentemente alto y suelos de poco espesor (litosuelos).

3.4.2.3.17. Condición hidrológica

El tipo de cobertura vegetal tiene un marcado efecto sobre el proceso de intercepción, evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración, sin embargo, durante la tormenta prevalece la infiltración. La condición hidrológica, como indicador de la situación para la infiltración, se usa como índice de cobertura vegetal; y se define de la siguiente forma:

Buena: cobertura superior al 75%

Regular: entre 50% - 75%

Mala: menor del 50%

3.4.2.3.18. Usos de suelo

Representa la cobertura de la cuenca e incluye toda clase de vegetación, escombro, pajonal, así como superficies de agua (lagos, pantanos) y superficies impermeables (carreteras, zonas urbanas). El uso de la tierra tiene efecto sobre la respuesta de la cuenca a los fenómenos hidrometeorológicos.

Por ejemplo, a medida que se deforesta una cuenca aumentan los picos de crecida y baja el caudal de estiaje (caudal mínimo del río, a partir del cual se miden las crecidas).

Finalmente, el Número de la Curva para suelos en condiciones iniciales normales (CNII) se obtiene a través de Tablas.

3.4.3. SIMULACIÓN

3.4.3.1. Simulación Hidrológica

La información meteorológica necesaria para el modelo hidrológico fue obtenida del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, de la estación Puyo con cogido M0008, la cual se encuentra directamente dentro del área de estudio.

La estación Puyo proporcionó datos de precipitaciones en 24 horas mensuales desde 1990 hasta el 2020, con lo cual se obtuvieron las precipitaciones máximas en 24 horas.

Para analizar el comportamiento de los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico con base en la distribución de probabilidades pluviométricas propuesta por Gumbel, en función de los meses más lluviosos, dando como resultado la ecuación de intensidad de la lluvia y la determinación de las curvas Intensidad, Duración y Frecuencias *(IDF)*.

Las curvas IDF aportaron con la identificación de lluvias con intensidades de eventos máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Determinados los valores de intensidades por cada periodo de retorno y con ayuda de los parámetros fisiográficos, geomorfológicos y de red de drenaje, procedentes de la caracterización de la microcuenca, se halló el valor de la precipitación en 24 horas, multiplicado la duración de la tormenta, obtenida de la fórmula de tiempo de concentración de la cuenca T_c, propuesta por California, por la intensidad de la lluvia I, para intervalos de 10 minutos, con el fin de determinar el comportamiento y evolución de la lluvia por medio del desarrollo de los hietogramas de diseño para cada periodo de retorno.

Los datos pluviométricos de cada Hietograma fueron insumos para la realización del modelo

hidrológico mediante la utilización de la herramienta informática HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydologic Modeling System), simulando parámetros de escorrentía máxima para un tiempo de control de 24 horas, los criterios utilizados dentro de la simulación del modelo fueron los establecidos por el SCS (Soil Conservation Service) tanto para las perdidas, mediante el número de curva *CN*, así como para la transformación de la precipitación a caudal, con el flujo de diseño estimado y constante durante la corrida de la simulación del modelo hidrológico, obtenido así los Hidrogramas de crecidas para cada periodo de retorno, necesarios para la simulación del modelo Hidráulico.

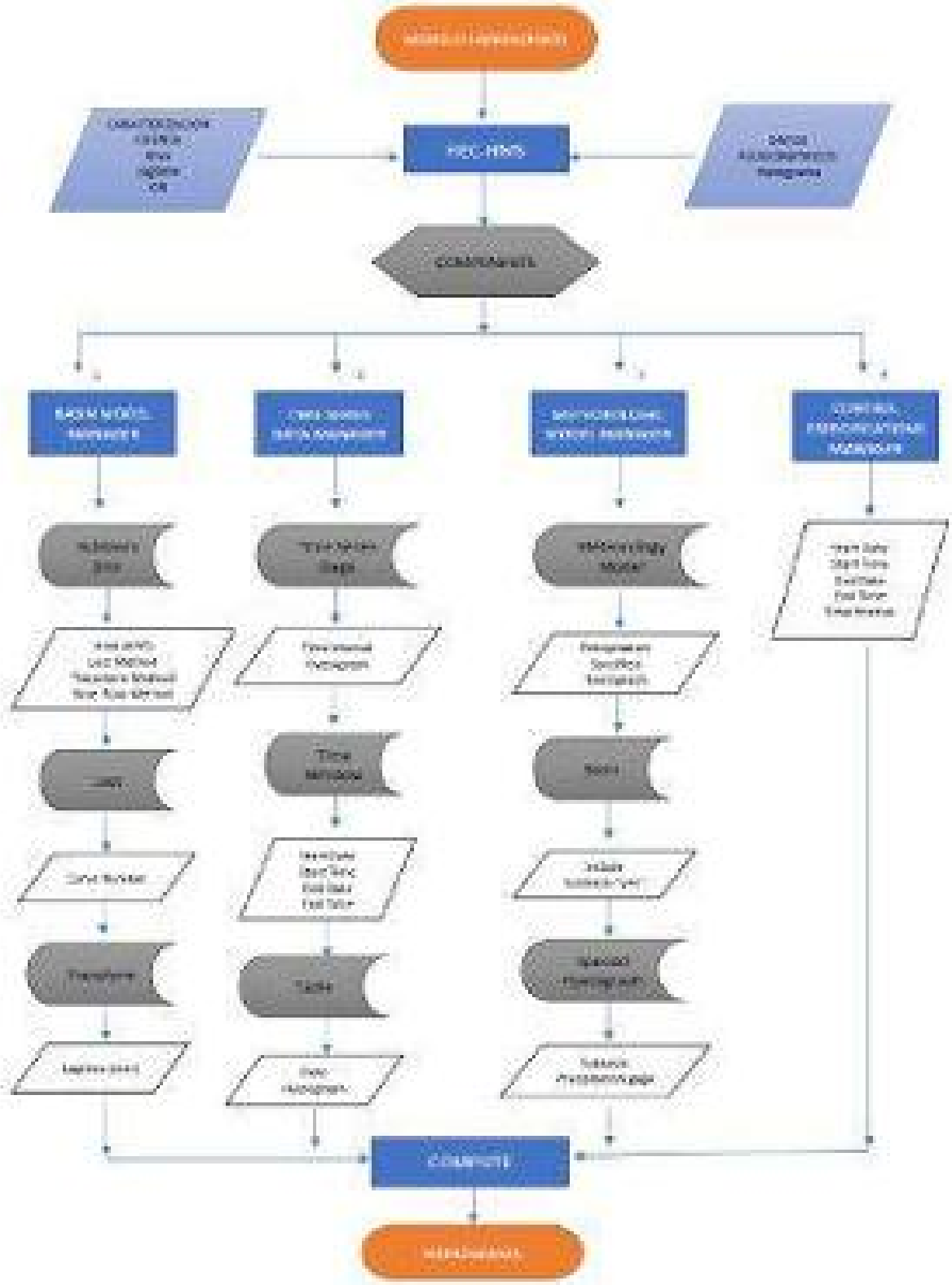


Figura 7. Flujograma del proceso de simulación hidrológica

Elaborado por: Autores

3.4.3.2. Simulación Espacial

3.4.3.2.1. Fotogrametría de las zonas de estudio

La información digital como modelo de elevación del terreno *DTM*, curvas de nivel y ortomosaicos, se obtuvo gracias a la herramienta RPAS, dron Phantom 3 pro, con el cual se realizaron tres salidas de campo por cada zona de estudio, con un total de 18 vuelos planificados con la aplicación PIX4D capture, posteriormente las imágenes fueron procesadas con el software PIX4D mapper con licencia trial, determinando así los modelos digitales de terreno *DTM*, curvas de nivel cada 0,5 metros y las ortofotos de la zona alta, media y baja de los ríos Puyo y Pindo Grande.

3.4.3.2.2. Procesamiento de datos topográficos

Con la información fotogramétrica se realizó la geometría de las zonas de estudio gracias a la herramienta QGIS y al complemento RiverGIS, creando información vectorial ráster para simulación en 1D con las opciones, *"Stream Center Line"*, que ubica el centro y la dirección del río, *"Bank Lines"*, que establece los bancos del río, *"Flow Path Centerlines"*, que direcciona el margen de inundación izquierdo y derecho, así como el centro del cauce, y la opción *"XS Cut Lines"* que genera las secciones transversales de la zona de estudio, los cuales con procesados con la información del DTM.

Para la simulación en 2D se utilizó la opción *"2D Flow Area"*, con la cual se estableció un polígono, malla y puntos interpolados con relación al modelo digital de Terreno DTM.

Tanto para la simulación de los modelos hidráulicos en 1D y 2D, se exporto la información topográfica mediante la opción "*Create RAS GIS import file"* y *"Save 2D Points to HEC-RAS Geometry"* respectivamente, del complemento RiverGIS, necesario para la simulación hidráulica.

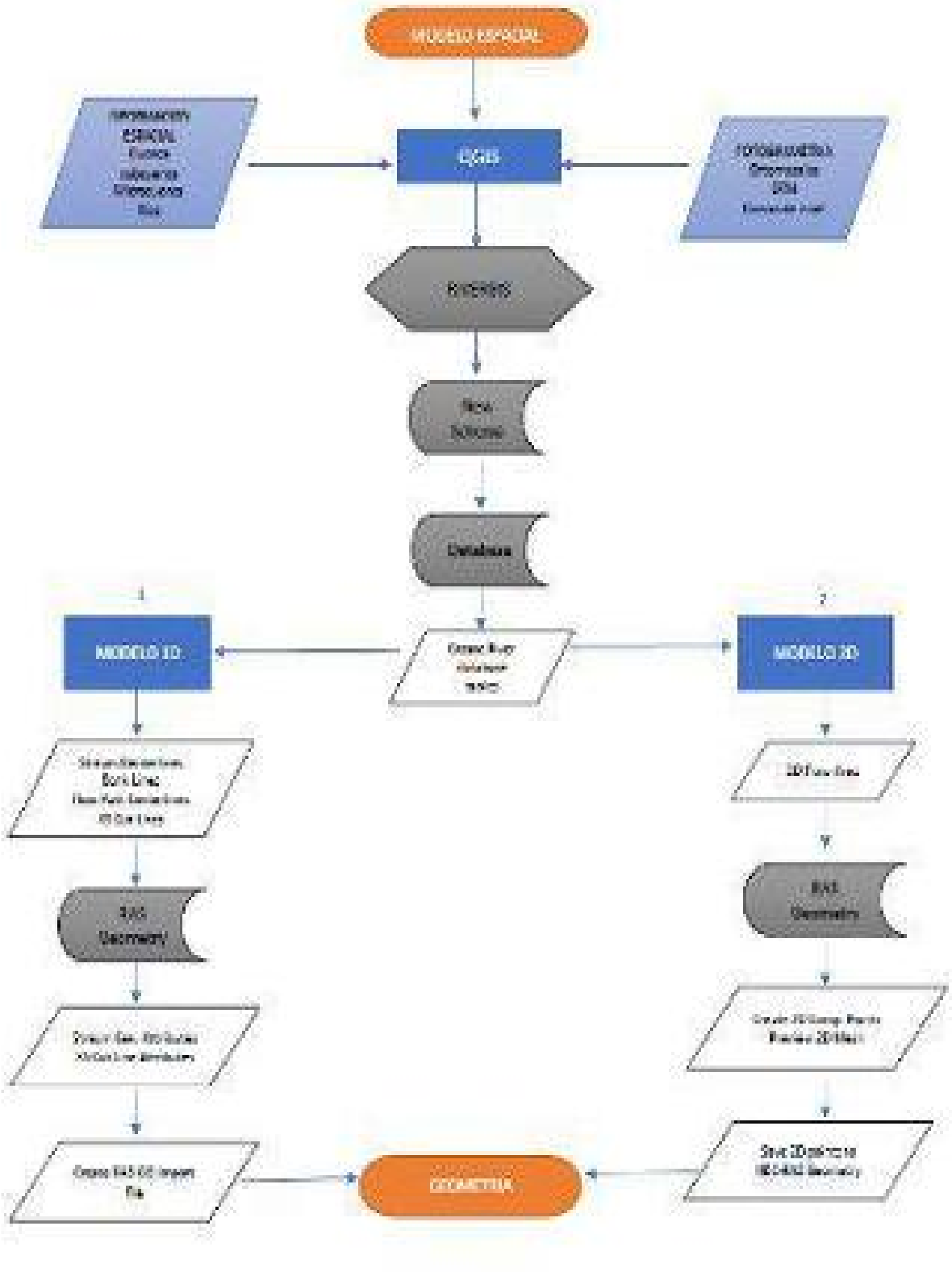


Figura 8. Flujograma del proceso de simulación espacial

Elaborado por: Autores

3.4.3.3. Simulación Hidráulica

Los datos geométricos realizados en la simulación espacial, fueron utilizados en el software HEC-RAS. Para la simulación del modelo en 1D se importaron las geometrías de cada zona de estudio, a las cuales se les incorporo su número de rugosidad de Manning para los márgenes izquierdo, derecho y central de acuerdo a la siguiente tabla para coeficientes de rugosidad en cauces naturales de la página IdrojING (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes de rugosidad para cauces naturales

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
-Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
-Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
-Limpios con meandros, con algunos pozos y barras	0,033	0,040	0,045
-Meandros con algunos pastos y piedras	0,035	0,045	0,050
-Meandros con muchas piedras	0,040	0,050	0,060
-Tramos rectos con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
-Tramos con mucho pasto, pozos profundos y cauces crecidos con muchos árboles y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
-Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
-Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundables			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
-Pasto corto	0,025	0,030	0,035
-Pasto alto	0,030	0,035	0,050
A.2.2 Zonas cultivadas			
-Sin cultivo	0,020	0,030	0,040
-Cultivo sembrados en línea con bajo grado de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
-Cultivo sembrados a todo lo ancho con alto grado de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
-Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
-Pequeños árboles y arbustos sin hojas (época invernal)	0,035	0,050	0,060
-Pequeños árboles y arbustos con hojas (buen vegetativo)	0,040	0,060	0,080
-Arbustos medianos a densos durante la época invernal	0,045	0,070	0,110
-Arbustos medianos a densos durante la buen vegetativo	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
-Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
-Terreno claro con troncos sin retoños	0,030	0,040	0,050
-Terreno claro con troncos con gran cantidad de brotes	0,050	0,060	0,080
-Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
-Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cursos secundarios análogos, ya que los taludes ofrecen una resistencia efectiva menor.			
-Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
-Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Fuente: IdrojING

Se simularon 6 perfiles de flujo permanente en condiciones de régimen de flujo mixto, para los caudales máximos obtenidos en la simulación del modelo hidrológico con HEC-HMS, para los periodos de retorno TR 10 años, TR 5 años, TR 10 años, TR 25 años y TR 100 años.

Para la simulación del modelo en 2D se utilizó la malla de puntos interpolada con el modelo de elevación de terreno *DTM*, para condiciones de flujo no permanente, ubicando la entrada aguas arriba y la salida aguas debajo de las zonas de estudio.

Para la entrada aguas arriba se estableció la condición de borde, de acuerdo al hidrograma de crecidas, obtenido en la simulación del modelo hidrológico en HEC-HMS para cada periodo de retorno.

Para las salidas aguas abajo, se estableció la condición de borde de profundidad normal, de acuerdo a la pendiente de la microcuenca para cada periodo de retorno objeto de estudio.

Se realizaron 6 simulaciones de acuerdo a los hidrogramas con intervalos de 10 minutos, de cada período de retorno, con una duración de 24 horas, dando como resultado un flujo dinámico de inundación.

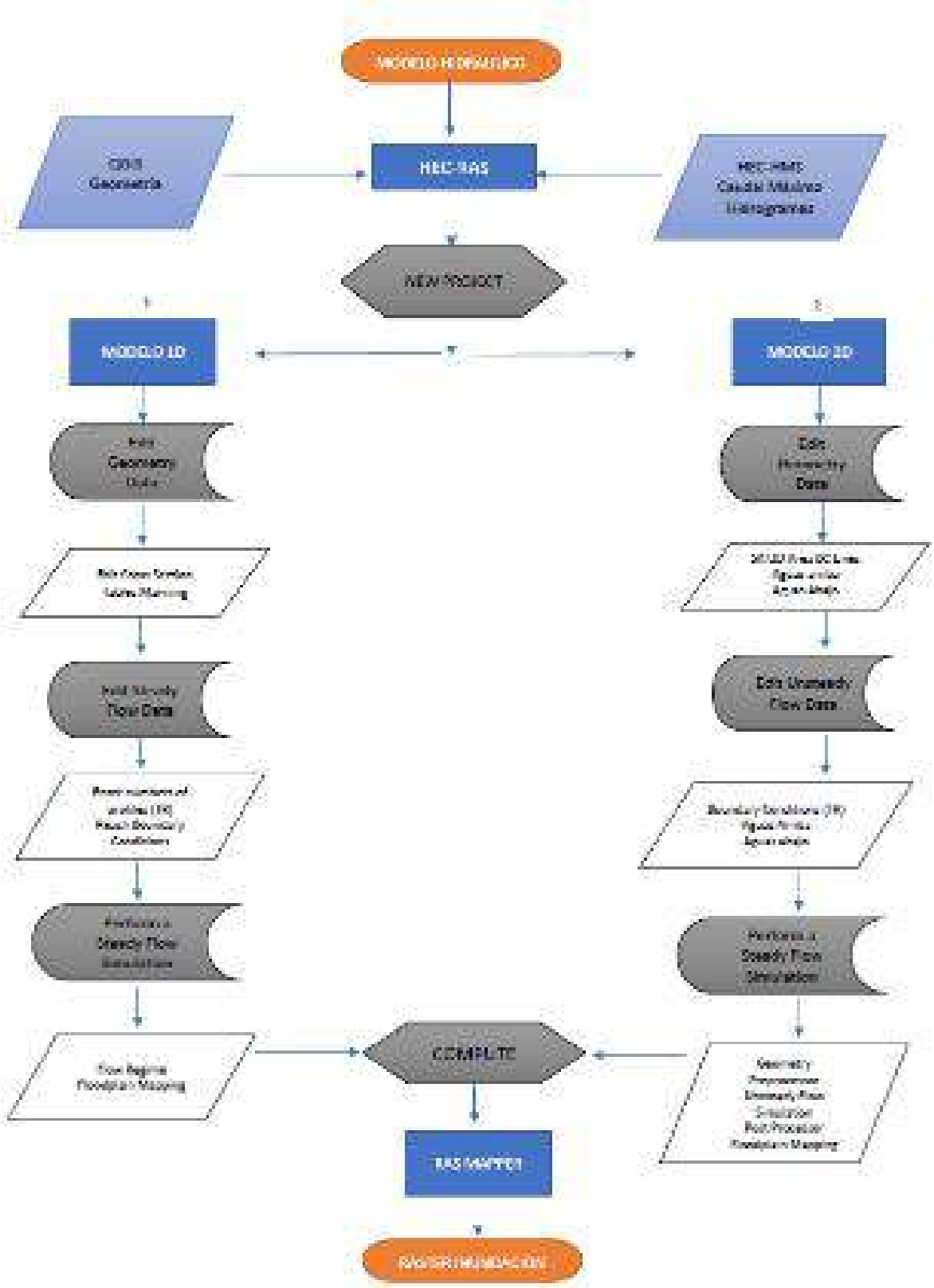


Figura 9. Flujograma del proceso de simulación hidráulica

Elaborado por: Autores

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MICROCUENCA

4.1.1. Parámetros Fisiográficos

Los parámetros fisiográficos encontrados en la microcuenca del Rio Puyo, establecen q la cuenca presenta un área catalogada como “intermedia-pequeña”, con una forma “ligeramente alargada” y un índice de compacidad “irregular”, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros Fisiográficos de la microcuenca del Río Puyo

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Área (A)	304.41	Km^2	Intermedia pequeña
Perímetro (P)	90.35	Km	
Longitud cuenca (L)	31	Km	
Longitud Rio Principal (Lc)	36	Km	
Ancho cuenca (W)	9.82	Km	
Cota mayor (Cmayor)	1444	m	
Cota menor (Cmenor)	805	m	
Pendiente cuenca (S)	0.0206		
Factor de forma cuenca (Ff)	0.3168		Ligeramente alargada
Coeficiente de compacidad (Kc)	1.4500		Irregular

Elaborado por: Autores

4.1.2. Parámetros Geomorfológicos

Dentro de los parámetros geomorfológicos de la microcuenca, presenta una altura media de 1034.85 msnm y mediante los cálculos realizados para la obtención de la curva hipsométrica, se establece que la microcuenca del río Puyo corresponde a una cuenca de tipo B, es decir, madura, que se encuentra en equilibro, pero que predomina el transporte de material, así como se muestra en la figura 10.

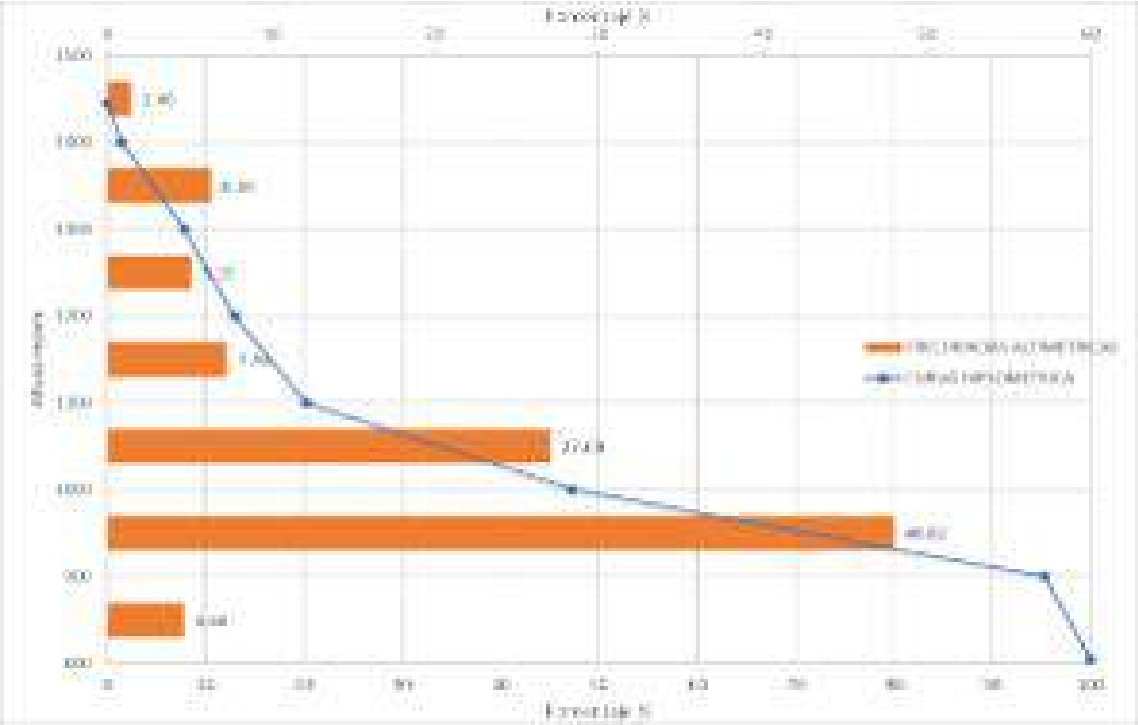


Figura 10. Curva Hipsométrica e Histograma de frecuencias altimétricas de la microcuenca Río Puyo

Elaborado por: Autores

4.1.3. Parámetros de la Red de Drenaje

Los parámetros de la Red de Drenaje arrojo valores que establecen que el orden de corriente según Strahler es de 3, con tributarios en forma de abanico, además según el coeficiente de masividad, densidad de drenaje y perfil del río indican, que se encuentra en una zona montañosa con mayor energía, alta precipitación, moderado control estructural y mayor velocidad de transporte, por ende, moderada capacidad de erosión, en la tabla 10, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 10. Parámetros de la red de drenaje de la microcuenca Río Puyo

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Área cuenca	304.41		
Orden de corriente	3		Strahler
Lc Principal	36	Km	
Lc Secundario	14	Km	
L tributarios	244.05	Km	
L total	294.05	Km	
Densidad de drenaje	0.97	Km/Km^2	Baja
R. bifurcación	1.68		
Extensión media de escurrimiento superf.	1.18	Km	
Frecuencia de ríos	0.23	$N.total\ rios/Km^2$	
Pendiente del cauce principal	0.02	%	Suave
Coeficiente de torrencialidad	0.12	$N.total\ N1/Km^2$	
Coeficiente de masividad	3.40	m/Km^2	
Tiempo de concentración de la cuenca	5.39	Hora	
Período de retardo (Lagtime)	3.24	Hora	
Número de Curva (CN)	60.18		

Elaborado por: Autores



Figura 11. Perfil del río de la microcuenca Río Puyo

Elaborado por: Autores

4.2. SIMULACIÓN

4.2.1. Simulación Hidrológica

La información meteorológica se trabajó a partir de los regímenes de precipitación registrados en el sector, procedentes de la estación meteorológica Puyo con código M0008.

Tabla 11. Datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo	
1990	43.20	109.80	54.50	98.40	45.80	164.70	68.20	43.60	86.30	92.60	55.40	47.80	164.70	JUN
1991	89.70	53.70	46.60	54.10	46.80	108.00	50.60	36.80	68.30	49.60	41.90	94.50	108.00	JUN
1992	86.90	57.70	34.50	64.90	56.00	50.40	60.90	49.60	39.00	62.40	163.50	57.50	163.50	NOV
1993	68.00	37.70	52.10	65.70	57.70	87.00	51.10	53.40	35.70	42.10	51.40	71.00	87.00	JUN
1994	65.60	45.00	66.90	97.50	89.10	44.10	53.90	44.70	65.70	75.50	82.20	78.80	97.50	ABR
1995	44.10	76.10	79.80	49.50	75.50	53.30	102.50	70.60	79.60	35.80	55.60	42.50	102.50	JUL
1996	61.10	42.80	32.20	60.10	121.80	83.60	49.50	25.90	117.20	101.70	101.30	88.10	121.80	MAY
1997	65.10	67.40	76.90	78.10	68.50	61.00	30.00	38.00	50.20	35.60	58.60	91.20	91.20	DIC
1998	24.00	44.10	36.20	146.20	108.80	63.60	57.40	37.30	39.00	81.70	44.60	34.20	146.20	ABR
1999	72.20	40.60	76.20	73.20	50.60	76.20	68.10	58.60	92.50	81.30	78.30	62.30	92.50	SEP
2000	68.70	51.80	31.50	60.90	130.00	61.40	54.60	86.70	56.20	66.80	61.00	54.80	130.00	MAY
2001	59.10	93.10	31.50	44.10	77.90	83.80	90.20	68.30	58.90	133.60	29.70	57.00	133.60	OCT
2002	58.40	49.30	59.80	61.10	75.74	87.20	85.90	69.80	60.70	77.00	68.10	59.80	87.20	JUN
2003	127.30	105.10	82.90	116.30	80.70	78.50	44.10	57.80	57.50	83.70	68.70	92.10	127.30	ENE
2004	85.00	41.20	84.50	50.20	133.50	50.70	70.40	52.50	78.20	78.30	66.80	88.00	133.50	MAY
2005	104.50	81.50	48.20	123.80	51.00	163.30	76.50	33.10	55.80	58.60	98.00	92.10	163.30	JUN
2006	33.90	53.90	71.50	83.30	62.00	105.40	46.10	52.70	70.00	123.40	30.50	70.30	123.40	OCT
2007	46.10	49.40	81.90	82.80	80.60	82.30	42.80	49.70	22.70	80.60	66.70	102.50	102.50	DIC
2008	50.20	43.70	31.40	101.20	98.90	111.40	83.60	75.30	69.80	48.40	99.30	54.90	111.40	JUN
2009	138.30	50.20	36.40	104.40	53.80	57.80	72.00	63.10	59.20	143.10	47.20	73.60	143.10	OCT
2010	44.50	94.80	63.80	81.20	122.30	42.90	79.70	57.20	34.30	41.40	51.50	74.20	122.30	MAY
2011	90.60	134.70	85.00	48.20	74.80	34.60	58.10	48.50	33.30	62.40	91.30	58.60	134.70	FEB
2012	62.00	71.80	63.10	76.80	56.50	48.90	51.00	77.60	33.10	80.80	71.20	61.90	80.80	OCT
2013	54.70	38.50	83.20	70.60	77.00	57.30	71.10	89.60	83.90	76.20	70.30	129.00	129.00	DIC
2014	84.20	56.10	130.00	82.50	81.10	50.60	43.80	64.80	60.60	90.50	47.70	79.40	130.00	MAR
2015	64.70	59.10	67.80	92.10	66.20	50.90	69.70	60.50	26.00	50.60	86.10	67.80	92.10	ABR
2016	33.80	94.80	122.60	91.60	62.90	62.90	41.60	34.80	57.20	46.40	83.60	30.00	122.60	MAR
2017	109.00	154.20	74.40	54.50	43.00	90.20	95.40	60.30	57.30	60.50	99.40	99.80	154.20	FEB
2018	50.60	55.00	67.30	61.70	94.20	44.70	76.50	161.20	101.50	42.60	75.30	100.40	161.20	AGO
2019	85.60	70.60	62.30	69.80	66.50	48.30	43.70	44.30	77.70	68.80	66.70	68.20	85.60	ENE
2020	69.04	30.70	35.40	29.90	38.80	35.40	42.10	29.40	40.10	57.70	24.70	68.20	69.04	ENE
MAX	**138.30**	**154.20**	**130.00**	**146.20**	**133.50**	**164.70**	**102.50**	**161.20**	**117.20**	**143.10**	**163.50**	**129.00**	**164.70**	

Elaborado por: Autores

Para la presente investigación se obtuvo una muestra de 30 años de datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas.

En la figura 12 es posible apreciar el comportamiento de la precipitación en la muestra de 30 años siendo los valores más altos registrados en los años 1990, 1992, 2005, 2018.

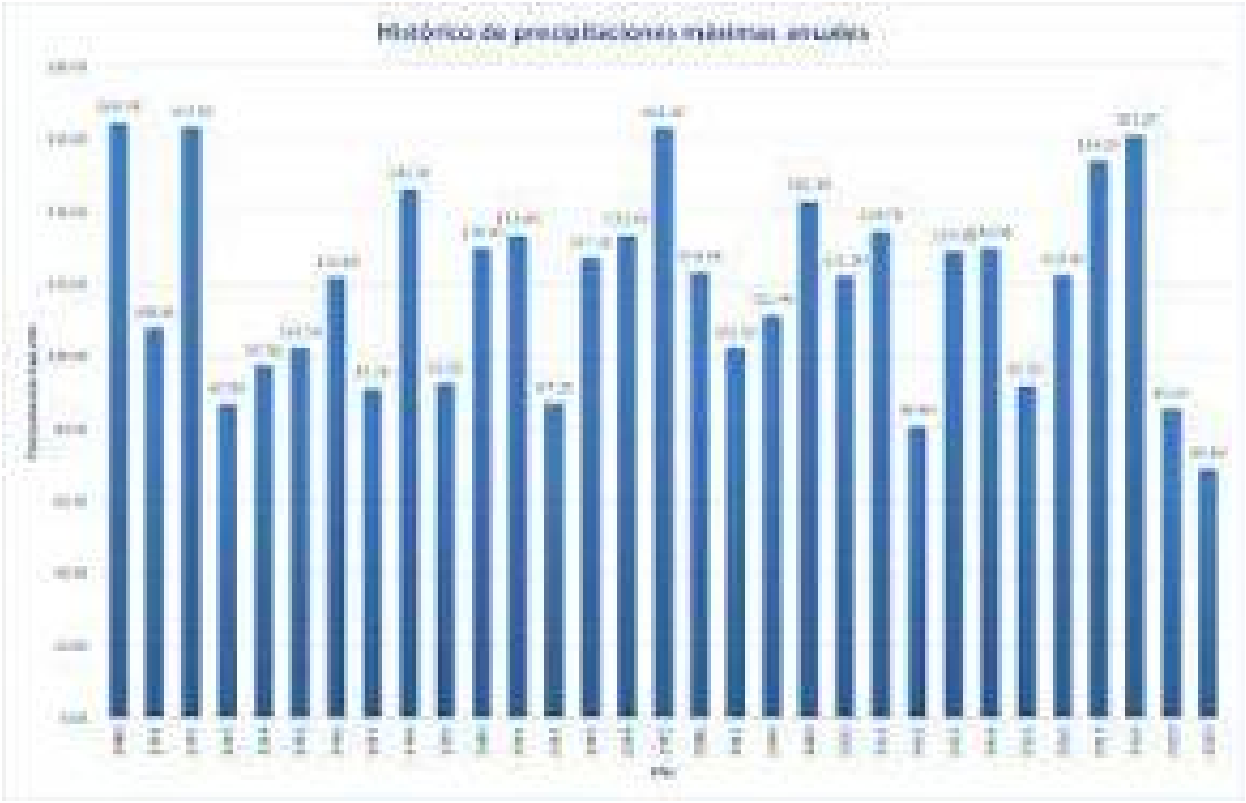


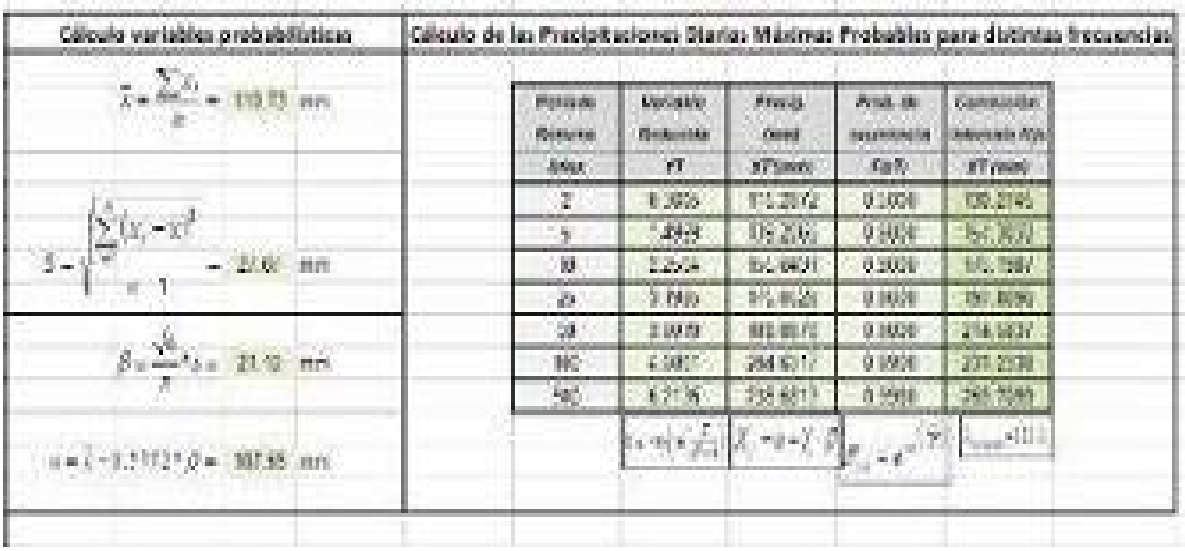
Figura 12. Histórico de precipitaciones máximas anuales

Elaborado por: Autores

4.2.2. Cálculo de la distribución pluviométrica

Al obtener los regímenes de precipitación de 24 horas máximas mensual multianual, se procedió a identificar los mese con mayor precipitación a lo largo de la muestra a evaluar (30 años), hallando a su vez el año con mayor precipitación. Posteriormente se dio lugar al cálculo de la precipitación máxima probable aplicando el método de probabilidad de Gumbel, la manipulación de estas variables contribuyo al cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias y para varios periodos de retorno planteados (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años) (Tabla 12).

Tabla 12. Datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas.



Elaborado por: Autores

4.2.2.1. Determinación de la precipitación máxima diaria

Teniendo en cuenta los coeficientes propuestos por D.F. Campos que se presentan en la tabla 1, se determinaron las precipitaciones máxima Pd (mm) para diferentes tiempos de duración y periodo de retorno. Se utiliza el término *XT* (mm), el cual multiplicado por cada uno de los coeficientes corresponde al tiempo de duración (Tabla 13):

Tabla 13. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	130.2745	157.3033	175.1987	197.8096	214.5837	231.2338	269.7099
18 hr	X18 = 91%	118.5498	143.1460	159.4308	158.2477	195.2711	210.4228	245.4360
12 hr	X12 = 80%	104.2196	125.8427	140.1590	158.2477	171.6669	184.9871	215.7679
8 hr	X8 = 68%	88.5867	106.9663	119.1351	134.5105	145.9169	157.2390	183.4027
6 hr	X6 = 61%	79.4675	95.9550	106.8712	120.6639	130.8960	141.0526	164.5230
5 hr	X5 = 57%	74.2565	89.6629	99.8633	112.7515	122.3127	131.8033	153.7346
4 hr	X4 = 52%	67.7428	81.7977	91.1033	102.8610	111.5835	120.2416	140.2491
3 hr	X3 = 46%	59.9263	72.3595	80.5914	90.9924	98.7085	106.3676	124.0666
2 hr	X2 = 39%	50.8071	61.3483	68.3275	77.1457	83.6876	90.1812	105.1869
1 hr	X1 = 30%	39.0824	47.1910	52.5596	59.3429	64.3751	69.3702	80.9130

Elaborado por: Autores

4.2.2.2. Cálculo de la intensidad de la lluvia

El proceso referente al cálculo de las intensidades de lluvia *I (mm)* se desarrolló partiendo de los datos de duración de la precipitación máxima diaria *Pd (mm)* y frecuencia de la misma *t(hr)*, mediante la fórmula:

$$I = \frac{Pd(mm)}{t(hr)} \tag{28}$$

Posteriormente se aplicó la regresión potencial por el método de mínimos cuadrados para encontrar los parámetros de ajuste de la fórmula de Intensidad-Duración-Frecuencia, donde, *I* es la intensidad *(mm/hr)*, *t* es la duración de la lluvia *(min)*, *T* el periodo de retorno *(años)* y *k,m,n*, son parámetros de ajuste, mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \tag{29}$$

Realizando un cambio de variable se obtiene que:

$$d = K * T^m \tag{30}$$

Donde la anterior expresión queda como:

$$I = \frac{d}{t^n} \tag{31}$$

$$I = d * t^{-n} \tag{32}$$

$$Y = \alpha * X^{\beta} \tag{33}$$

Aplicando la regresión potencial por el método de mínimos cuadrados se obtuvieron los valores de *"d" y "n"* para todos los periodos de retorno, a los cuales se realizó un promedio como lo muestra la tabla 14.

Tabla 14. Resumen de aplicación de regresión potencial.

Periodo de Retorno (años)	Término ctte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	492.50620155166	-0.61638608809
5	594.68917082869	-0.61638608809
10	662.34318772361	-0.61638608809
25	816.10121899373	-0.63362500463
50	811.23892841296	-0.61638608809
100	874.18539513652	-0.61638608809
500	1019.64507046646	-0.61638608809
Promedio =	752.95845330195	-0.61884879045

Elaborado por: Autores

En función del cambio de variable realizado, se realiza otra regresión de potencial entre las columnas del periodo de retorno *(T)* y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación (34), como lo muestra la figura 13, teniendo como resultado la ecuación para las curvas *IDF*.

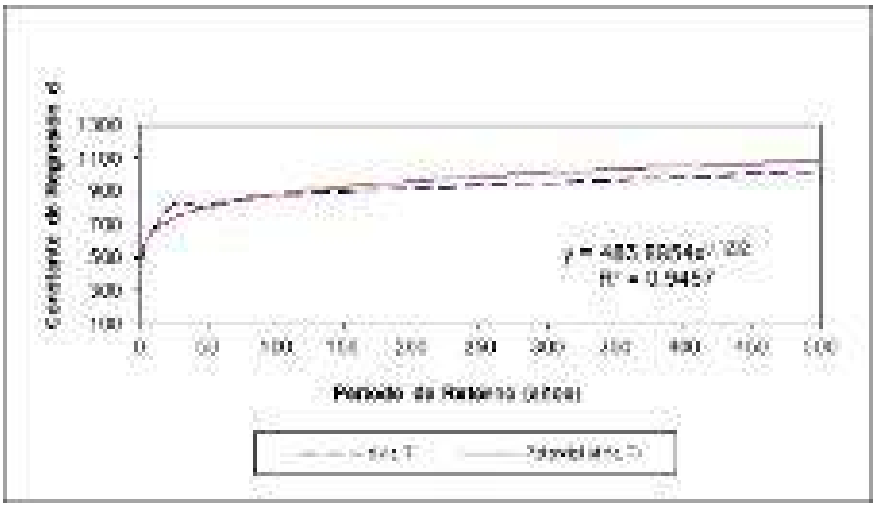


Figura 13. Regresión potencial

Elaborado por: Autores

$$I = \frac{483.8854 * T^{0.129190}}{t^{0.61885}}$$

(34)

La figura 14 muestra las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia *(IDF)* para el total de periodos de retorno analizados.

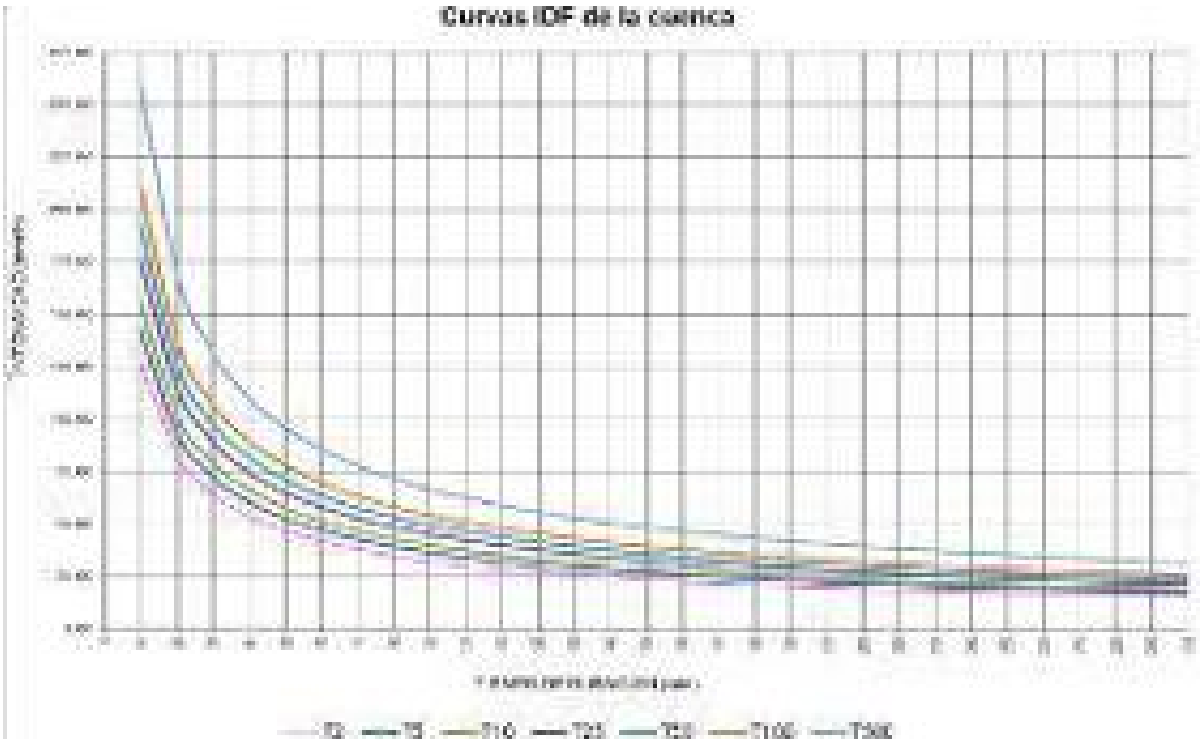


Figura 14. Curva (*IDF*) para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con una duración de 5 horas de lluvia.

Elaborado por: Autores

4.2.2.3. Cálculo de los Hietogramas de precipitación

Para el cálculo de los Hietogramas de diseño, fue necesaria la determinación del tiempo de concentración de la microcuenca, en donde se utilizaron datos tales como la longitud del cauce principal *(Lc)* y la pendiente de la cuenca *(S)* en unidades de km y m/m respectivamente. La expresión para el tiempo de concentración *(Tc)* se obtuvo de la ecuación (22).

Teniendo la ecuación de intensidad para la microcuenca del río Puyo, se dio lugar a la elaboración de los hietogramas de precipitación, por bloques alternos, para los diferentes periodos de retorno objeto de estudio y con una duración de la lluvia de 300 minutos (5horas).

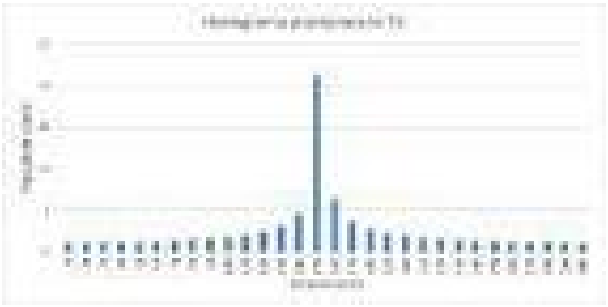


Figura 15. Hietogramas para periodo de retorno T2

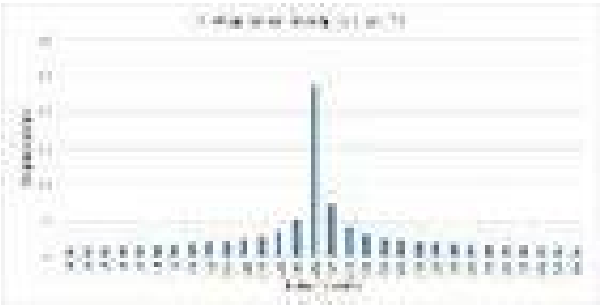


Figura 16. Hietogramas para periodo de retorno T5

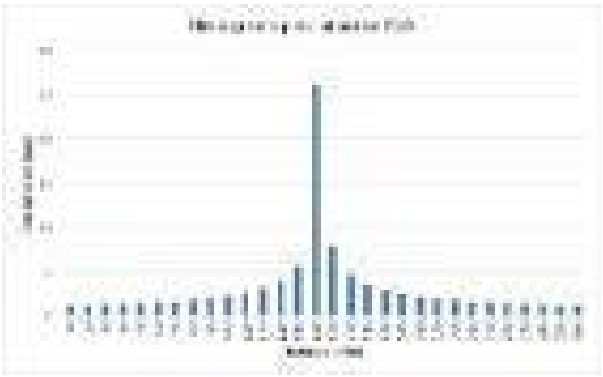


Figura 17. Hietogramas para periodo de retorno T10

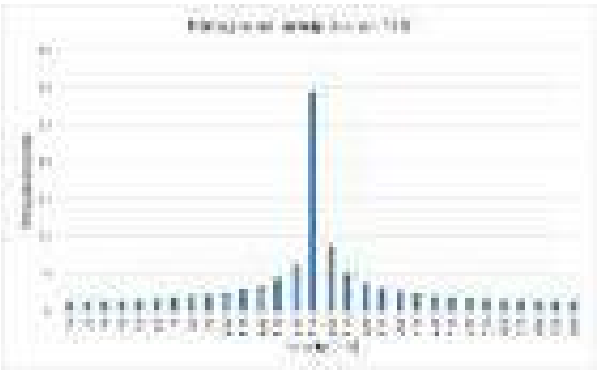


Figura 18. Hietogramas para periodo de retorno T25

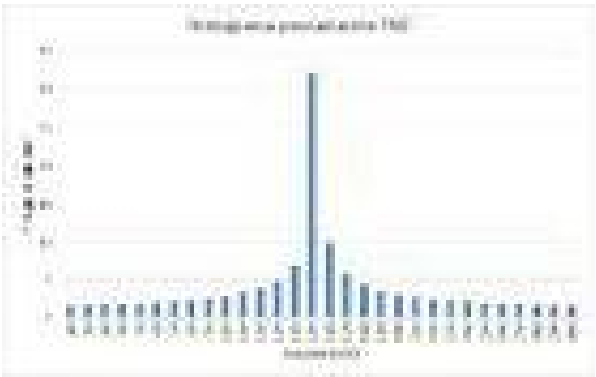


Figura 19. Hietogramas para periodo de retorno T50

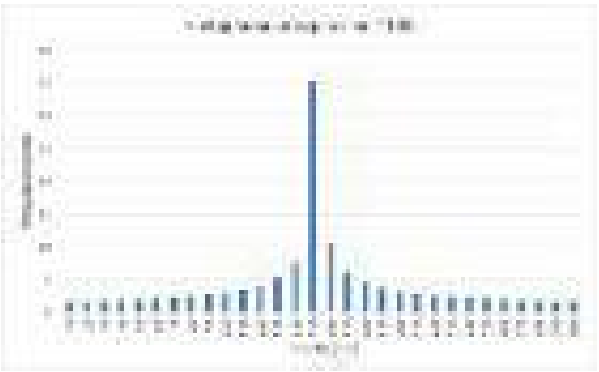


Figura 20. Hietogramas para periodo de retorno T100

Elaborado por: Autores

4.2.2.4. Simulación del modelo hidrológico

Para el desarrollo de la simulación del modelo hidrológico, se utilizó el software HEC-HMS *versión 4.7*, dentro del cual se agregaron los datos arrojados por los hietogramas de diseño para cada periodo de retorno y algunos parámetros de la caracterización de la cuenca, como el área *A*, tiempo de concentración *Tc*, numero de curva *CN*, incluyendo el tiempo de retardo "*LagTime*" trabajado en función del *Tc*, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Lagtime = 0.6 * Tc \tag{35}$$

Como resultado de la simulación se obtuvieron los hidrogramas de crecida para los diferentes periodos de retorno y los caudales máximo, insumos que fueron utilizados posterior en el software HEC-RAS.

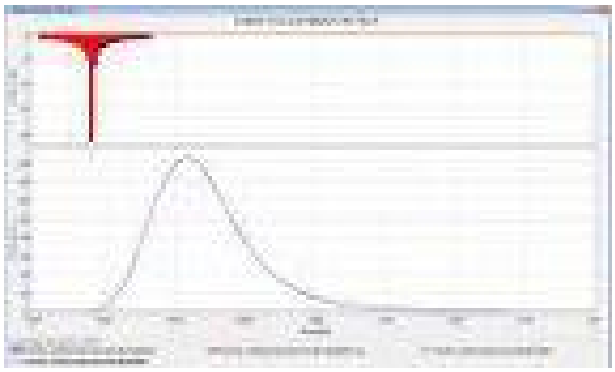


Figura 21. Hidrogramas para periodo de retorno T2

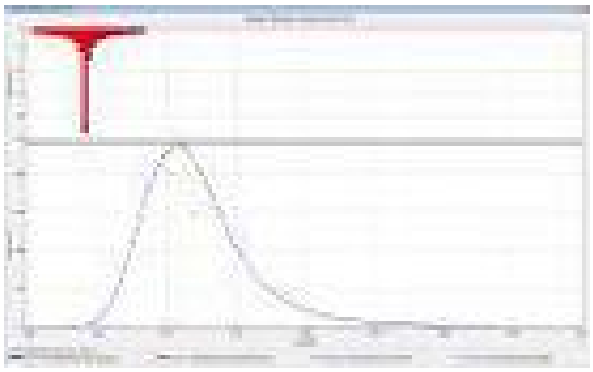


Figura 22. Hidrogramas para periodo de retorno T5

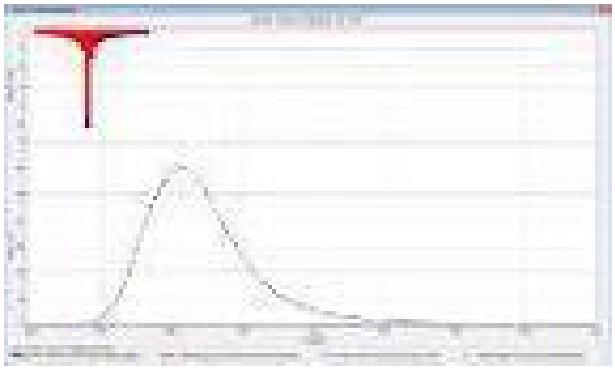


Figura 23. Hidrogramas para periodo de retorno T10

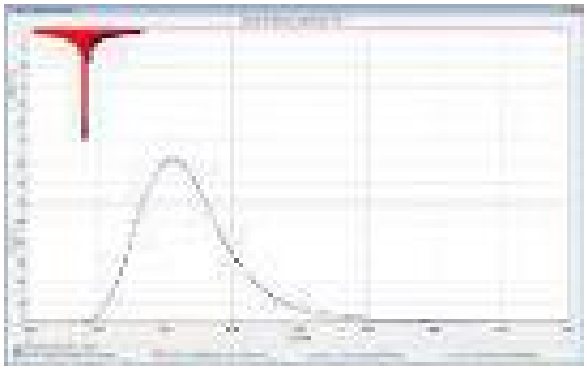


Figura 24. Hidrogramas para periodo de retorno T25

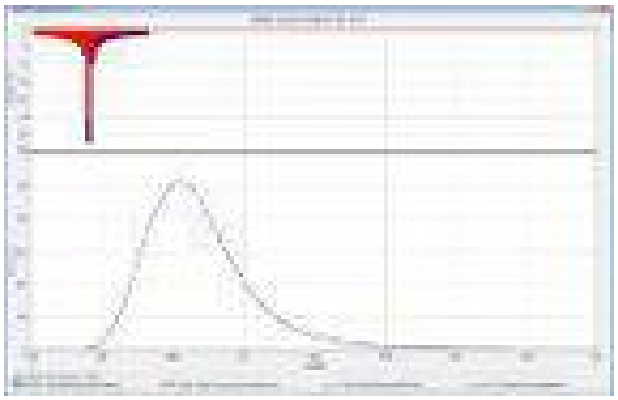


Figura 25. Hidrogramas para periodo de retorno T50

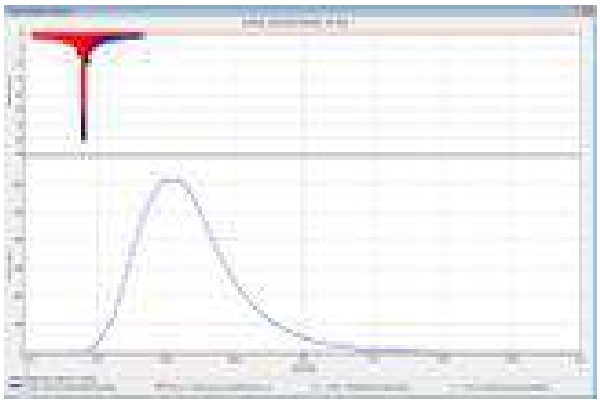


Figura 26. Hidrogramas para periodo de retorno T100

Elaborado por: Autores

Los hidrogramas de crecidas están dados para cada intervalo de tiempo y en función de los parámetros de infiltración - escorrentía graficados en la primera sección de las figuras precedentes y la cantidad de flujo transportado por el Río Puyo, en la parte inferior de las mismas.

4.2.3. Simulación espacial

El desarrollo de la simulación del modelo espacial, se logró gracias a la utilización del software QGIS *versión 3.16,* del cual se consiguieron las geometrías de la zona alta, zona media y zona baja de los ríos Puyo y Pindo Grande, necesarias para usarlas juntos con los resultados del modelo hidrológico en el software HEC-RAS.

En las figuras 27, 28, 29 y 30 se evidencia a manera de ejemplo los resultados obtenidos de la geometría para el modelo 1D y 2D realizada para la zona alta, de cada río objeto de estudio.



Figura 27. Geometría modelo 1D

Elaborado por: Autores



Figura 28. Geometría modelo 2D

Elaborado por: Autores



Figura 29. Geometría modelo 1D

Elaborado por: Autores



Figura 30. Geometría modelo 2D

Elaborado por: Autores

4.2.4. Simulación hidráulica

Con los resultados obtenidos en el modelo hidrológico y modelo espacial, se ejecutó la simulación del modelo hidráulico con el software HEC-RAS *versión 5.0.7*, para el cual se establecieron dos condiciones de flujo.

Para el modelo 1D, se simularon condiciones de flujo permanente, con la geometría 1D lograda del complemento RiverGIS, para el modelo, se designaron valores de Manning al margen izquierdo de 0.045, central de 0.033 y derecho de 0.045, para cada sección de las zonas altas, medias y bajas de los ríos Puyo y Pindo Grande, así como se detalla en la figura 31.

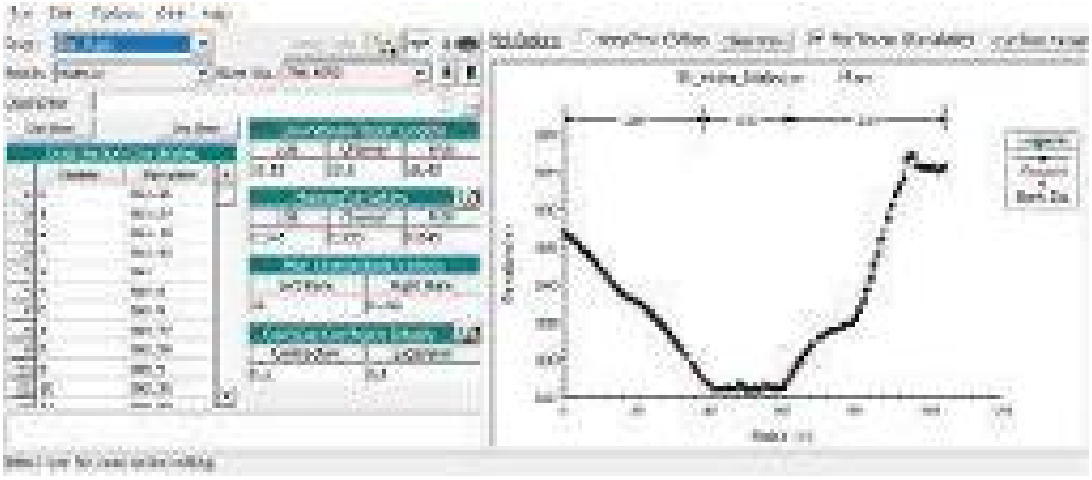


Figura 31. Sección geometría modelo 1D – Valores de Manning

Elaborado por: Autores

Se simularon 6 perfiles de caudales máximos derivados del modelo hidrológico, para los 6 periodos de retorno en años analizados en esta investigación, con condiciones de borde de acuerdo al tirante crítico, así para el TR 2 un caudal de 166, para el TR10 un caudal de 236.3, para el TR 25 años un caudal de 408.5, para el TR50 años un caudal de 505.9 y para el TR 100 años un caudal de 620.4 en m^3/s, como se muestra en la figura 32, 33, 34, 35,36 y 37.

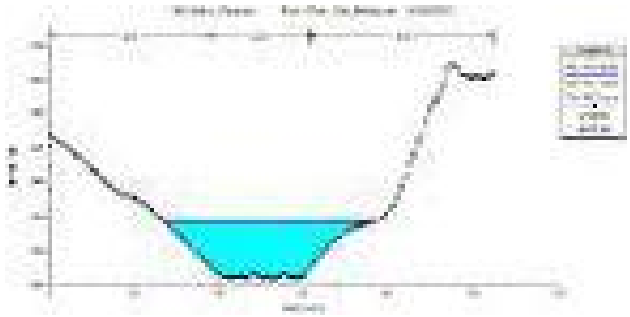


Figura 32. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR2

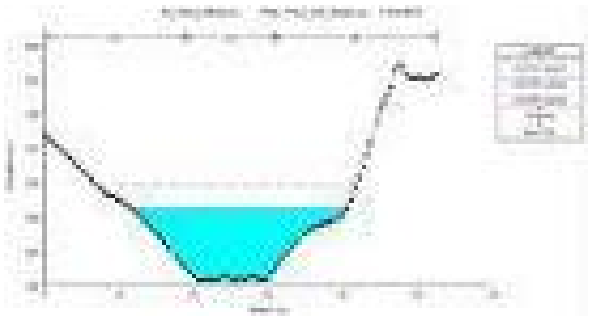


Figura 33. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR5

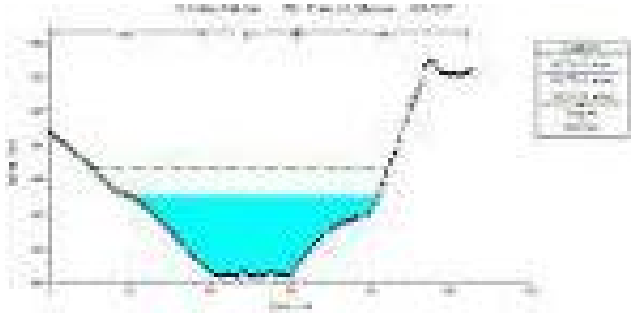


Figura 34. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR10

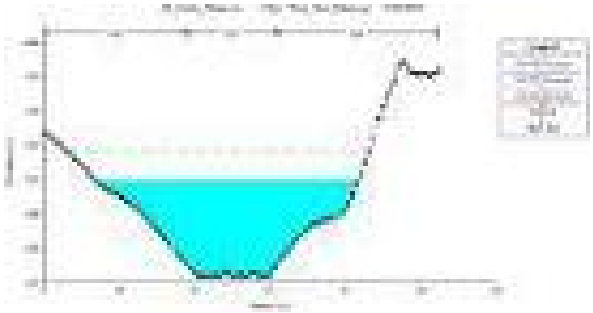


Figura 35. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR25

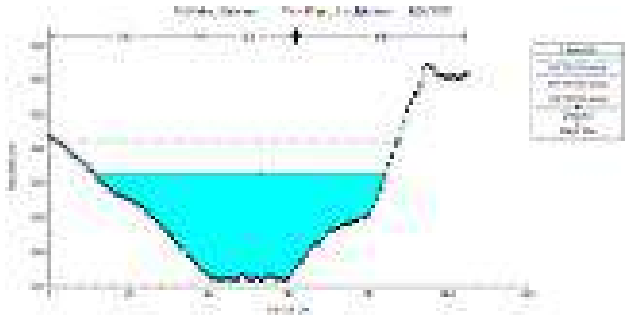


Figura 36. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR50

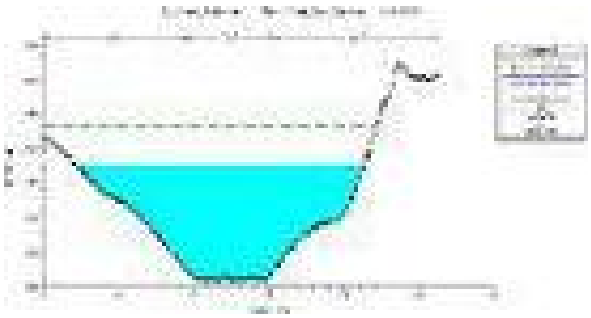


Figura 37. Lamina de flujo para el periodo de retorno TR100

Elaborado por: Autores

Como resultado de la simulación en condiciones de flujo permanente se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras, 38 a al 79.

En la simulación del modelo hidráulico unidimensional (1D) para el río Puyo se dividió la zona alta en dos partes para un mejor estudio, las cuales fueron la zona comprendida por el Malecón y la zona del barrio la Isla.

De acuerdo con la cobertura y uso del suelo en las áreas afectadas por la inundación en la microcuenca, para el modelo unidimensional (1D), se obtuvieron lo siguientes resultados.

Tabla 15. Áreas de inundación zona Malecón río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
vegetación arbustiva	0,5602	0,6009	0,6438	0,7161	0,7602	0,8032
área poblada	5,7937	5,9274	6,0096	6,1245	6,1667	6,2036
infraestructura antrópica	2,1116	2,1395	2,1579	2,1834	2,2013	2,2197
cuerpo agua	1,2734	1,2737	1,2737	1,2737	1,2737	1,2737
Área Total	9,7389	9,9415	10,085	10,2977	10,4019	10,5002

Elaborado por: Autores

Para la zona del Malecón, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 9.7389 Ha a 10.5002 Ha, con un incremento de 0.7613 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, las áreas pobladas y la infraestructura antrópica, que corresponde a un 59 y a un 22 por ciento respectivamente.

Tabla 16.Áreas de inundación zona la Isla río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488
vegetación arbustiva	3,3483	3,3619	3,3705	3,3805	3,3871	3,393
pastizal	0,5571	0,5891	0,6079	0,6301	0,6457	0,6572
área poblada	6,1732	6,2236	6,2703	6,3283	6,3746	6,3908
cuerpo agua	2,7218	2,7218	2,7218	2,7218	2,7218	2,7218
Área Total	12,8492	12,9452	13,0193	13,1095	13,178	13,2116

Elaborado por: Autores

Para zona de la Isla, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 12.8492 Ha a 13.2116 Ha, con un incremento de 0.3624 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, las áreas pobladas y la vegetación arbustiva, que corresponden a un 48 y a un 26 por ciento respectivamente.

Tabla 17. Áreas de inundación zona media río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	3,8911	4,1579	4,3964	4,6649	4,8758	5,092
pastizal	0,5341	0,6257	0,7175	0,8608	0,9987	1,1185
área poblada	0,1095	0,1373	0,1975	0,205	0,205	0,205
cuerpo agua	3,501	3,5166	3,5263	3,5359	3,5423	3,5419
Área Total	8,0357	8,4375	8,8377	9,2666	9,6218	9,9574

Elaborado por: Autores

Para zona media del río Puyo, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 8.0357 Ha a 9.9574 Ha, con un incremento de 1.9004 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y los cuerpos de agua, que corresponden a un 48 y a un 44 por ciento respectivamente.

Tabla 18. Áreas de inundación zona baja río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	1,2622	1,5196	1,7574	2,1036	2,3796	2,6156
vegetación arbustiva	0,1085	0,2503	0,3472	0,4249	0,4654	0,5002
pastizal	0,0117	0,0356	0,0706	0,1377	0,1937	0,2494
área poblada	0,3354	0,5134	0,6642	0,72	0,7648	0,8116
cuerpo agua	4,0359	4,1444	4,205	4,2778	4,3271	4,3803
Área Total	5,7537	6,4633	7,0444	7,664	8,1306	8,5571

Elaborado por: Autores

Para zona baja del río Puyo, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 5.7537 Ha a 8.5571 Ha, con un incremento de 2.8034 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, cuerpo de agua y los bosques nativos, que corresponden a un 60 y a un 26 por ciento respectivamente.

Tabla 19. Áreas de inundación zona alta río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
vegetación arbustiva	1,5838	1,6781	1,7683	1,9202	2,0292	2,1461
área poblada	5,7257	6,5135	7,2626	8,2588	8,8286	9,4538
cuerpo agua	0,7448	0,7737	0,7944	0,822	0,8401	0,8601
Área Total	8,0543	8,9653	9,8253	11,001	11,6979	12,46

Elaborado por: Autores

Para zona alta del río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 8.0543 Ha a 12.46 Ha, con un incremento de 4.4057 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, área poblada y la vegetación arbustiva, que corresponden a un 75 y a un 18 por ciento respectivamente.

Tabla 20. Áreas de inundación zona media río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
cultivo	0	0	0	0,0159	0,0586	0,0818
bosque nativo	3,5066	3,8392	4,1126	4,5127	4,7563	4,9885
vegetación arbustiva	0,0293	0,0305	0,0314	0,0326	0,0336	0,0332
cuerpo agua	2,8712	2,8896	2,9002	2,9125	2,9201	2,9258
Área Total	6,4071	6,7593	7,0442	7,4737	7,7686	8,0293

Elaborado por: Autores

Para zona media del río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 6.4071 Ha a 8.0293 Ha, con un incremento de 1.6222 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y cuerpo de agua, que corresponden a un 59 y a un 40 por ciento respectivamente.

Tabla 21. Áreas de inundación zona baja río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	3,5037	3,6535	3,7702	3,9294	4,0556	4,2006
vegetación arbustiva	0,0011	0,0033	0,0067	0,0156	0,0242	0,0366
área poblada	0,0293	0,0388	0,047	0,0601	0,0707	0,0834
cuerpo agua	3,0372	3,0764	3,1028	3,1184	3,1388	3,1557
Área Total	6,5713	6,772	6,9267	7,1235	7,2893	7,4763

Elaborado por: Autores

Para zona baja del río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 6.5713 Ha a 7.4763 Ha, con un incremento de 0.905 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y cuerpo de agua, que corresponden a un 55 y a un 44 por ciento respectivamente.

Para la simulacion del modelo hidraulico en 2D, se utilizaron como insumos, los datos obtenidos en el modelo hidrologico referentes al hidrograma de crecidas para cada periodo de retorno y la geometria 2D obtenida en el modelo espacial, gracias al complemento RiverGIS.

Se simularon escenarios de flujo no permanente, con condiciones de borde aguas arriba mediante el hidrograma de crecidas y aguas debajo de acuerdo a la profundidad normal con la pendiente de friccion de 0,0203.

Como resultado de la simulación en condiciones de flujo no permanente se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 80 a la 121.



Figura 80. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR2

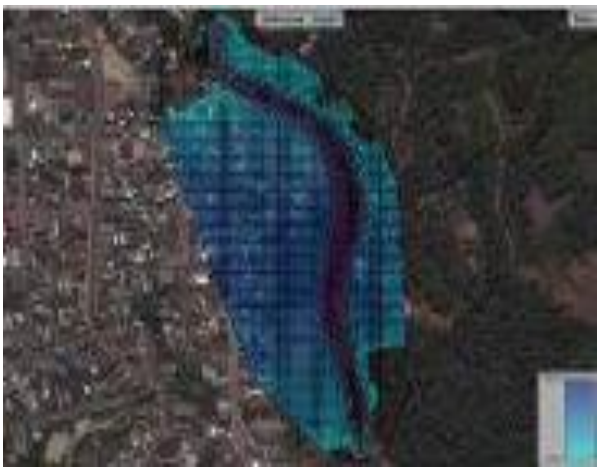


Figura 81. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR5

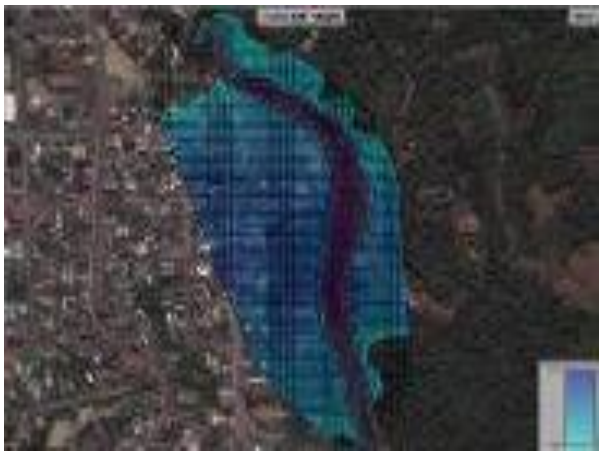


Figura 82. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR10

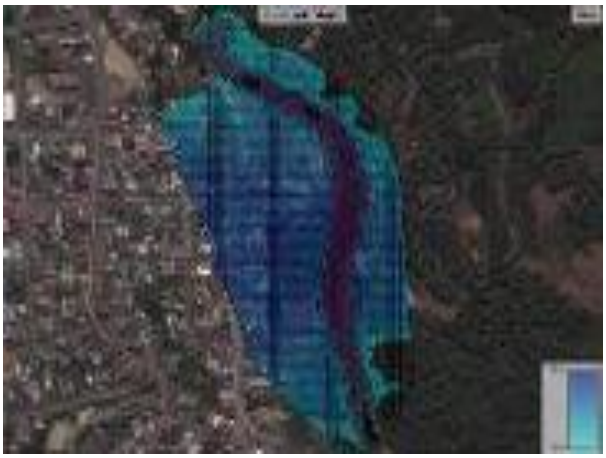


Figura 83. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de retorno TR25



Figura 84. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de

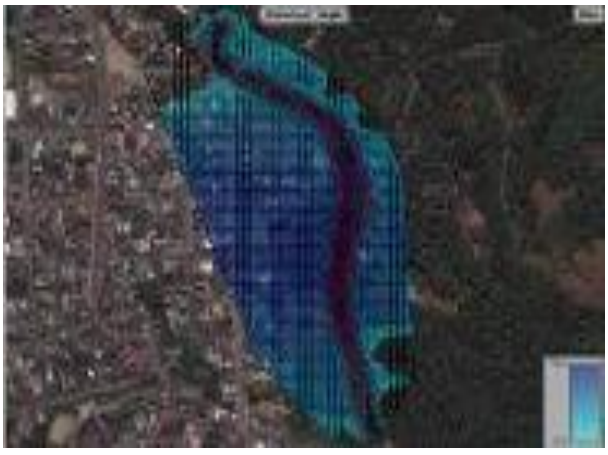


Figura 85. Área de inundación zona alta Río Puyo (Malecón), para el periodo de

retorno TR50

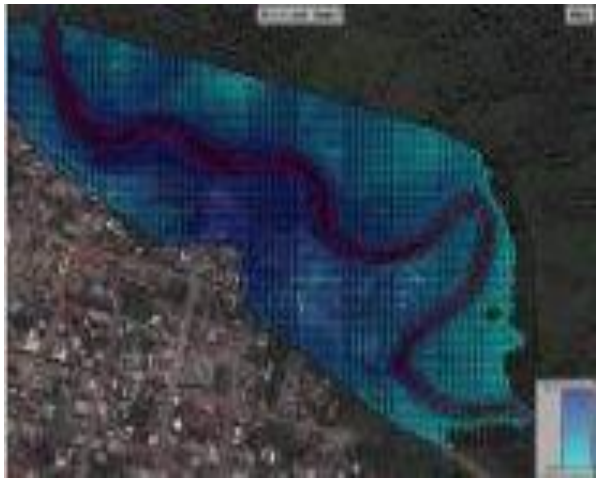


Figura 86. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR2

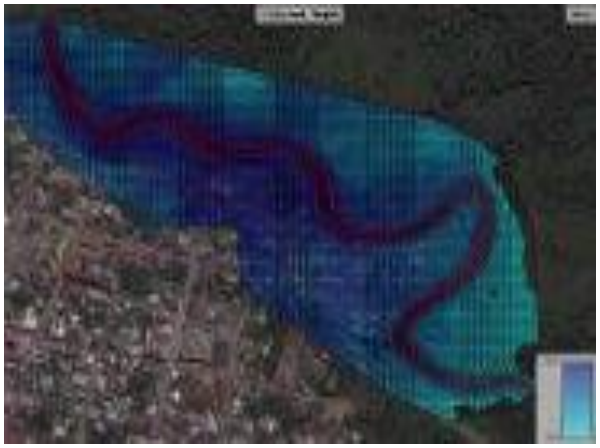


Figura 88. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR10



Figura 90. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de

retorno TR100

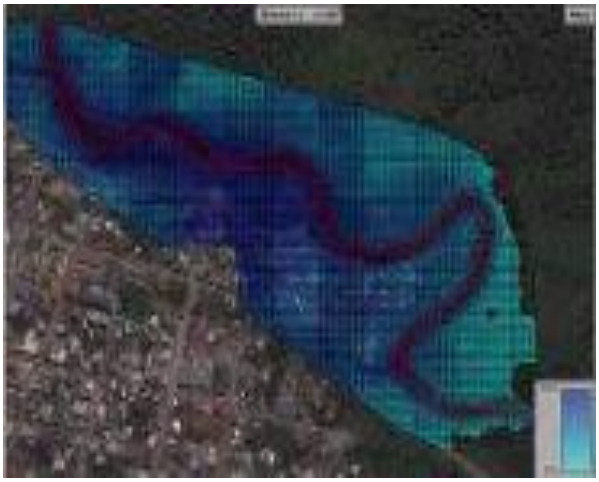


Figura 87. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR5

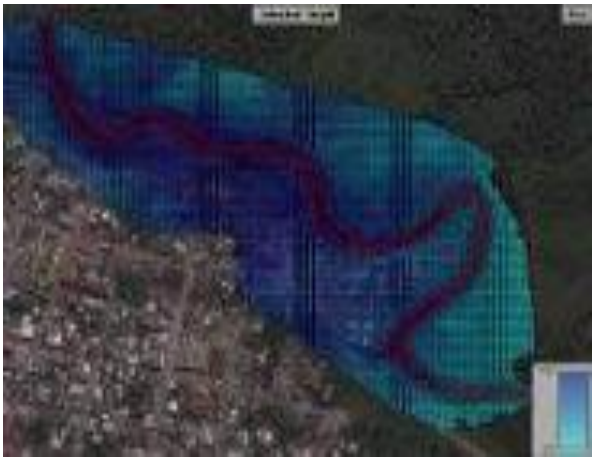


Figura 89. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de retorno TR25

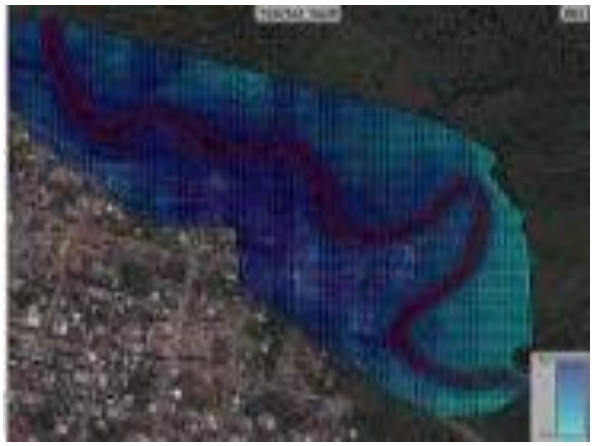


Figura 91. Área de inundación zona alta Río Puyo (La Isla), para el periodo de

retorno TR50



Figura 92. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR2

retorno TR100



Figura 93. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR5



Figura 94. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR10

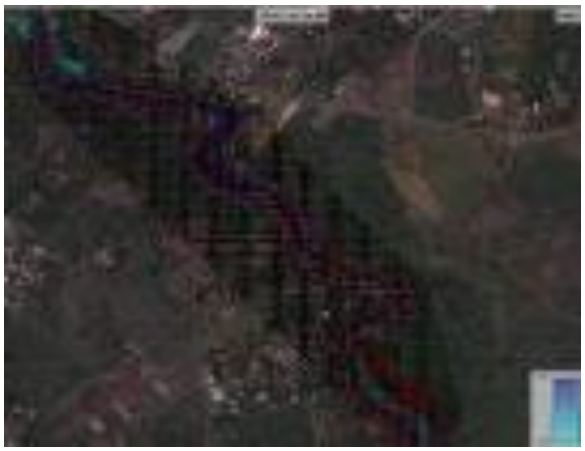


Figura 95. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR25

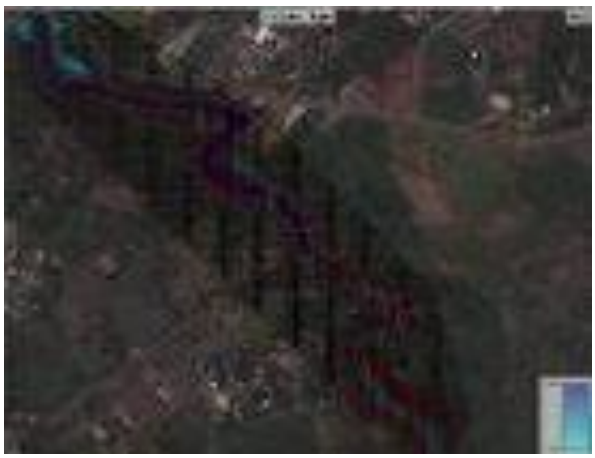


Figura 96. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR50



Figura 97. Área de inundación zona media Río Puyo, para el periodo de retorno TR100

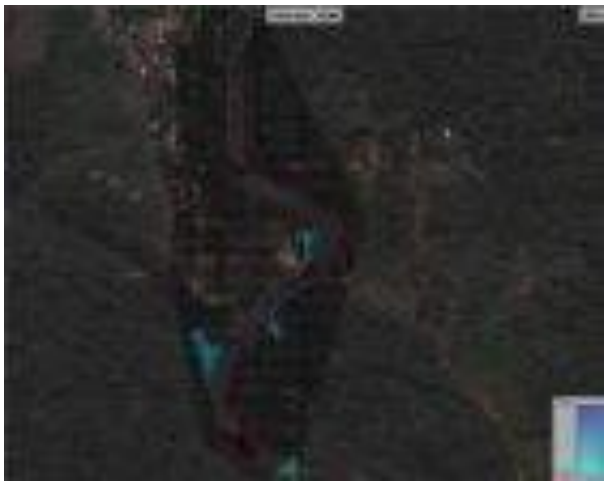


Figura 98. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR2

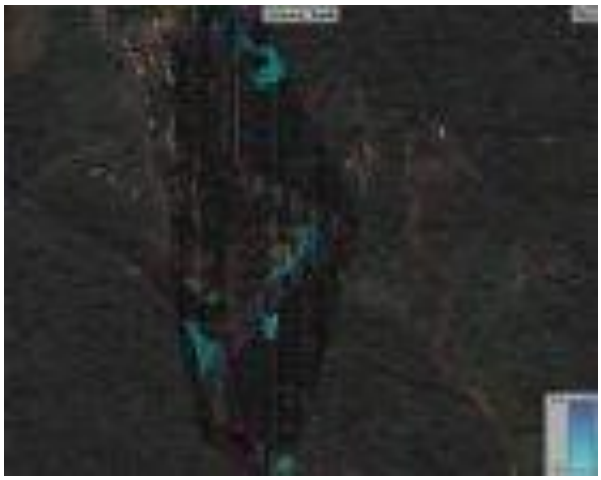


Figura 99. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR5

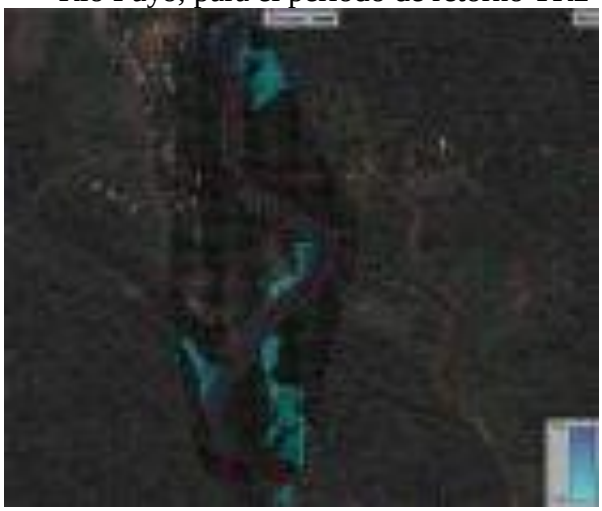


Figura 100. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR10

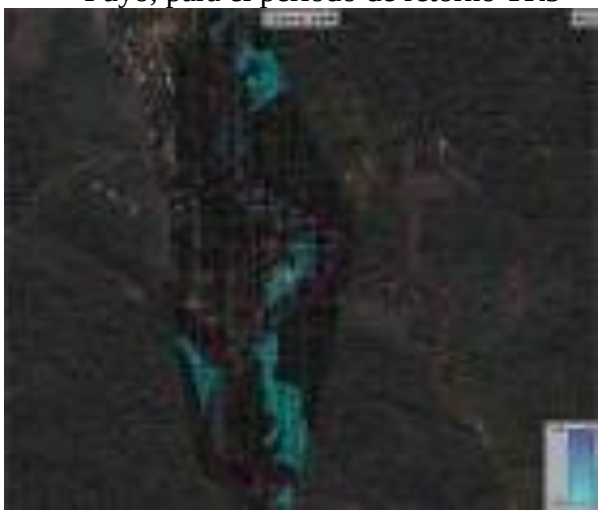


Figura 101. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR25

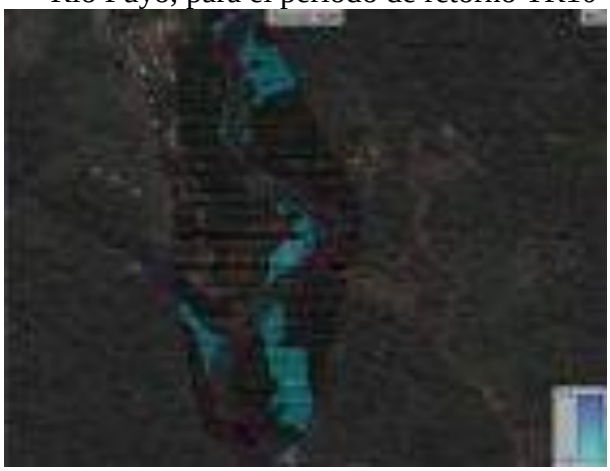


Figura 102. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR50

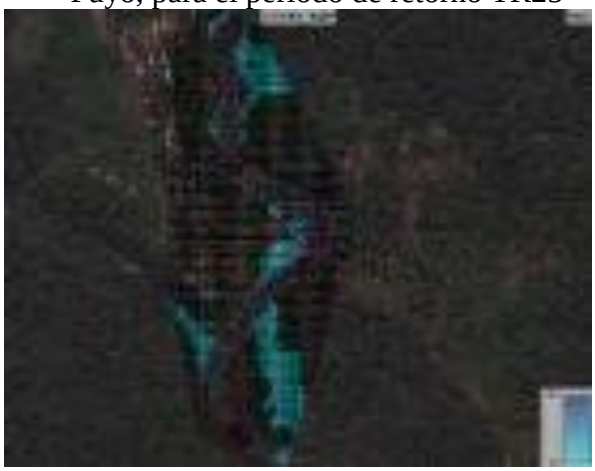


Figura 103. Área de inundación zona baja Río Puyo, para el periodo de retorno TR100



Figura 104. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2



Figura 105. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5



Figura 106. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10

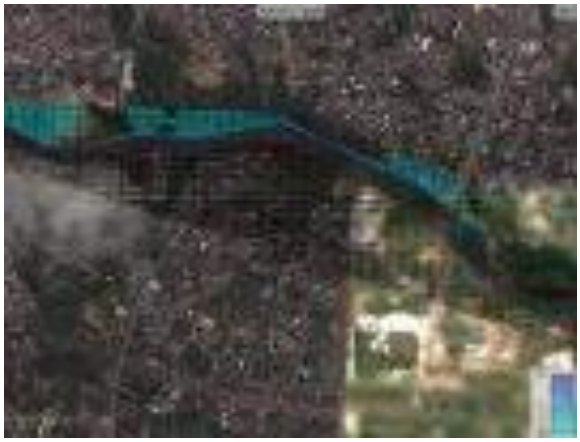


Figura 107. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25



Figura 108. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50



Figura 109. Área de inundación zona alta Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100

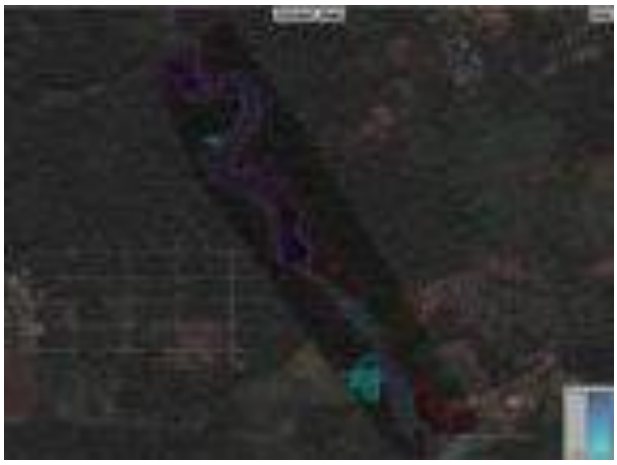


Figura 110. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2

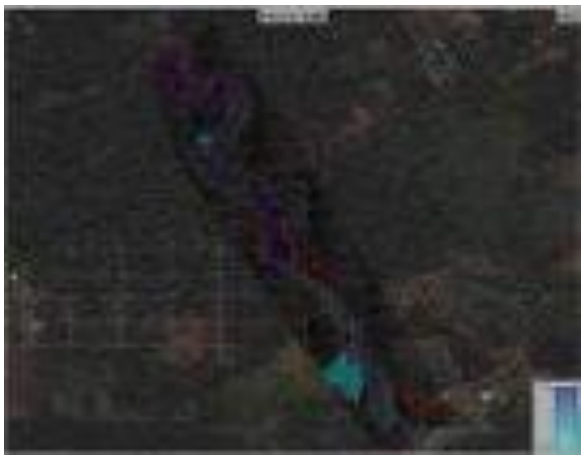


Figura 111. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5

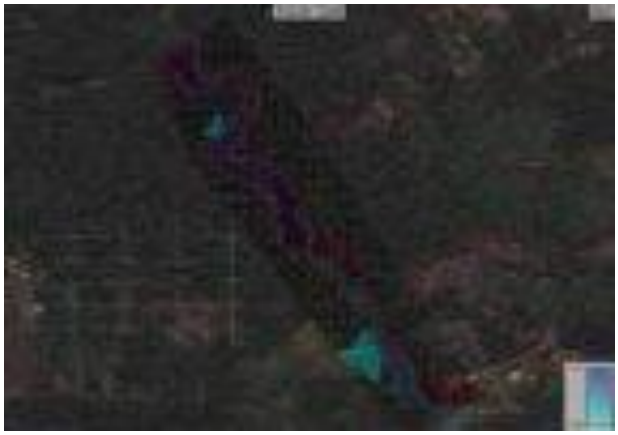


Figura 112. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10

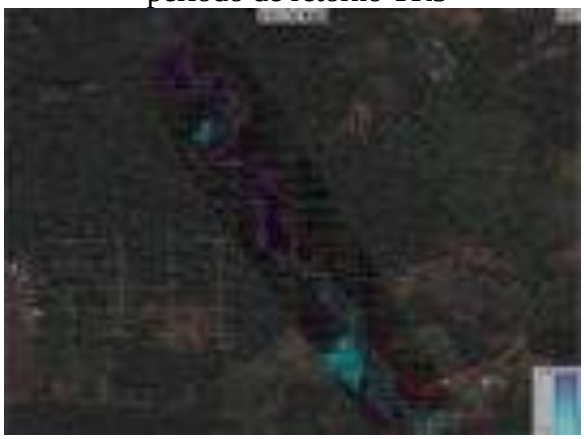


Figura 113. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25

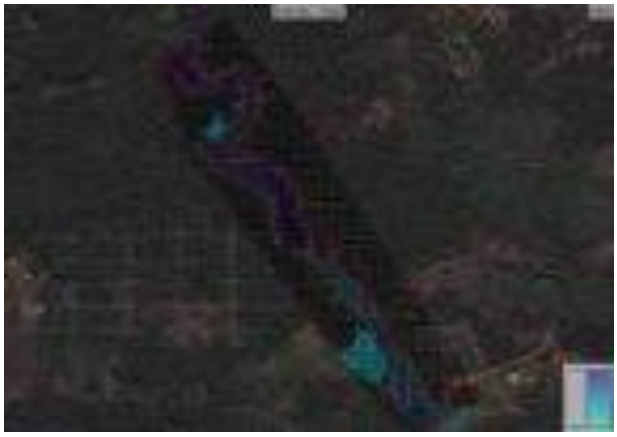


Figura 114. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50

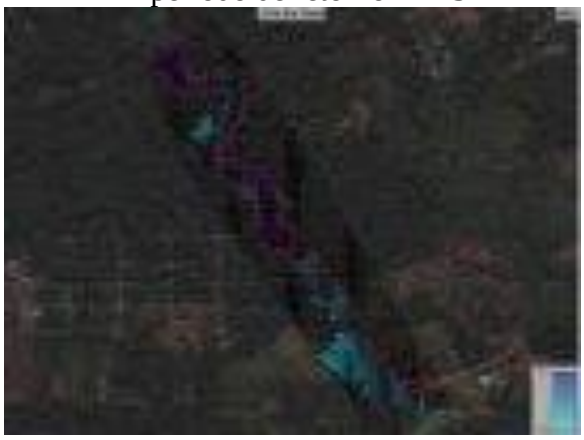


Figura 115. Área de inundación zona media Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100

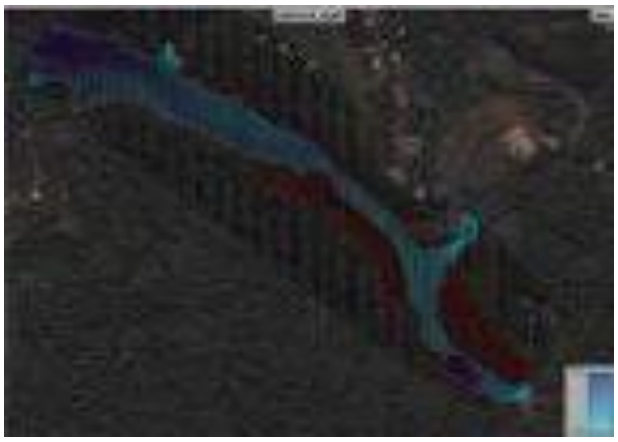


Figura 116. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR2

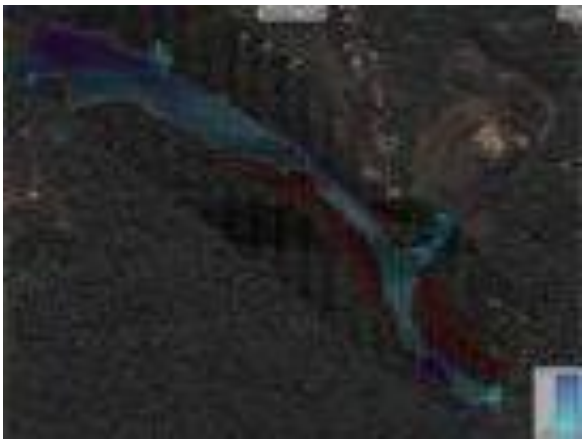


Figura 117. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR5

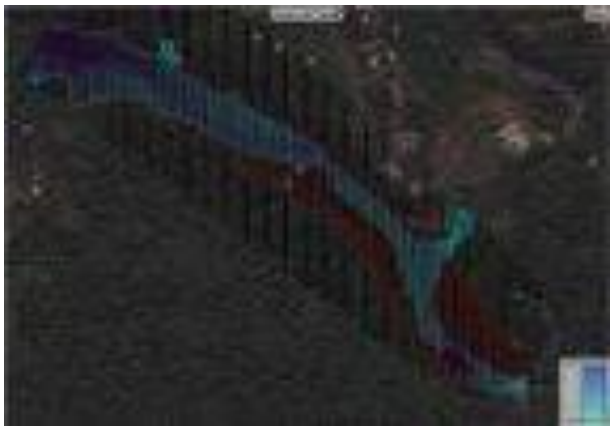


Figura 118. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR10

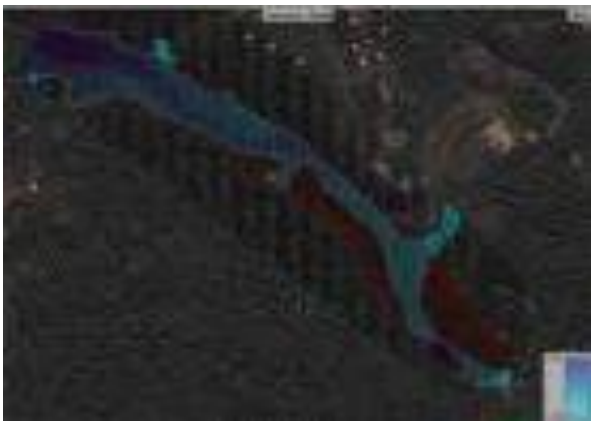


Figura 119. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR25

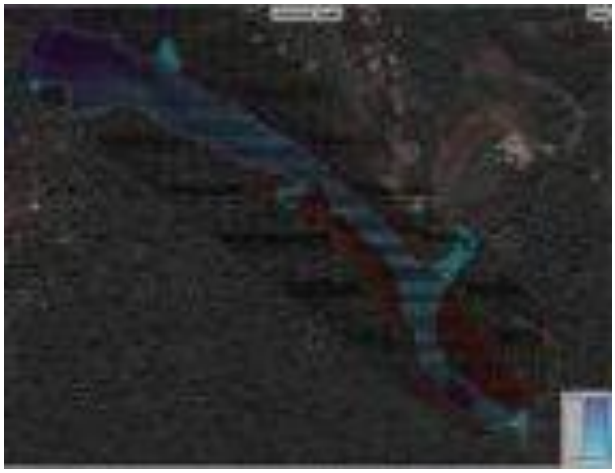


Figura 120. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR50

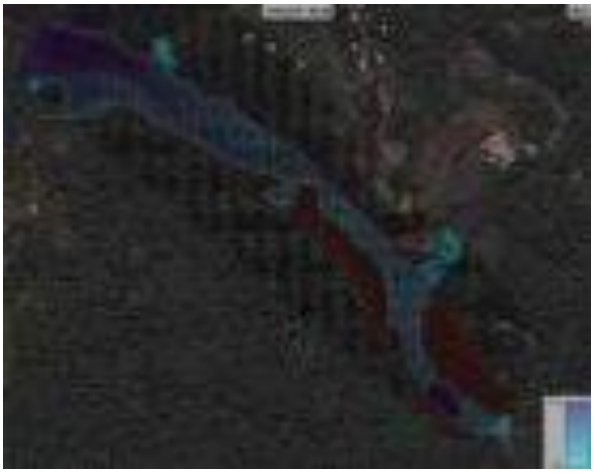


Figura 121. Área de inundación zona baja Río Pindo Grande, para el periodo de retorno TR100

Elaborado por: Autores

En la simulación del modelo hidráulico bidimensional (2D), igual a la simulación anterior, a la zona alta del río Puyo se dividió en dos partes para un mejor estudio, las cuales fueron la zona comprendida por el Malecón y la zona del barrio la Isla.

Para el modelo bidimensional (2D), conforme a la cobertura y uso de suelo, en las areas afectadas por la inundacion en la microcuenca, se obtuvieron lo siguientes resultados:

Tabla 22. Áreas de inundación zona Malecón río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
vegetación arbustiva	0,7256	0,7624	0,7882	0,8594	0,8978	0,9372
área poblada	9,7539	9,8424	9,8943	9,9606	10,0064	10,0528
infraestructura antrópica	2,5644	2,5777	2,5871	2,5999	2,6102	2,6211
cuerpo agua	1,4041	1,4041	1,4041	1,4041	1,4041	1,4041
Área Total	14,448	14,5866	14,6737	14,824	14,9185	15,0152

Elaborado por: Autores

Para la zona comprendida en el Malecón, se encontraron áreas de lámina de inundación total del periodo de retorno menor T2 años al periodo de retorno mayor TR100, que van de 14.448 Ha a 15.0152 Ha con un incremento de 0.5672 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, las áreas pobladas y la infraestructura antrópica, que corresponden a un 67 y a un 18 por ciento respectivamente.

Tabla 23.Áreas de inundación zona la Isla río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	0,1359	0,1542	0,1623	0,1717	0,1751	0,1768
vegetación arbustiva	8,8471	9,0477	9,099	9,1227	9,1372	9,151
pastizal	1,0834	1,3291	1,4313	1,5429	1,6147	1,6584
área poblada	11,5224	11,5837	11,6399	11,71	11,7675	11,7849
cuerpo agua	2,7724	2,7724	2,7724	2,7724	2,7724	2,7724
Área Total	24,3612	24,8871	25,1049	25,3197	25,4669	25,5435

Elaborado por: Autores

Para zona de la Isla, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 24.3612 Ha a 25.5435 Ha, con un incremento de 1.1822 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, las áreas pobladas y la vegetación arbustiva, que corresponden a un 46 y a un 36 por ciento respectivamente.

Tabla 24. Áreas de inundación zona media río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	3,6572	3,8833	4,0496	4,2876	4,4642	4,6431
vegetación arbustiva	0	0	0	0	0,0939	0,1452
pastizal	0,6816	0,7654	0,8418	0,9761	1,1604	1,4405
área poblada	0,1789	0,1945	0,2094	0,2387	0,2873	0,4095
cuerpo agua	3,8476	3,8659	3,8771	3,89	3,8981	3,9058
Área Total	8,3653	8,7091	8,9779	9,3924	9,9039	10,5441

Elaborado por: Autores

Para zona media del río Puyo, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 8.3653 Ha a 10.5441 Ha, con un incremento de 2.1788 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y los cuerpos de agua, que corresponden a un 45 y a un 42 por ciento respectivamente.

Tabla 25. Áreas de inundación zona baja río Puyo.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	1,4406	1,8372	2,6534	3,1296	3,5427	3,811
vegetación arbustiva	0,1277	0,2358	0,3932	0,5653	0,6371	0,7109
pastizal	0,0133	0,3156	0,5328	0,6165	0,6973	0,8045
área poblada	0,3858	0,5585	0,7032	0,8761	0,9858	1,0815
infraestructura antrópica			0,5394	0,6473	0,6652	0,6725
cuerpo agua	4,5051	4,6088	4,6947	4,783	4,8407	4,8827
Área Total	6,4725	7,5559	9,5167	10,6178	11,3688	11,9631

Elaborado por: Autores

Para zona baja del río Puyo, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 6.4725 Ha a 11.9631 Ha, con un incremento de 5.4906 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, cuerpo de agua y los bosques nativos, que corresponden a un 51 y a un 28 por ciento respectivamente.

Tabla 26.Áreas de inundación zona alta río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
vegetación arbustiva	1,89	2,0377	2,1739	2,4337	2,7611	3,1539
área poblada	7,5523	10,021	12,0436	13,5904	15,1785	16,0528
cuerpo agua	0,9463	0,9912	1,0231	1,0613	1,0882	1,1137
Área Total	10,3886	13,0499	15,2406	17,0854	19,0278	20,3204

Elaborado por: Autores

Para zona alta río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 10.3886 Ha a 20.3204 Ha, con un incremento de 9.9318 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, área poblada y la vegetación arbustiva, que corresponden a un 78 y a un 15 por ciento respectivamente.

Tabla 27. Áreas de inundación zona media río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
cultivo	0,0492	0,074	0,0782	0,0841	0,1027	0,1305
bosque nativo	3,5618	3,8329	4,0792	4,3506	4,6182	4,8851
vegetación arbustiva	0,0967	0,0991	0,1013	0,104	0,106	0,1082
cuerpo agua	2,9622	2,9704	2,9751	2,981	2,9843	2,9872
Área Total	6,6699	6,9764	7,2338	7,5197	7,8112	8,111

Elaborado por: Autores

Para zona media río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 6.6699 Ha a 8.111 Ha, con un incremento de 1.4411 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y el cuerpo de agua, que corresponden a un 57 y a un 40 por ciento respectivamente.

Tabla 28. Áreas de inundación zona baja río Pindo Grande.

	Área Ha					
Cobertura	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR25**	**TR50**	**TR100**
bosque nativo	4,3083	4,4309	4,5607	4,824	4,963	5,1201
vegetación arbustiva	0,0164	0,021	0,0253	0,0352	0,0449	0,0559
pastizal	0	0	0	0,0004	0,0011	0,0021
área poblada	0,0812	0,0955	0,1076	0,1247	0,139	0,1544
cuerpo agua	3,4986	3,5341	3,5598	3,5913	3,6137	3,6348
Área Total	7,9045	8,0815	8,2534	8,5756	8,7617	8,9673

Elaborado por: Autores

Para zona baja río Pindo Grande, se encontraron áreas de lámina de inundación total, que van de 7.9045 Ha a 8.9673 Ha, con un incremento de 1.0628 Ha, las coberturas de suelo más afectadas son, bosque nativo y el cuerpo de agua, que corresponden a un 56 y a un 42 por ciento respectivamente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.3. CONCLUSIONES

- La microcuenca del río Puyo, es una cuenca intermedia pequeña, que presenta un área de 304.41 Km2, una altura media de 1034.85, pendiente de 0.0206, moderadamente permeable y erosiva, de morfología oval ligeramente alargada, con presencia de ríos cortos y templada capacidad de concentrar agua, presenta condiciones de ríos maduros, llegando al orden 3. Además, el régimen pluviométrico varía de 0.1 mm a 164.7 mm en 24 horas y la precipitación anual puede llegar a los 1000 mm.

- La microcuenca está conformada por suelos tipo arcilloso (tipo C), franco y franco arcilloso y franco limoso (tipo B), y su cobertura está conformada de áreas pobladas, cuerpos de agua, bosque nativo, cultivos, infraestructura antrópica, pastizal, plantación forestal, vegetación arbustiva y vegetación herbácea, resultando el número de curva ponderado igual a 60.18, es decir, una cuenca de media a alta capacidad para generar escorrentía superficial e incrementos rápidos en el caudal de los ríos tributarios de la cuenca.

- La estación que influye en el estudio es la Puyo con código M0008, la cual suministro datos de precipitaciones en 24 horas mensuales desde el año 1990 hasta el año 2020, los datos fueron procesados mediante la distribución de probabilidades pluviométricas de Gumbel para un mejor análisis.

- Los caudales máximos por cada periodo de retorno, fueron fundamentales a la hora de simular el modelo hidráulico unidimensional (1D), para condiciones de flujo permanente. Los hidrogramas de máxima crecida por cada periodo analizado en este estudio son esenciales para el proceso de la simulación del modelo hidráulico bidimensional (2D), ya que otorga una visualización de la dinámica del flujo en condiciones no permanentes a lo largo del rango de tiempo de análisis (24hr).

- Se resalta datos comunes en los resultados de la zona alta del río Puyo, del sector del Malecón como del sector la Isla, de igual manera la zona alta del río Pindo Grande,

tienen como afectación principal por la creciente de los ríos la población adyacente a los mismo y su infraestructura variando en si su porcentaje.

- Mediante la utilización de los software o aplicaciones tales como QGIS *versión 3.16*, con su complemento RiverGis y a los modelos hidrológicos obtenidos por el software HEC-RAS se ha logrado cumplir con los objeticos de la investigación favorablemente.

4.4. RECOMENDACIONES

- Impulsar el desarrollo de investigaciones en la zona con la academia, para el desarrollo de proyectos de gestión del riesgo, productivos, turísticos y generación de conocimiento en el área económica, social y ambiental.

- Actualizar periódicamente la información relacionada con datos meteorológicos y la posibilidad de habilitar más estaciones meteorológicas e hidrológicas para mejores resultados de investigación.

- Para las instituciones gubernamentales realizar un levantamiento de información topográfica y batimétrica en escalas de mayor precisión, que permitan mejores resultados en los modelos matemáticos.

- Aplicar herramientas que permitan analizar e identificar el riesgo y las posibles acciones para que las entidades gubernamentales desde el nivel comunitario hasta el nivel provincial puedan prevenir los daños ocasionados por los fenómenos de inundación.

4.5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F. (1989). Fundamentos de Hidrología de superficie. Limusa. México.
- Aparicio, M. (1994). Fundamentos de hidrología de superficie. Francisco. México.
- Ashskar, F, T.B.M.J Ouarda, R. Roy and B. Bobée. (1993). Robust estimators in hidrologic frecuency análisis, in Engineering Hydrology. Edited by C.Y, Am. Soc. Civ. Eng.
- Bateman, A. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. Obtenido de www.gits.ws.
- Célleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space--time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. Hydrological processes. Ecuador.
- Centeno, M. (2015). Análisis Hidrologico – Hidraulico para los puentes en zonas de inundación generadas por el proyecto "Pacalori". Ecuador.
- CIESAS, L. U. (2012). SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. Obtenido de http://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/.
- Coder, P. (2013). Digitalización automática del Patrimonio Arqueológico a partir de Fotogrametría. Cuarta Edición. Madrid.
- Corredor Daza, J. G. (2015). Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tulua- Riofrío. Bogota.
- Chen, Y., Liu, H., An, J., Görsdorf, U., & Berger, F. H. (2015). A field experiment on the small-scale variability of rainfall based on a network of Micro Rain Radars and rain gauges. Journal of Applied Meteorology and Climatology.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Editorial McGraw Hill Interamericana S.A. Colombia.
- Datos de estación pluviométrica Puyo. (2020). Instituto Nacional de Meteorología e

Hidrología (INAMHI). Quito

- Campos, D. (1978). Procesos del ciclo hidrológico – Relaciones a la lluvia de duración de 24 horas. México.
- El Comercio. (2020). El desbordamiento de dos ríos y un estero provocaron inundaciones en La Isla y Puyo, en Pastaza. Obtenido de https://www.elcomercio.com/actualidad/desbordamiento-rios-estero-inundaciones-pastaza.html.
- Encalada, A. (2016). Funciones Ecosistémicas y Diversidad de los ríos. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). Diseño Hidrológico Zaragoza. España
- Fuentes, J. d. (2004). Análisis Morfométrico de Cuencas: Caso de Estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas.
- GADC Pastaza. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Pastaza. Pastaza
- GADP Pastaza. (2017). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Pastaza. Pastaza
- Gonzales, I. (2015). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México
- Ledesma, O. (2004). Pastaza una provincia que apasiona. Puyo
- Linsley, R. Kohler, M. Paulhus, J. (1988). “Hidrología para Ingenieros”. Segunda Edición. Mc Graw – Hill Interamericana. México.
- Ordonez, J. (2011). Ciclo Hidrológico. Obtenido de http/www.gwp.org/globalasset/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrolo

gico.pdf

- Parizaca, M. (2012). Regionalización de precipitaciones máximas en la cuenca del río Ramis. Perú

- Perez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela.

- Pizarro, R, Novoa, P. (1986). Instructivo N. 5 Determinación de valores probabilísticos para variables hidrológicas. Elementos técnicos de Hidrología. Corporación nacional forestal (CONAF). Chile.

- Pizarro, R., Hernández, I., Muñoz, J., Torres, H., (1988). Elementos técnicos de hidrología III. Universidad de Talca. Chile.

- Pizarro, R. (1993). Proyecto Regional mayor sobre el uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. UNESCO-ORCYT.

- Puerta, C. (2015). Tecnología DRONE en levantamientos topográficos. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- RHydro Ingenieros. (2018). Conoce más del complemento RiverGIS de QGIS. obtenido de https://rhydroingenieros.com/blog/conoce-mas-del-complemento-rivergis-de-qgis.

- SERNANP Perú. (2015). Capítulo 1. Introducción a Quantum GIS. obtenido de https://sernanpqgis.wordpress.com/2015/08/04/capitulo-1-introduccion-aquantum-gis/

- Servicio nacional de gestión de riesgos y emergencias. (2014). Avances en la Gestión de Riesgos 2014. Ecuador

- Sivincha, V. (2017). In slide shar, Informe de peligros, riesgos y vulnerabilidad de la provincia de Chalhuanca. Obtenido de https://es.slideshare.net/victorsivinchaalcca/peligros-riesgos-y-vulnerabilidad-de-la-provincia-de-chalhuanca-apurmac-2015.

- Témez, J. (1978). Calculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Madrid, España,

- Vallejo, C. (2019). La vulnerabilidad física frente a inundaciones del río Puyo en el sector La Isla: cantón Pastaza-provincia de Pastaza. Ecuador

- UNESCO. (2013). Aplicaciones Estadísticas en Hidrología: El Caso de las Intensidades de Precipitación y las Curvas IDF en la Zona Central de Chile. Chile

- US Army Corps of Engineers. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, HEC Davis CA. USA.

- U. S. Army Corps of Engineers. (2008). HEC RAS River Analysis System. User's Manual. www.hec.usage.army.mil. USA

- Villarreal, J., & Zárate, B. (2015). Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control. Tesis pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja

- Villón, B. (2002) "Hidrología" Centro de Información Tecnológica (CIT). Costa Rica.

ANEXOS

			DATOS PLUVIOMETRICOS DIARIOS (mm)											
			NOMBRE	PUYO			LATITUD	1G 30´ 20.40´´	CODIGO	M0008				
			PERIODO	1990 - 2019			LONGITUD	77G 57´29.80´´	LEVACION	956				
N	ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	1990	43.2	109.8	54.5	98.4	45.8	164.7	68.2	43.6	86.3	92.6	55.4	47.8	
2	1991	89.7	53.7	46.6	54.1	46.8	108	50.6	36.8	68.3	49.6	41.9	94.5	
3	1992	86.9	57.7	34.5	64.9	56	50.4	60.9	49.6	39	62.4	163.5	57.5	
4	1993	68	37.7	52.1	65.7	57.7	87	51.1	53.4	35.7	42.1	51.4	71	
5	1994	65.6	45	66.9	97.5	89.1	44.1	53.9	44.7	65.7	75.5	82.2	78.8	
6	1995	44.1	76.1	79.8	49.5	75.5	53.3	102.5	70.6	79.6	35.8	55.6	42.5	
7	1996	61.1	42.8	32.2	60.1	121.8	83.6	49.5	25.9	117.2	101.7	101.3	88.1	
8	1997	65.1	67.4	76.9	78.1	68.5	61	30	38	50.2	35.6	58.6	91.2	
9	1998	24	44.1	36.2	146.2	108.8	63.6	57.4	37.3	39	81.7	44.6	34.2	
10	1999	72.2	40.6	76.2	73.2	50.6	76.2	68.1	58.6	92.5	81.3	78.3	62.3	
11	2000	68.7	51.8	31.5	60.9	130	61.4	54.6	86.7	56.2	66.8	61	54.8	
12	2001	59.1	93.1	31.5	44.1	77.9	83.8	90.2	68.3	58.9	133.6	29.7	57	
13	2002	58.4	49.3	59.8	61.1	75.7	87.2	85.9	69.8	60.7	77	68.1	59.8	
14	2003	127.3	105.1	82.9	116.3	80.7	78.5	44.1	57.8	57.5	83.7	68.7	92.1	
15	2004	85	41.2	84.5	50.2	133.5	50.7	70.4	52.5	78.2	78.3	66.8	88	
16	2005	104.5	81.5	48.2	123.8	51	163.3	76.5	33.1	55.8	58.6	98	92.1	
17	2006	33.9	53.9	71.5	83.3	62	105.4	46.1	52.7	70	123.4	30.5	70.3	
18	2007	46.1	49.4	81.9	82.8	80.6	82.3	42.8	49.7	22.7	80.6	66.7	102.5	
19	2008	50.2	43.7	31.4	101.2	98.9	111.4	83.6	75.3	69.8	48.4	99.3	54.9	
20	2009	138.3	50.2	36.4	104.4	53.8	57.8	72	63.1	59.2	143.1	47.2	73.6	
21	2010	44.5	94.8	63.8	81.2	122.3	42.9	79.7	57.2	34.3	41.4	51.5	74.2	
22	2011	90.6	134.7	85	48.2	74.8	34.6	58.1	48.5	33.3	62.4	91.3	58.6	
23	2012	62	71.8	63.1	76.8	56.5	48.9	51	77.6	33.1	80.8	71.2	61.9	
24	2013	54.7	38.5	83.2	70.6	77	57.3	71.1	89.6	83.9	76.2	70.3	129	
25	2014	84.2	56.1	130	82.5	81.1	50.6	43.8	64.8	60.6	90.5	47.7	79.4	
26	2015	64.7	59.1	67.8	92.1	66.2	50.9	69.7	60.5	26	50.6	86.1	67.8	
27	2016	33.8	94.8	122.6	91.6	62.9	62.9	41.6	34.8	57.2	46.4	83.6	30	
28	2017	109	154.2	74.4	54.5	43	90.2	95.4	60.3	57.3	60.5	99.4	99.8	
29	2018	50.6	55	67.3	61.7	94.2	44.7	76.5	161.2	101.5	42.6	75.3	100.4	
30	2019	85.6	70.6	62.3	69.8	66.5	48.3	43.7	44.3	77.7	68.8	66.7	68.2	
31	2020	69.0	30.7	35.4	29.9	38.8	35.4	42.1	29.4	40.1	57.7	24.7	68.2	

Anexo 1. *Precipitación máxima en 24 hora*



Anexo 2. *Área de inundacion 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr2*



Anexo 3. *Área de inundación 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr5*



Anexo 4. *Área de inundación 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr10*



Anexo 5. *Área de inundación 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr25*



Anexo 6. *Área de inundación 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr50*



Anexo 7. *Área de inundación 1D zona alta (malecón) río Puyo Tr100*



Anexo 8. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr2*



Anexo 9. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr5*



Anexo 10. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr10*



Anexo 11. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr25*



Anexo 12. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr50*



Anexo 13. *Área de inundación 1D zona alta (La Isla) río Puyo Tr100*



Anexo 85. *Río Puyo sector Malecón*



Anexo 86. *Río Puyo sector Malecón*



Anexo 87. *Río Puyo sector Malecón zona alta*



Anexo 88. *Río Puyo sector La Isla zona alta*



Anexo 89. *Río Pindo Grando sector Picolino Zona alta*



Anexo 90. *Río Pindo Grando sector hospital Puyo Zona media*



Anexo 90. *Río Pindo Grando zona media, toma de datos*



Anexo 91. *Río Pindo Grando zona baja, toma de datos GPS*



Anexo 89. *Río Pindo Grando zona media, toma de datos*