

Modelación Ambiental del Riesgo de Inundación en Zonas Urbanas mediante Plataformas Digitales de Libre Acceso

Environmental Modeling of Flood Risk in Urban Areas through Free Access Digital Platforms

Benito Guillermo Mendoza Trujillo¹[0000-0001-8555-8350], Juan Carlos Caicedo² [0000-0002-0624-2073],
María Fernanda Rivera¹[0000-0002-9038-6044], Carlos Andrés Maldonado Chávez¹ [0009-0005-7693-9692], Mauro
José Jiménez Granizo⁵[0000-0001-9131-7289]

^{1,3,4} Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería. Riobamba. Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldos. Ecuador

⁵Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador

{¹benitomendoza, ³mfrivera, ⁴carlosa.maldonado }@unach.edu.ec, ²jcaicedo@institutos.gob.ec,
⁵mauro.jimenez@esPOCH.edu.ec

CITA EN APA:

Mendoza Trujillo, B. G., Caicedo, J. C., Rivera, M. F., Maldonado, C., & Jiménez Granizo, M. J. (2025). Modelación Ambiental del Riesgo de Inundación en Zonas Urbanas mediante Plataformas Digitales de Libre Acceso. *Tesla Revista Científica*, 5(1), e430.
<https://doi.org/10.55204/trc.v5i1.e430>

Recibido: 2024-11-05

Revisado: 2024-11-12 al 2024-12-01

Corregido: 2024-12-10

Aceptado: 2024-12-20

Publicado: 2025-01-02

TESLA

Revista Científica

ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras. The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen. La investigación implementa modelos hidrológicos, espaciales e hidráulicos en zonas alta, media y baja de las cuencas de los ríos Puyo y Pindo Grande, empleando plataformas digitales de libre acceso. Se caracterizó la microcuenca mediante parámetros fisiográficos y geomorfológicos, y se analizaron datos de precipitación de 1990 a 2020. A partir de las curvas IDF y hietogramas de diseño, se generaron hidrogramas de crecida para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años. Las simulaciones en 2D permitieron obtener geometrías espaciales y el análisis dinámico de inundaciones en entornos críticos de escorrentía. Los resultados mostraron que, para un periodo de retorno de 100 años, las áreas de inundación abarcaron 40,56 ha en la zona alta, 10,54 ha en la zona media y 11,96 ha en la zona baja del río Puyo; mientras que, para el río Pindo Grande, las áreas fueron de 20,32 ha, 8,11 ha y 8,97 ha, respectivamente. Las coberturas de suelo más afectadas incluyeron áreas pobladas, infraestructura, vegetación arbustiva, bosque nativo y cuerpos de agua.

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

Abstract: The research implements hydrological, spatial, and hydraulic models in the upper, middle, and lower zones of the Puyo and Pindo Grande river basins, using freely accessible digital platforms. The micro-basin was characterized through physiographic and geomorphological parameters, and precipitation data from 1990 to 2020 were analyzed. Based on Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves and design hyetographs, flood hydrographs were generated for return periods of 5, 25, 50, and 100 years. The 2D simulations provided spatial geometries and a dynamic analysis of flooding in critical runoff scenarios. Results indicated that for a 100-year return period, flood areas covered 40.56 ha in the upper zone, 10.54 ha in the middle zone, and 11.96 ha in the lower zone of the Puyo River. In the Pindo Grande River, flood areas were 20.32 ha, 8.11 ha, and 8.97 ha, respectively. The most affected land covers included populated areas, infrastructure, shrub vegetation, native forest, and bodies of water.

Keywords: simulation, model, Puyo, Pindo Grande, flood.

1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, casi mil millones de personas viven en zonas de inundación (Di Baldassarre et al., 2013) por varios beneficios, como el uso del agua para sus tierras vivas, fértiles y vías de acceso navegables. Sin embargo, la proximidad al agua aumenta los riesgos de inundación del río causada por precipitaciones extremas (Alfieri et al., 2017). Los desastres naturales como las inundaciones se consideran un gran desafío que debe ser atendido no solo a escala mundial, sino también a escala regional y local

(Danumah et al., 2016). El cambio climático puede aumentar la magnitud y la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos al mismo tiempo que aumenta el peligro de inundaciones (Duan et al. 2015; Pedersen et al. 2012).

Las inundaciones fueron el desastre natural más frecuente en todo el mundo en el período 1998-2017, representando el 43% de todos los eventos registrados. Afectaron a más de dos mil millones de personas, provocaron más de 142.000 muertes y provocaron pérdidas por 656 mil millones de dólares (Wallemacq & House, 2017). Según (Chen & Li, 2015) en 2006 las inundaciones pluviales afectan a 157 ciudades en China anualmente. De 1970 a 2019, las inundaciones en Ecuador mataron a 652 personas, afectaron directamente a casi 200.000 e indirectamente a 600.000 más, con daños estimados en unos 4 millones de dólares según (Danumah et al., 2016)), de la misma manera en el 2012 en la ciudad de Pekín una inundación provocó 79 muertes y pérdidas de \$1.86 billones (Wang et al., 2018; Yin et al., 2016).

Una población en crecimiento y una expansión a menudo incontrolada en áreas urbanizadas conducen a cambios severos en el uso de la tierra (Franci et al., 2015) y al aumento de la ocurrencia de inundaciones en Ecuador. Las inundaciones urbanas son el resultado de diferentes factores que incluyen el cambio en el patrón de uso de la tierra, la construcción de densas redes de carreteras, el establecimiento de más asentamientos demasiado cerca del río, la deforestación en las cuencas superiores, entre otras (Monteiro et al., 2018). La presencia de grandes áreas impermeables y, a veces, un sistema de drenaje ineficiente conduce a las áreas urbanas a un alto riesgo de inundaciones (Franci et al., 2015, Danumah et al., 2016).

Como resultado, la urbanización disminuye la capacidad de absorber agua de 2 a 6 veces más de lo que ocurriría en el terreno natural (Sowmya et al. 2015). Alaghmand y col. (2010) describen la relación entre la urbanización y las características hidrológicas como el aumento de la escorrentía, el aumento de la frecuencia, la disminución de la infiltración y la altura de las inundaciones. El rápido crecimiento a menudo da como resultado una urbanización mal planificada que hace que las poblaciones urbanas sean cada vez más vulnerables a las inundaciones (Alaghmand et al., 2010, Sowmya et al., 2015, Danumah et al., 2016).

Las sociedades siempre se han esforzado por minimizar los impactos de las inundaciones reduciendo su vulnerabilidad a través de una variedad de medidas de mitigación de inundaciones que incluyen barreras físicas, cuencas de retención y sistemas de alerta temprana, entre otras (Alfieri et al., 2017; Del Carmen et al., 2008; Sánchez & Reyes, 2015). Desde los primeros años de los asentamientos humanos, las acciones para reducir la vulnerabilidad comúnmente ocurrieron solo después de que ocurrieron eventos catastróficos (Alonso Climent, 2001; Contreras Reyes et al., 2020; Perles et al., 2018; Toscana, 1990). Sin embargo, la intensificación del ciclo hidrológico debido al calentamiento global y la creciente exposición suscitan crecientes preocupaciones sobre futuras inundaciones y sus impactos en la economía y la salud.

Buenos ejemplos de lo descrito anteriormente son la mayoría de las ciudades de la Amazonía ecuatoriana, que son ciudades con fuerte presión demográfica y una alta tasa de crecimiento urbano (Huera-Lucero et al., 2020). En particular el cantón Pastaza, donde se concentra el 58% de la población en la capital,

Puyo con 36.659 habitantes (Cuesta, 2012). En la última década, los cambios de uso / cobertura del suelo, debido a actividades humanas, ocurrieron más rápidamente en Puyo debido a la apertura de caminos que conectan la Región Sierra con la Amazonía. Esto duplicó la población del cantón Pastaza en el período 1990-2010 (Cuesta, 2012).

Por otro lado, la mayoría de los migrantes, tanto los pueblos coloniales de la Sierra (pequeños agricultores) como las comunidades indígenas amazónicas, reclamaron territorios que enfrentan las áreas periurbanas de la Amazonía con una migración abrumadora (Ministerio de Ambiente Agua y Transición Ecológica, 2016). Puyo tiene un centro urbano consolidado (ciudad de Puyo) rodeado por un asentamiento no consolidado (Parroquia de Tarqui, Parroquia de Fátima, Parroquia de 10 de agosto), la principal zona de expansión urbana, que es donde vive el 70% de la población del cantón Pastaza. Puyo y su asentamiento circundante no consolidado han experimentado un crecimiento vertiginoso en los últimos 30 años a una tasa constante de 4.70% anual, la más alta del país (Rosero, 2013).

Desafortunadamente, la ausencia de una planificación urbana adecuada ha contribuido aún más a una expansión urbana descontrolada, lo que ha provocado problemas ambientales generalizados en toda la ciudad. Específicamente, el aumento de las superficies impermeables ha ido agravando los impactos de los caudales de agua durante la época de lluvias, que afecta a la provincia de Pastaza de diciembre a junio (Huera-Lucero et al., 2020).

Puyo se ubica en la microcuenca del río Puyo (norte) y río Pindo (sur) (Figura 1), lo que significa que varios ríos e inundaciones atraviesan la ciudad (Vallejo, 2019).

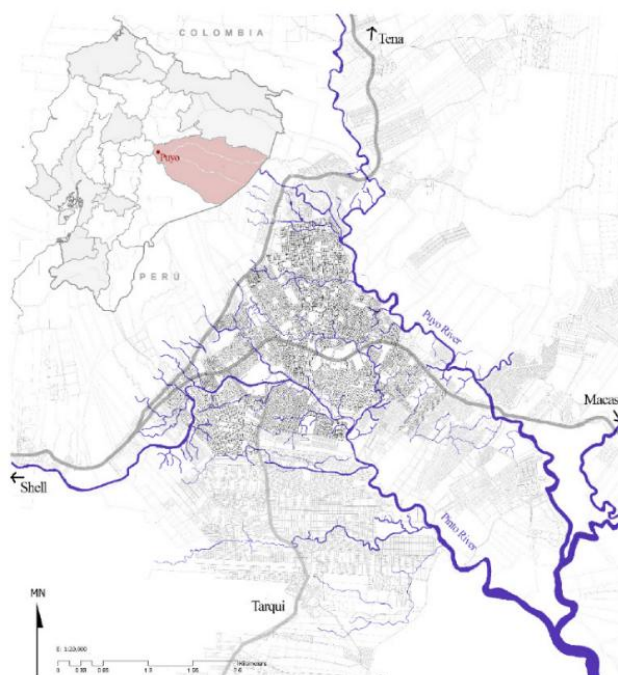


Figura 1 Mapa de la ciudad de Puyo con los dos ríos principales (Huera-Lucero et al., 2020).

En la actualidad existen diversas alternativas en cuanto a programas informáticos o plataformas digitales, diseñados con algoritmos matemáticos, que han sido desarrolladas para estudiar y comprender de mejor manera los fenómenos de la naturaleza, su interacción con el entorno, así como sus impactos

ambientales asociados.

El presente estudio se realizó con el objetivo de modelar ambientalmente el riesgo de inundación en la zona urbana de Puyo, determinando las áreas con mayor susceptibilidad ante la ocurrencia de una posible inundación, partiendo del análisis situacional establecido por el desarrollo de un modelo espacial, hidrológico e hidráulico, con el fin de establecer el comportamiento de los eventos extremos, estimando la llanura de inundación y las áreas de las diferentes coberturas de suelo afectadas por las máximas avenidas en los ríos Puyo y Pindo Grande. Este proceso se llevó a cabo mediante la utilización de plataformas digitales de libre acceso del tipo geográfico, hidrológico e hidráulico tales como QGIS, HEC-HMS, e HEC-RAS, los cuales permiten una adecuada manipulación de datos gracias a las posibilidades que ofrecen sus interfaces de procesamiento, dando como resultado la respectiva simulación en dos dimensiones (2D) para cada uno de los periodos de retorno planteados.

Los resultados permitirán comprender el comportamiento de los ríos en situaciones de crecidas máximas y aportar información relevante para la correcta gestión de los problemas asociados a estos fenómenos.

2. METODOLOGÍA O MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se realizó un modelamiento ambiental, mediante la interacción de tres plataformas digitales de libre acceso, en base a tres tipos de modelos, para la simulación hidrológica, espacial e hidráulico que ayudaron a la obtención de las áreas de inundación y las coberturas de uso de suelo afectadas.

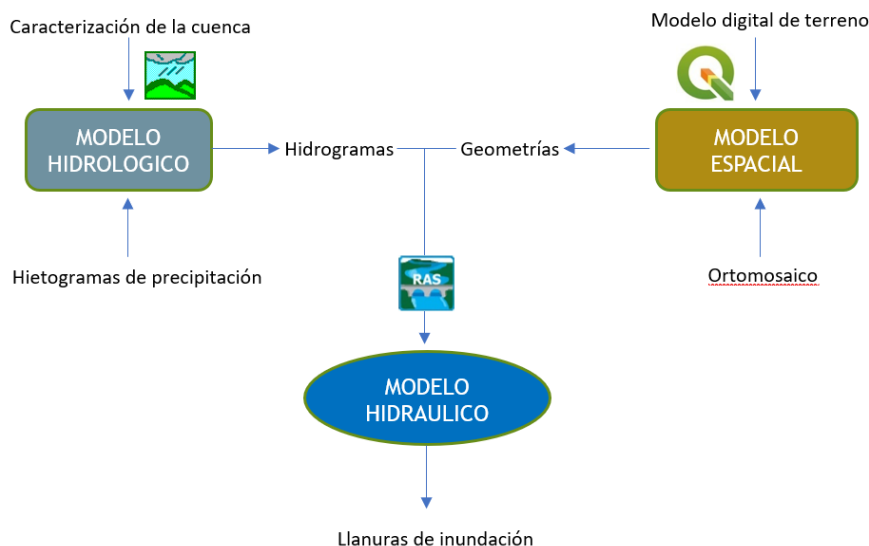


Figura 2 Flujograma modelamiento ambiental.

2.1. Modelo hidrológico

Para la composición del modelo hidrológico se realizó la caracterización de la microcuenca del río Puyo, se obtuvieron los parámetros fisiográficos, geomorfológicos y de la red de drenaje, así como el análisis estadístico de los datos pluviométricos para la obtención de las curvas de intensidad, duración y frecuencia en diferentes periodos de retorno con sus respectivos hietogramas de precipitación.

La información meteorológica necesaria para el modelo hidrológico fue obtenida del Instituto

Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, de la estación Puyo con código M0008, la cual se encuentra directamente dentro del área urbana objeto de estudio, esta 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.

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 Hydrologic 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, obteniendo así los Hidrogramas de crecidas para cada periodo de retorno, necesarios para la simulación del modelo Hidráulico.

2.2. Modelo Espacial



Figura 3 Mapa de ubicación de la zona alta, media y bajo de las zonas de estudio

Para la composición del modelo espacial, se determinaron tres zonas de estudio, en correspondencia

del perímetro urbano y el crecimiento poblacional, así de definieron la zona alta, media y baja, para los ríos Puyo y Pindo Grande, además se realizó el sobrevuelo de las zonas objeto de estudio con ayuda de un dron y mediante fotogrametría lograda con la plataforma PIX4D, se obtuvieron los orto mosaicos, curvas de nivel y modelos digitales de terreno.

Con la información fotogramétrica se realizó la geometría de las zonas de estudio de los dos ríos, gracias a la herramienta QGIS (Quantum GIS) y al complemento RiverGIS, creando información vectorial ráster para una simulación en 2D mediante la opción “2D Flow Area”, con la cual se estableció un polígono, malla y puntos interpolados con relación al modelo digital de Terreno (dtm), posteriormente se exportó la información espacial para ser utilizado en la plataforma digital HEC-RAS, necesario para la simulación del modelo hidráulico.

2.3. Modelo Hidráulico

Para la composición del modelo Hidráulico como data de entrada fueron necesarios los hidrogramas de máximas avenidas producto del modelamiento hidrológico y las geometrías del terreno de las zonas objeto de análisis, producto del modelo espacial.

En la simulación del modelo en 2D se utilizó la malla de puntos interpolada con el modelo digital de terreno, para condiciones de flujo inestable, donde se determinaron las condiciones de contorno, aguas arriba y aguas abajo para las tres zonas de estudio de cada río, para la entrada aguas arriba se estableció la condición de borde, de acuerdo al hidrograma de máximas avenidas, obtenido en la simulación del modelo hidrológico con 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 4 simulaciones de acuerdo con los hidrogramas para cada periodo de retorno, con intervalos de 10 minutos, con una duración de 24 horas, dando como resultado el flujo dinámico de la lámina de agua y las llanuras de inundación para las zonas altas, medias y bajas de los ríos Puyo y Pindo Grande.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelamiento Hidrológico

El modelo hidrológico se realizó mediante el algoritmo del software HEC-HMS, como datos de entrada se utilizaron los parámetros de la caracterización de la cuenca y los hietogramas de precipitación y como resultados se obtuvieron los hidrogramas de máximas avenidas.

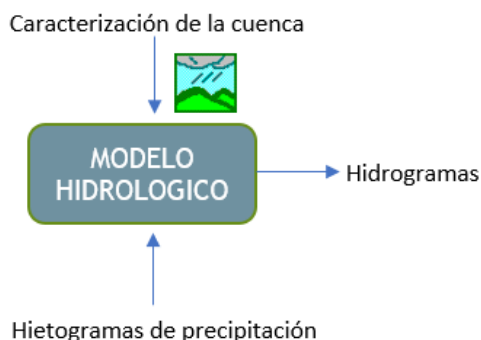


Figura 4 Flujograma modelamiento hidrológico.

3.1.1. Caracterización de la Microcuenca

La zona de estudio se encuentra dentro de la Microcuenca del Río Puyo de la cual se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 1 y 2, figura 5 y 6, en base a la determinación de los parámetros fisiográficos, de la red de drenaje y geomorfológicos.

Tabla 1 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 Río 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
Coefficiente de compacidad (Kc)	1.4500		Irregular

Tabla 2 Parámetros de la red de drenaje de la microcuenca del 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
Coefficiente de torrencialidad	0.12	N.total N1/Km ²	
Coefficiente 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		

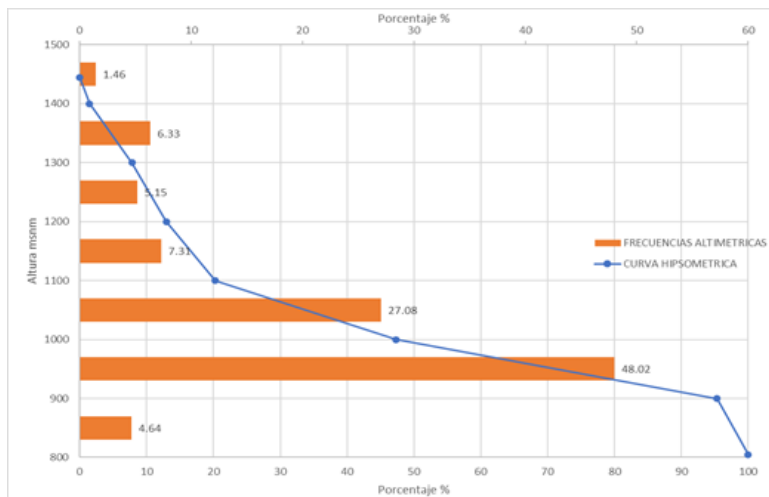


Figura 5 Curva hipsométrica de la microcuenca del río Puyo

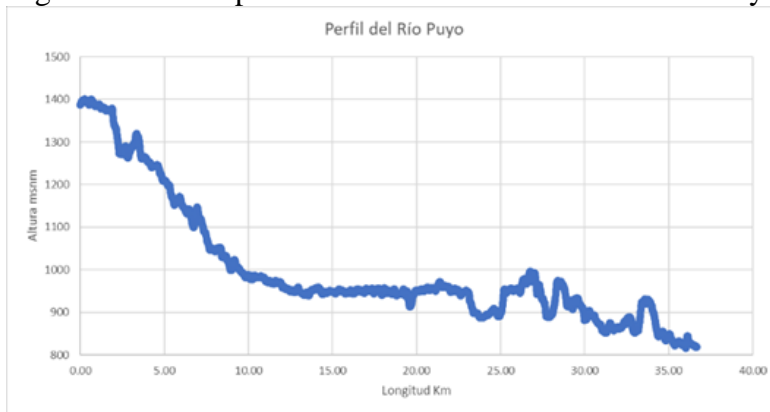


Figura 6 Perfil del río Puyo

3.1.2. Tratamiento estadístico de los datos pluviométricos.

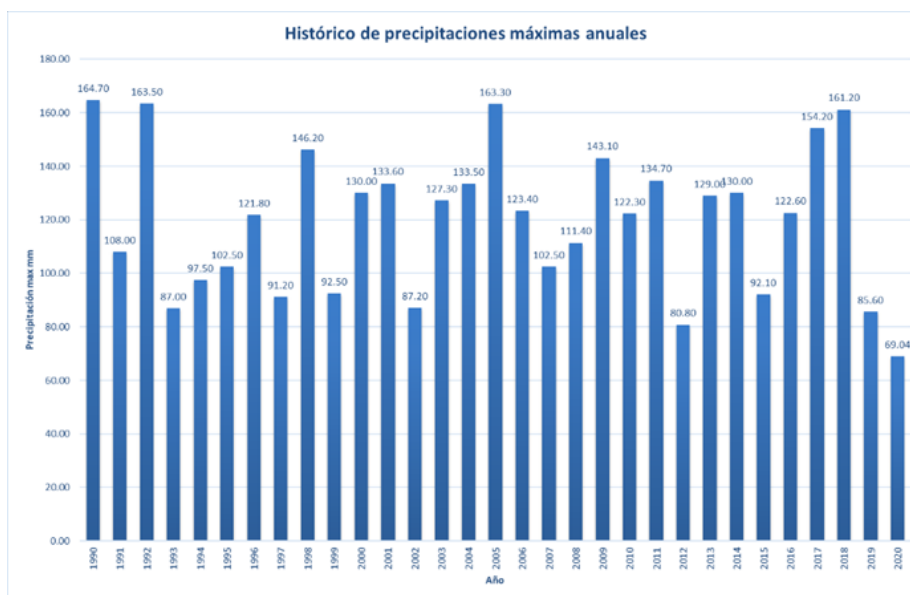


Figura 7 Histórico de precipitaciones máximas anuales

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, se obtuvo una muestra de 30 años de datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas, siendo los valores más altos registrados en los años 1990, 1992, 2005, 2018, así como se detalla en la figura 7.

3.1.3. Cálculo de la distribución pluviométrica

Tabla 3 Precipitaciones Mensuales Máximas Probables para distintas frecuencias de retorno.

Cálculo variables probabilísticas	Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias																																													
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 119.73 \text{ mm}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Periodo Retorno</th> <th>Variable Reducida</th> <th>Precip. (mm)</th> <th>Prob. de ocurrencia</th> <th>Corrección intervalo fijo</th> </tr> <tr> <th>Años</th> <th>YT</th> <th>XT(mm)</th> <th>F(xT)</th> <th>XT (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>0.3665</td> <td>115.2872</td> <td>0.5000</td> <td>130.2745</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1.4999</td> <td>139.2065</td> <td>0.8000</td> <td>157.3033</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>2.2504</td> <td>155.0431</td> <td>0.9000</td> <td>175.1987</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>3.1985</td> <td>175.0528</td> <td>0.9600</td> <td>197.8096</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>3.9019</td> <td>189.8970</td> <td>0.9800</td> <td>214.5837</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>4.6001</td> <td>204.6317</td> <td>0.9900</td> <td>231.2338</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>6.2136</td> <td>238.6813</td> <td>0.9980</td> <td>269.7099</td> </tr> </tbody> </table>	Periodo Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo	Años	YT	XT(mm)	F(xT)	XT (mm)	2	0.3665	115.2872	0.5000	130.2745	5	1.4999	139.2065	0.8000	157.3033	10	2.2504	155.0431	0.9000	175.1987	25	3.1985	175.0528	0.9600	197.8096	50	3.9019	189.8970	0.9800	214.5837	100	4.6001	204.6317	0.9900	231.2338	500	6.2136	238.6813	0.9980	269.7099
Periodo Retorno		Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo																																									
Años		YT	XT(mm)	F(xT)	XT (mm)																																									
2		0.3665	115.2872	0.5000	130.2745																																									
5		1.4999	139.2065	0.8000	157.3033																																									
10		2.2504	155.0431	0.9000	175.1987																																									
25	3.1985	175.0528	0.9600	197.8096																																										
50	3.9019	189.8970	0.9800	214.5837																																										
100	4.6001	204.6317	0.9900	231.2338																																										
500	6.2136	238.6813	0.9980	269.7099																																										
$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 27.07 \text{ mm}$																																														
$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S = 21.10 \text{ mm}$																																														
$u = \bar{x} - 0.5772 * \beta = 107.55 \text{ mm}$																																														
	$\Gamma = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right), X_T = u + Y_T \cdot \beta, F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\beta}\right)}}$																																													
	$\Gamma_{(x)} = 1.13 \cdot X_T$																																													

Al obtener los regímenes de precipitación de 24 horas máximas mensual multianual, se procedió a identificar los meses 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 (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años), tal como se detalla en la tabla 3.

3.1.4. Determinación de la precipitación máxima diaria

Teniendo en cuenta los coeficientes propuestos por D.F. Campos, se determinaron las precipitaciones máximas Pd (mm) para diferentes tiempos de duración y periodo de retorno. Se utilizo el término XT (mm), el cual multiplicado por cada uno de los coeficientes corresponde al tiempo de duración, así como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.

Tiempo de Duración	Coeficiente D.F. Campos	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

3.1.5. Cálculo de la Intensidad de 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:

$$I = \frac{Pd(mm)}{t(hr)} \quad (1)$$

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:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad (2)$$

Realizando un cambio de variable se obtiene que:

$$d = K * T^m \quad (3)$$

Donde la anterior expresión queda como:

$$I = d * t^{-n} \quad (4)$$

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, así como se detalla en la tabla 5.

Tabla 5 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

En función del cambio de variable realizado, se realiza otra regresión potencial entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación para las curvas IDF.

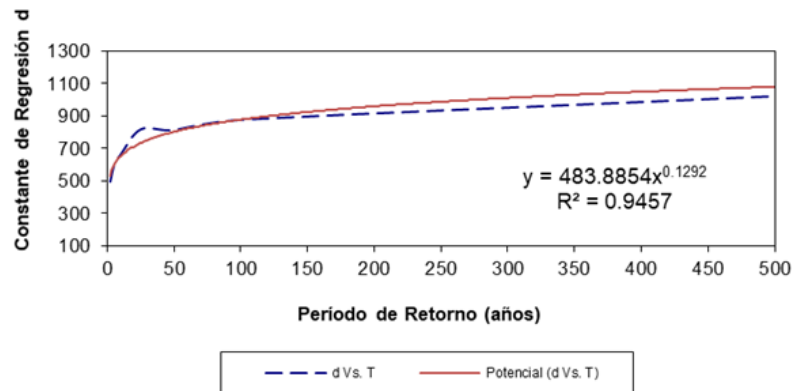


Figura 8 Regresión potencial.

$$I = \frac{483.8854 * T^{0.129190}}{t^{0.61885}} \quad (5)$$

La figura 9 muestra las curvas IDF para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con una duración de 5 horas de lluvia.

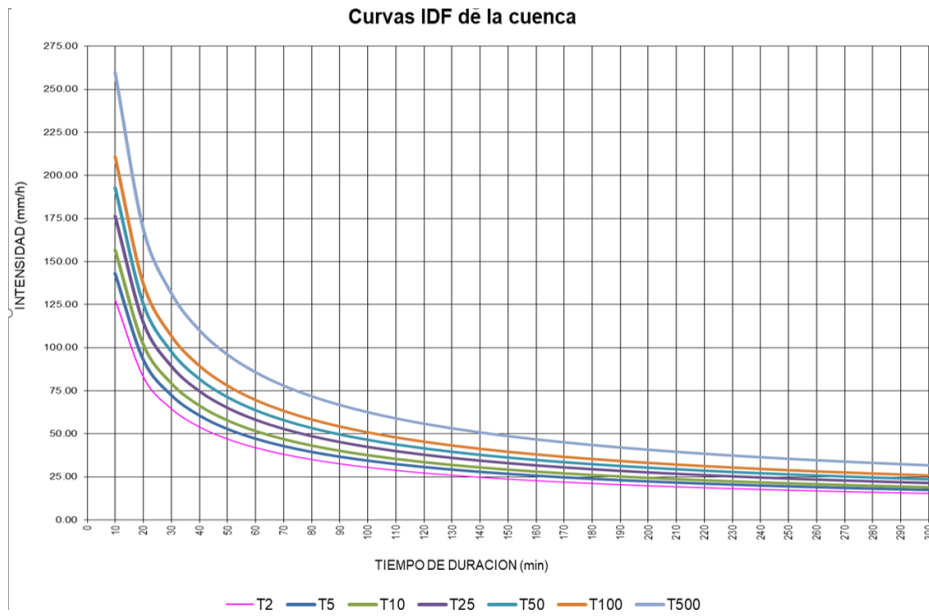


Figura 9 Curvas IDF de la microcuenca del río Puyo.

3.1.6. 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 (L_c) y la pendiente de la cuenca (S) en unidades de km y m/m respectivamente. La expresión para el tiempo de concentración (T_c) se obtuvo de la siguiente ecuación.

$$T_c = 0.066 * \left(\frac{L_c}{S^{0.55}} \right)^{0.77} \quad (6)$$

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 periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años con una duración de la lluvia de 300 minutos (5horas), así como se representa en la figura 9.

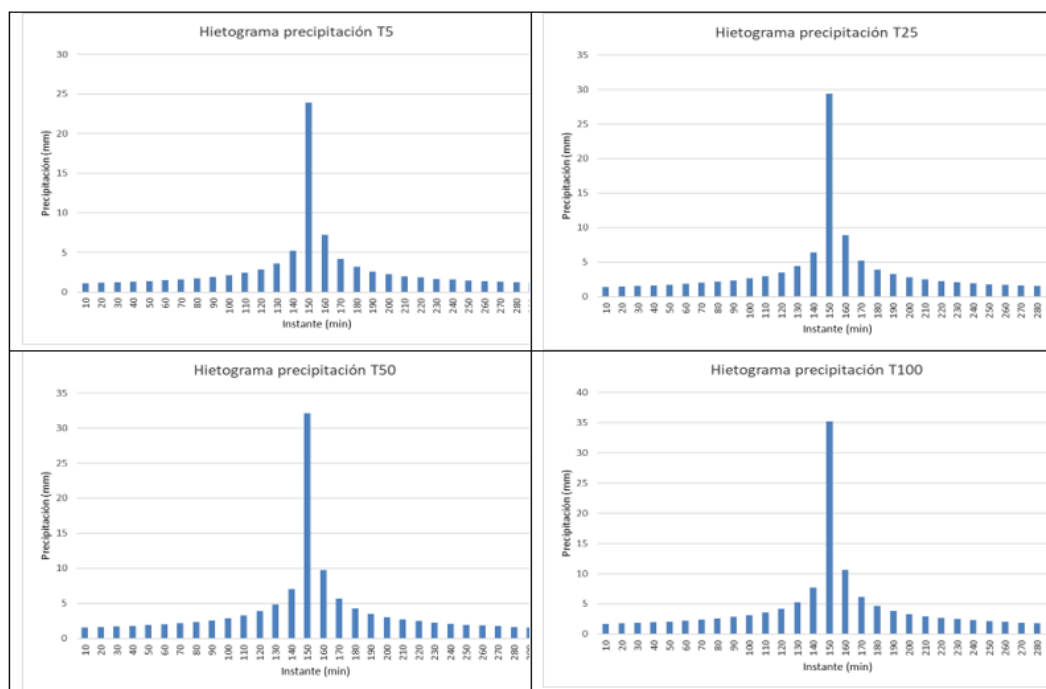


Figura 10 Hietogramas de precipitación para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años

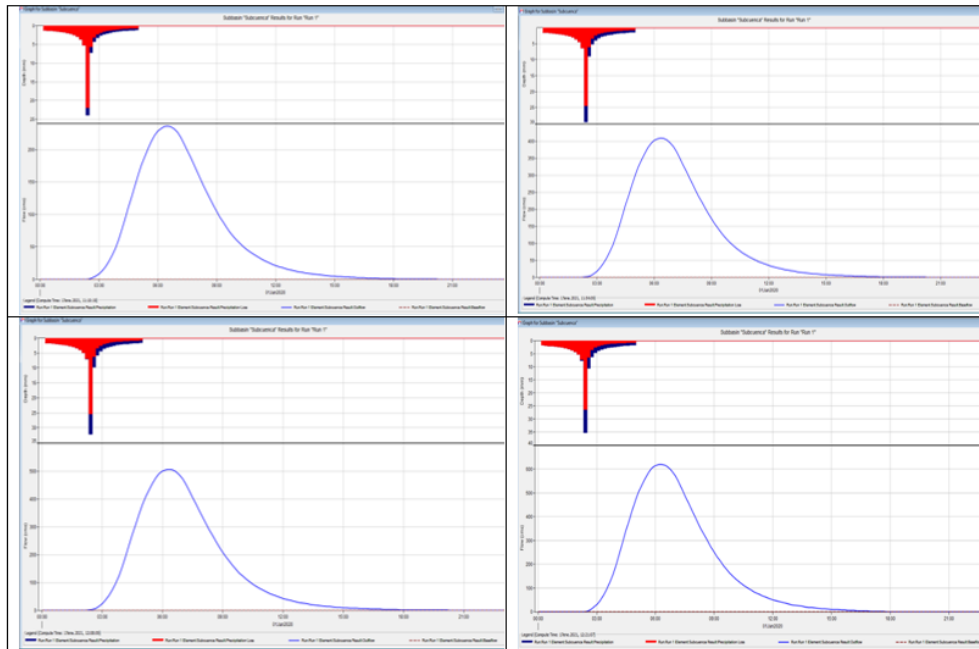


Figura 11 Hidrogramas de crecidas para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años

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 hidrogramas de diseño para cada periodo de retorno y los siguientes parámetros de la caracterización de la cuenca, el área A, tiempo de concentración T_c , número de curva CN, incluyendo el tiempo de retardo “LagTime” trabajado en función del T_c , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Lagtime} = 0.6 * T_c \quad (7)$$

Como resultado de la simulación se obtuvieron los hidrogramas de crecida para los diferentes periodos de retorno que se detallan en la figura 11, insumos que fueron utilizados posteriormente en el software HEC-RAS.

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.

3.2. Modelamiento espacial

El modelo espacial se realizó en base al software QGIS y al complemento RiverGIS, como datos de entrada se utilizaron los modelos digitales de terreno y orto mosaicos obtenidos de la fotogrametría de drones realizados en las zonas de estudio y como resultados se obtuvieron las geometrías en 2D en base a la topografía del terreno.

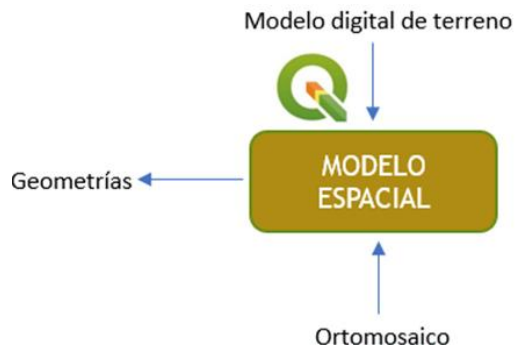


Figura 12 Flujograma modelamiento espacial.

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 bidimensionales (2D) de la zona alta, zona media y zona baja de los ríos Puyo y Pindo Grande.



Figura 13 Geometría modelo bidimensional zona Malecón río Puyo.

3.3. Modelamiento Hidráulico

El modelo espacial se realizó en base al algoritmo del software HEC-RAS, como data de entrada se utilizaron los resultados obtenidos en los modelos hidrológicos y espacial, es decir los hidrogramas de máximas avenidas y la geometría bidimensional de las zonas de estudio, dando como resultados las llanuras de inundación.

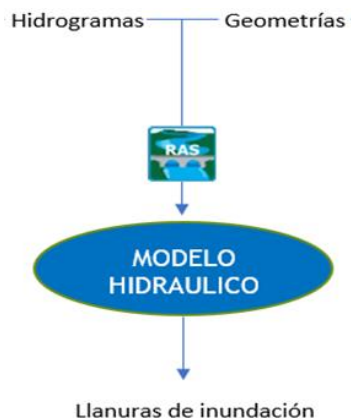
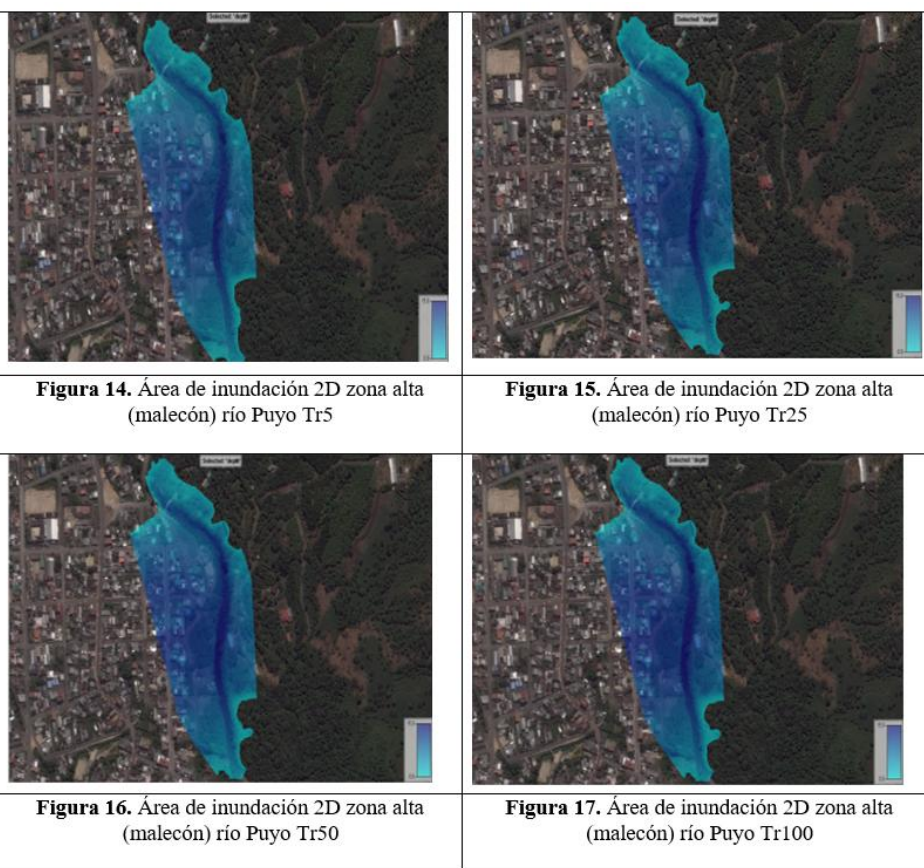


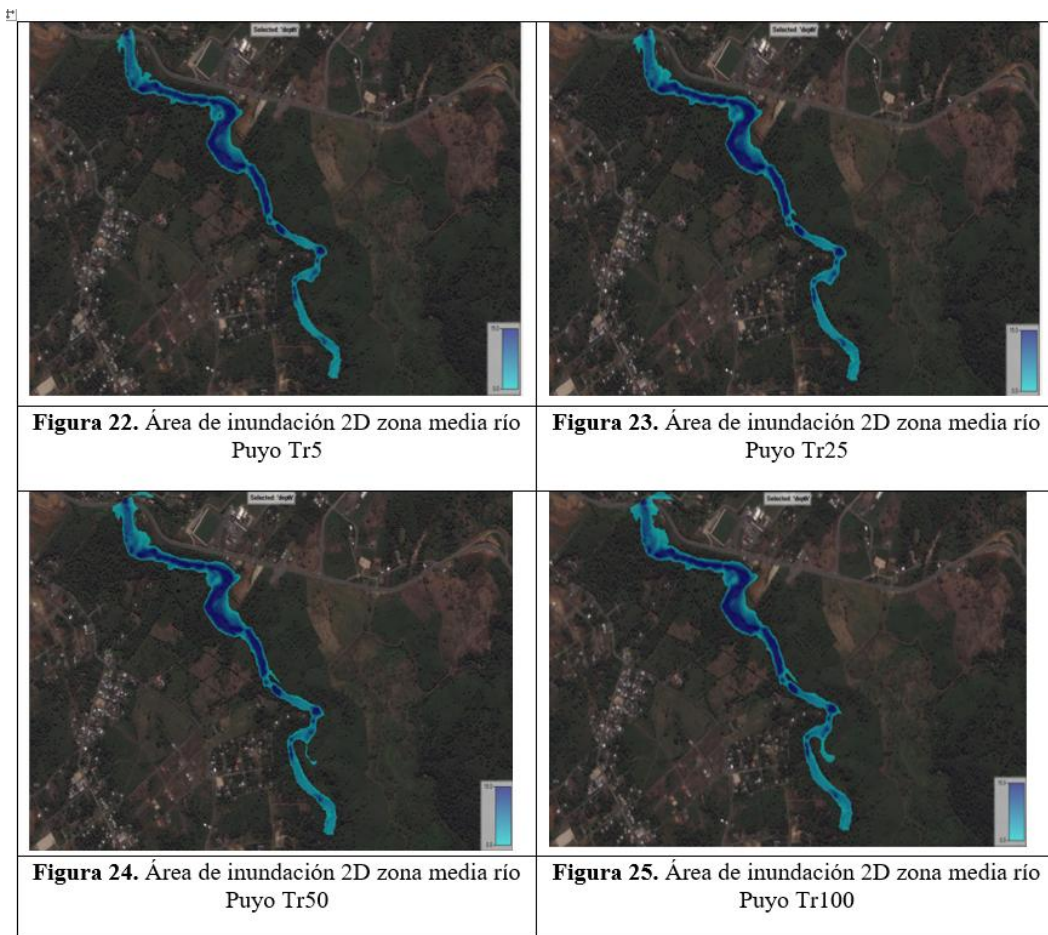
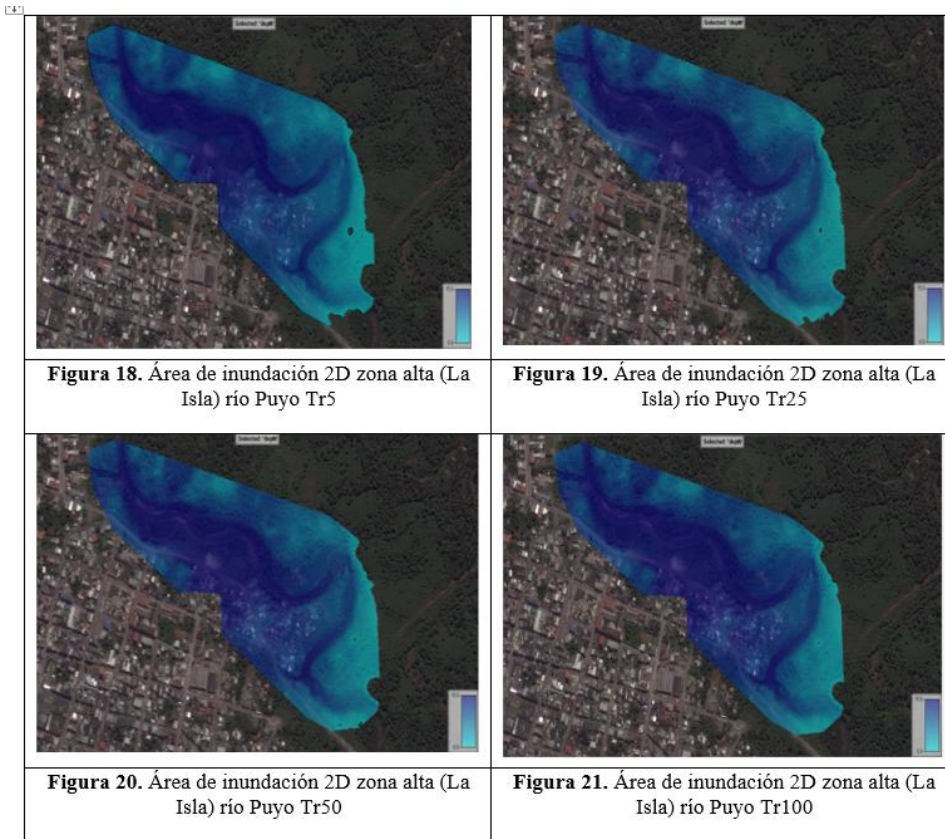
Figura 14 Flujograma modelamiento hidráulico.

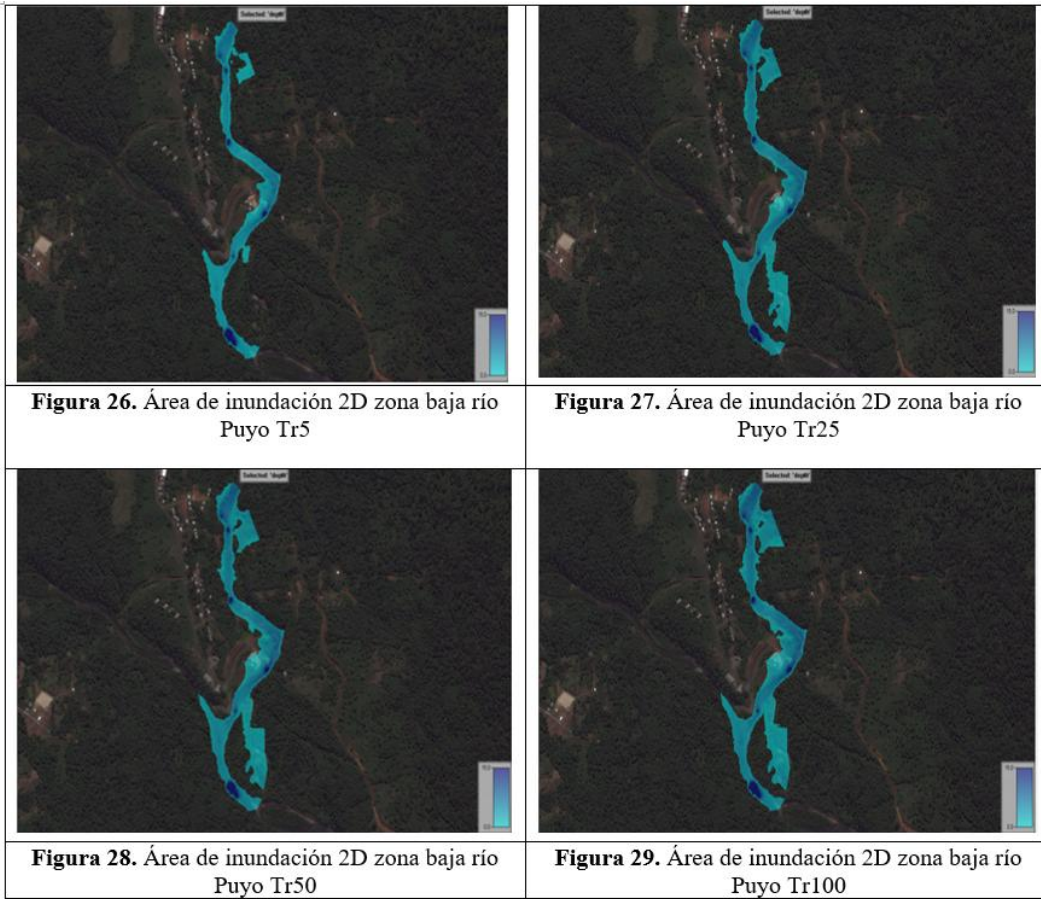
Con los resultados obtenidos en el modelo hidrológico y modelo espacial, se ejecutó la simulación del modelo hidráulico con el software HEC-RAS versión 5.0.7, se utilizaron como insumos, los datos obtenidos en el modelo hidrológico referentes al hidrograma de crecidas para cada periodo de retorno y la geometría 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 con la profundidad normal con la pendiente de fricción de 0,0203.

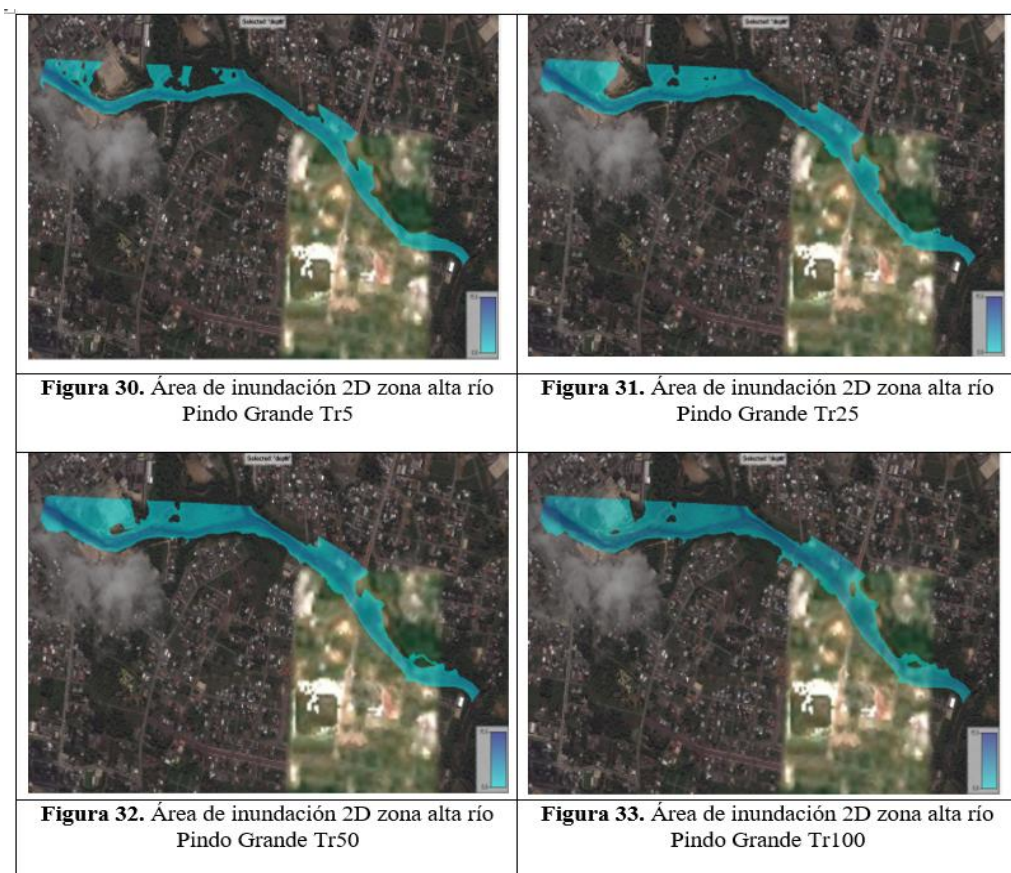
En la simulación del modelo hidráulico bidimensional (2D), a la zona alta del río Puyo se dividió en dos partes para un mejor estudio, debido a que esta zona presenta inundaciones con mayor frecuencia, esta es, la zona comprendida por el Malecón y la zona del barrio la Isla, los resultados se muestran de las figuras 14 – 29.

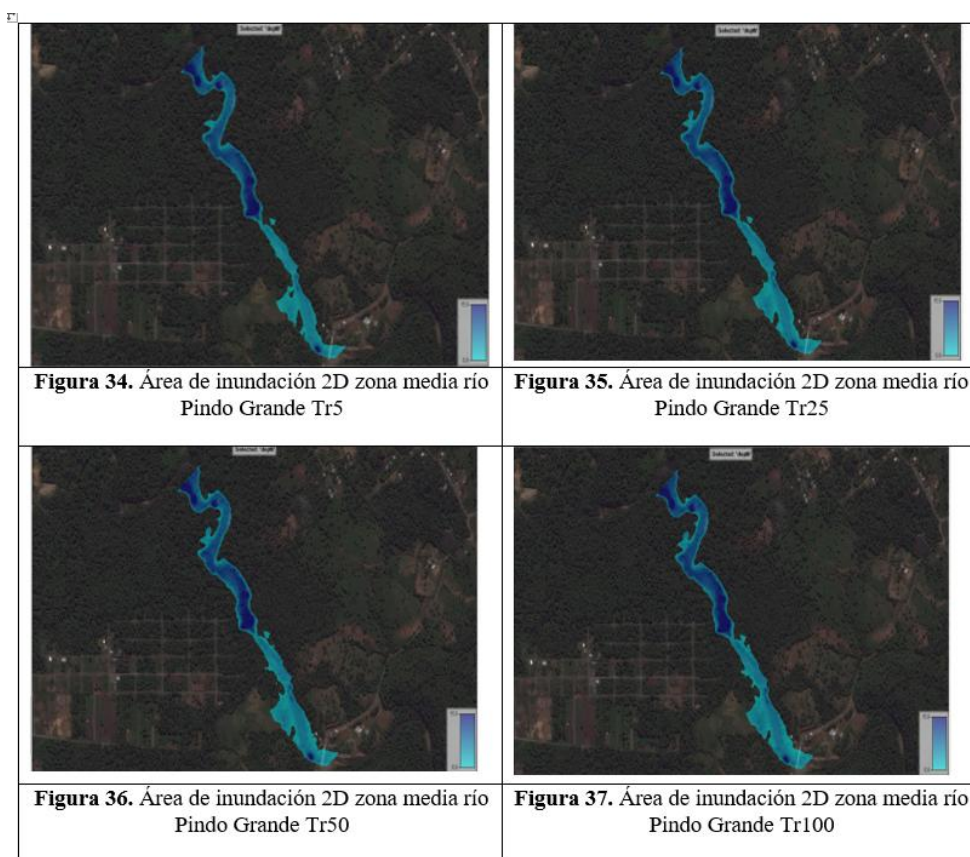
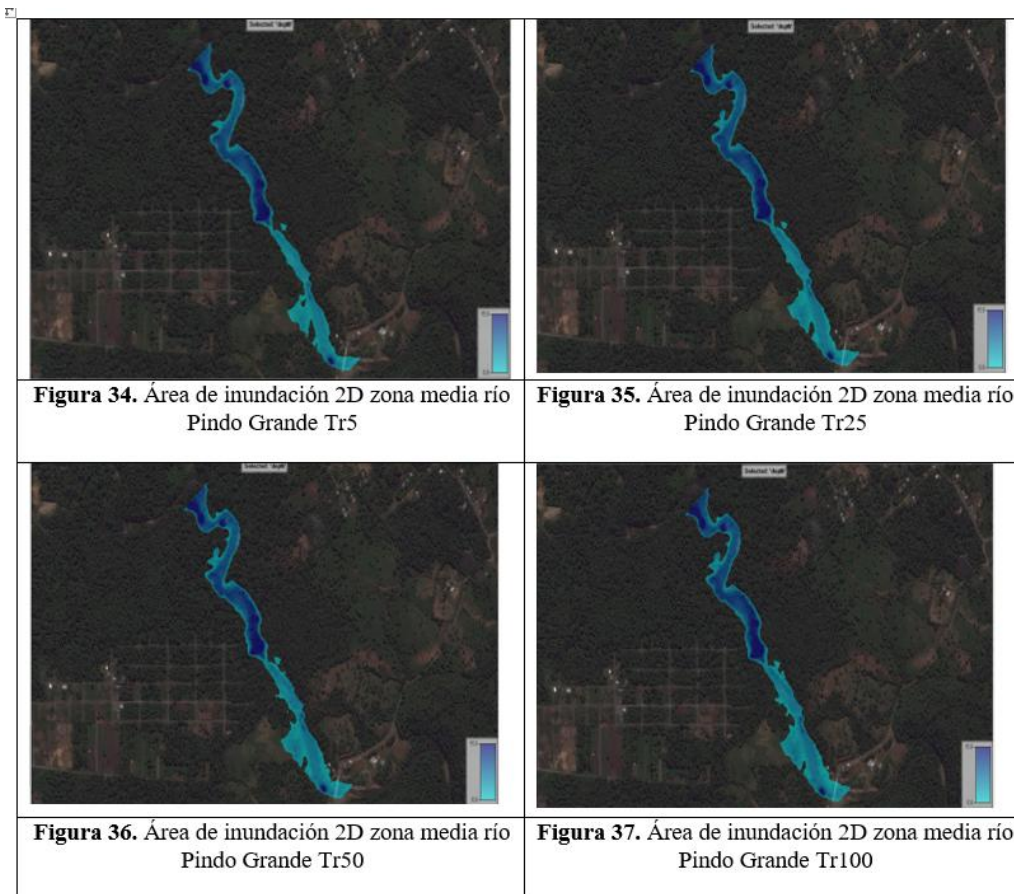






En la simulación del modelo hidráulico bidimensional (2D) para el río Pindo Grande, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las figuras 30 – 41.





Discusiones:

Para la zona comprendida en el Malecón, se encontraron áreas con 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.

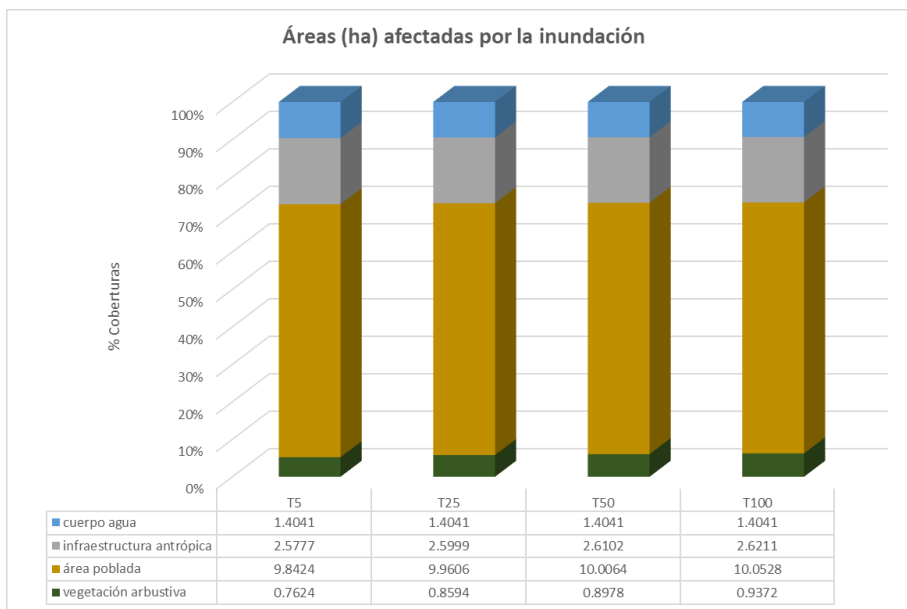


Figura 42. Áreas de la zona Malecón del río Puyo afectadas por la inundación.

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.

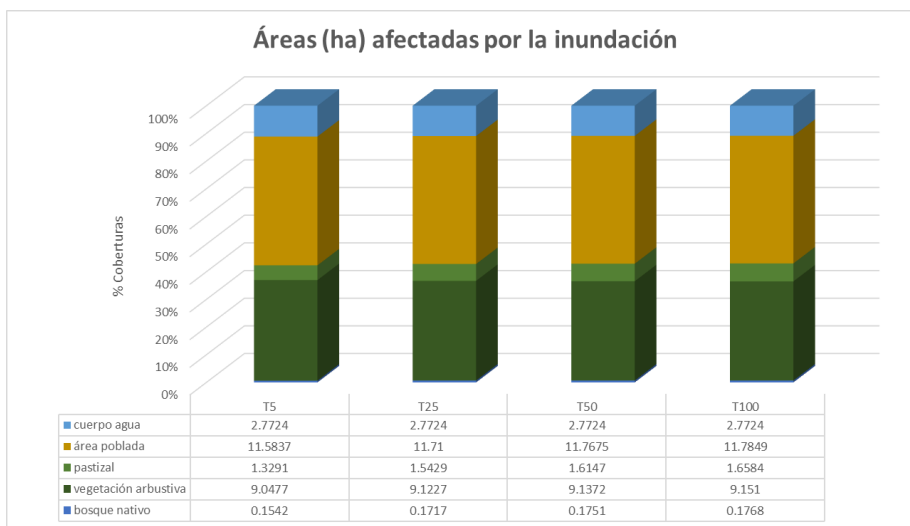


Figura 43. Áreas de la zona la Isla del río Puyo afectadas por la inundación.

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.

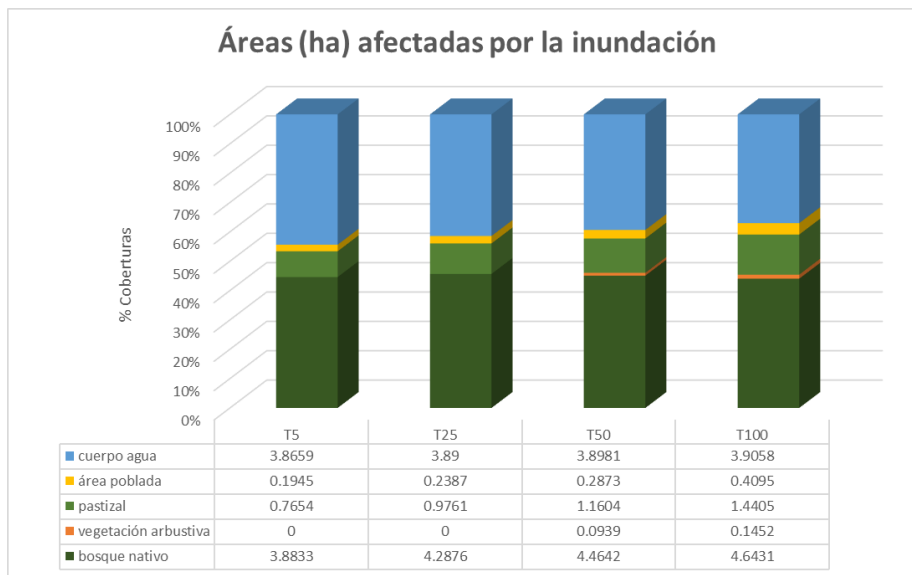


Figura 44. Áreas de la zona media del río Puyo afectadas por la inundación.

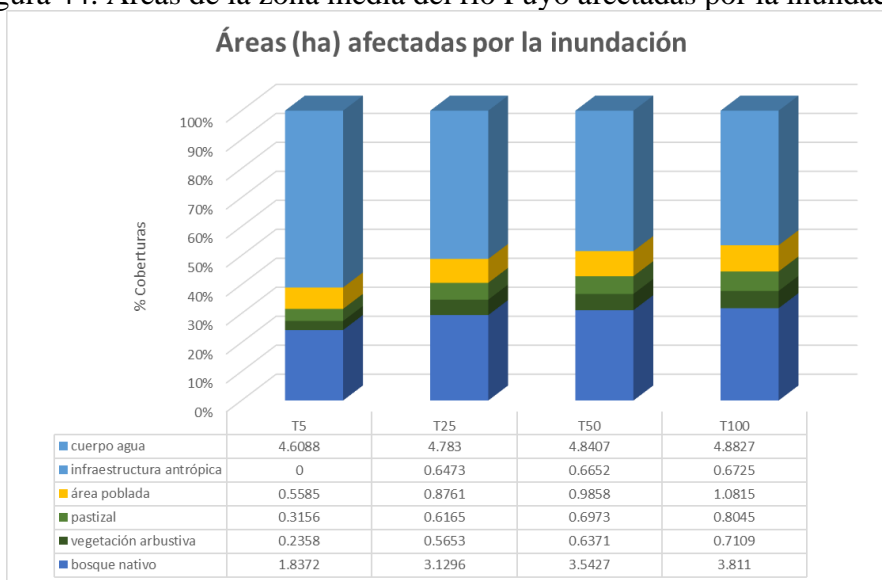


Figura 45. Áreas de la zona baja del río Puyo afectadas por la inundación.

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.

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.

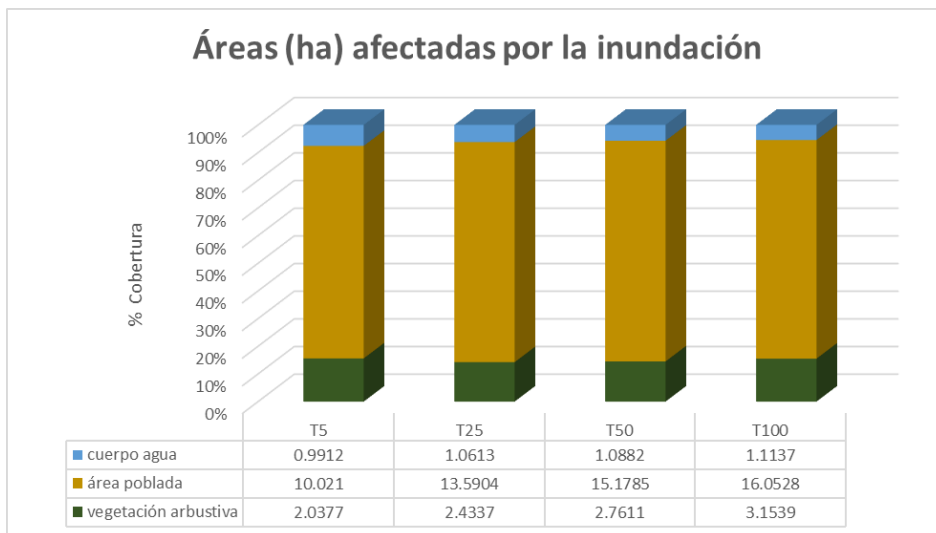


Figura 46. Áreas de la zona alta del río Pindo Grande afectadas por la inundación.

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.

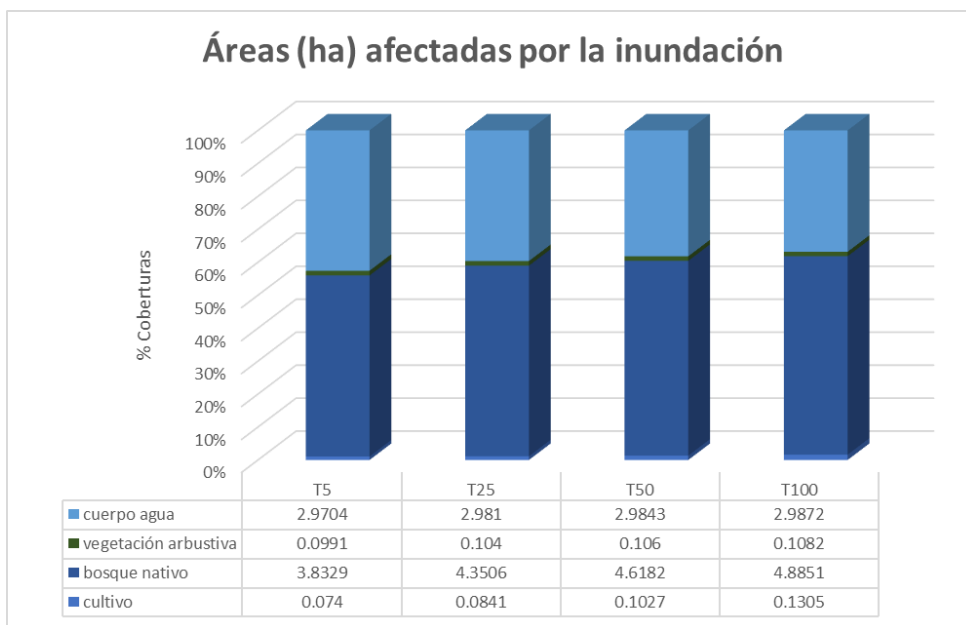


Figura 46. Áreas de la zona media del río Pindo Grande afectadas por la inundación

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.

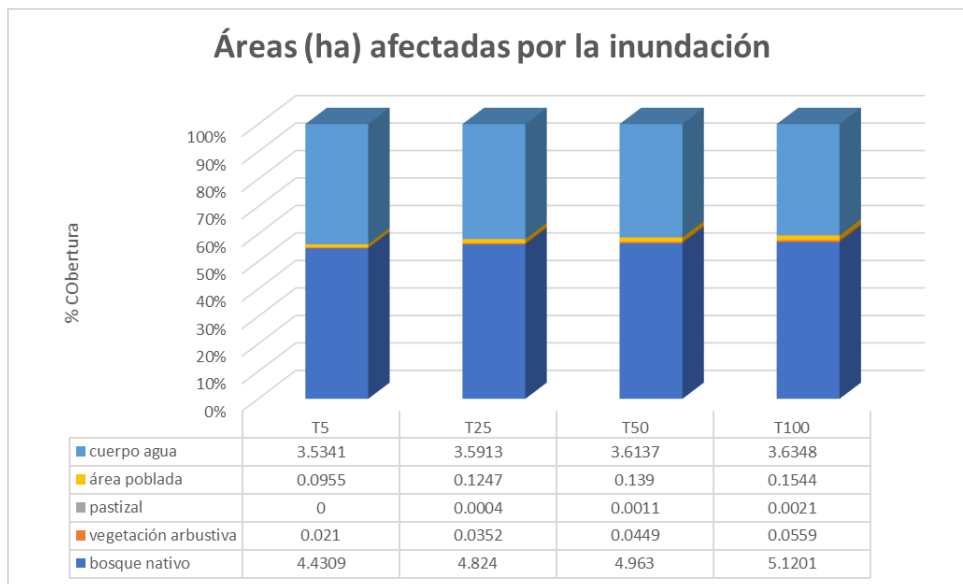


Figura 47. Áreas de la zona baja del río Pindo Grande afectadas por la inundación.

4. 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 m, 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, 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 (CN) 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.

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).

Como se puede evidenciar el incremento de la afectación por inundaciones es inminente, gracias a la modelación matemática concluimos que la zona con mayor afectación por inundaciones es la zona alta del río Pindo Grande la cual incremento 9.9318 ha, generando una gran afectación principalmente a las áreas pobladas y vegetación arbustiva.

Del análisis realizado tomando en cuenta el área de las llanuras de inundación y las coberturas de usos de suelo de las zonas de estudio, se evidencia mayor afectación en las áreas pobladas, infraestructura antrópica y vegetación arbustiva en las zonas altas, bosque nativo y cuerpo de agua en la zona media y baja.

Gracias a la información obtenida se pueden desarrollar estudios para el ordenamiento territorial y la gestión ambiental del Cantón Pastaza, así como medidas de prevención de riesgos de inundaciones, mapeo y control de zonas vulnerables a estos fenómenos.

FINANCIACIÓN

La fuente de financiamiento fu la Universidad Nacional de Chimborazo

CONFLICTO DE INTERESES

Esta investigación no tiene conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

<i>Participar activamente en:</i>	<i>Benito Mendoza</i>	<i>Juan Caicedo</i>	<i>María Fernanda Rivera</i>	<i>Carlos Maldonado</i>
<i>Conceptualización</i>	X			
<i>Análisis formal</i>				X
<i>Adquisición de fondos</i>	X	X	X	X
<i>Investigación</i>	X	X		X
<i>Metodología</i>	X		X	
<i>Administración del proyecto</i>	X			
<i>Recursos</i>	X	X	X	X
<i>Redacción –borrador original</i>	X			
<i>Redacción –revisión y edición</i>			X	
<i>La discusión de los resultados</i>	X	X	X	X
<i>Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.</i>			X	X

REFERENCIAS

- Alaghmand, S., Abdullah, R. bin, Abustan, I., & Vosoogh, B. (2010). GIS-based river flood hazard mapping in urban area (a case study in Kayu Ara river basin, Malaysia). *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 488–500.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171–182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- Alonso Climent, I. (2001). Tercer mundo, desarrollo, desastres y tecnología: una mirada desde la geografía. *Serie Geográfica*, 10, 11–26.
- Cheng, X. T., & Li, C. C. (2015). The evolution trend, key features and countermeasures of urban flood risk. *China Flood Drought Manag*, 25(3), 6–9.
- Contreras Reyes, O., Vargas Ortega, V. S., & López Batiz, O. (2020). Registro de daños en infraestructura y líneas vitales ocasionados por sismo y viento. 3–13.
- Cuesta, R. (2012). El uso de modelos geográficos en el análisis del uso del suelo y determinación de zonas de conflicto. su aplicación en el cantón pastaza – amazonía ecuatoriana (Issue 0291). Universidad Nacional del Sur.
- Danumah, J. H., Odai, S. N., Saley, B. M., Szarzynski, J., Thiel, M., Kwaku, A., Kouame, F. K., & Akpa, L. Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>
- Del Carmen, G., Eroza, E., Álvarez, L., & Dorantes, J. (2008). Propuesta Educativa Para La Gestión de desastres en la región de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, RMIE, 13(38), 919–943.
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L., & Blöschl, G. (2013). Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>
- Duan, W., He, B., Takara, K., Luo, P., Hu, M., Alias, N. E., & Nover, D. (2015). Changes of precipitation amounts and extremes over Japan between 1901 and 2012 and their connection to climate indices. *Climate Dynamics*, 45(7–8), 2273–2292. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2778-8>
- Franci, F., Mandanici, E., & Bitelli, G. (2015). Remote sensing analysis for flood risk management in urban

- sprawl contexts. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 583–599. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.913695>
- Huera-Lucero, T., Salas-Ruiz, A., Changoluisa, D., & Bravo-Medina, C. (2020). Towards sustainable urban planning for puyo (Ecuador): Amazon forest landscape as potential green infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114768>
- Ministerio de Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2016). *Ambiente 2035* (Vol. 6, Issue August).
- Monteiro, E. S. V., Fonte, C. C., & de Lima, J. L. M. P. (2018). Flood hazard assessment of Vamanapuram River Basin, Kerala, India: An approach using Remote Sensing & GIS techniques Available online at www.pelagiaresearchlibrary.com Pelagia Research Library Flood hazard assessment of Vamanapuram River Basin, Kerala. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(3), 285–294.
- Pedersen, A. N., Mikkelsen, P. S., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2012). Climate change-induced impacts on urban flood risk influenced by concurrent hazards. *Journal of Flood Risk Management*, 5(3), 203–214. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01139.x>
- Perles, M. J., Olcina, J., & Mérida, M. (2018). Balance de las políticas de gestión del riesgo de inundaciones en España: de las acciones estructurales a la ordenación territorial. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, L, 417–438.
- Rosero, B. (2013). Planificación Territorial para la definición de una estructura funcional para la ciudad del Puyo y zonas de expansión. In Pontificia Universidad Católica del Ecuador
- Sánchez, L., & Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. In Naciones Unidas CEPAL (Ed.), *Economic Commission for Latin America and the Caribbean (CEPAL)*.
- Sowmya, K., John, C. M., & Shrivasthava, N. K. (2015). Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 75(2), 1271–1286. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1372-4>
- Toscana, A. (1990). Protección civil, población, vulnerabilidad y riesgo en Santiago Miltepec, Toluca. *Investigaciones Geográficas*, 1(74), 35–47.
- Vallejo, C. (2019). La vulnerabilidad física frente a inundaciones del río Puyo en el sector La Isla: cantón Pastaza-provincia de Pastaza Trabajo. In Carrera de Ingeniería en Geología La (Vol. 2, Issue 1). Universidad Central del Ecuador Facultad.
- Wallemacq, P., & House, R. (2017). Economic Losses, Poverty & DISASTERS. In UNISDR (Ed.), *BMC Public Health* (Vol. 5, Issue 1). ONU.
- Wang, Y., Chen, A. S., Fu, G., Djordjević, S., Zhang, C., & Savić, D. A. (2018). An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. *Environmental Modelling & Software*, 107, 85–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.010>
- Yin, J., Yu, D., & Wilby, R. (2016). Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: A case study of downtown Shanghai, China. *Science of The Total Environment*, 544, 744–753. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.159>