Modelamiento de inundación mediante los softwares HEC-RAS y HEC-HMS para los ríos Pindo y Puyo, Pastaza, Ecuador.

Betsaida Peñafiel[1]
bs.penafielb@uea.edu.ec

Ricardo Abril, M. Sc[2]
rvabril@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental (1)

Resumen

El presente trabajo de investigación surge como respuesta a los daños generados a nivel local por las inundaciones presentadas en la provincia de Pastaza. El objetivo fue determinar las zonas de riesgo de inundación en los ramales Pindo y Puyo para identificar que sectores urbanos y rurales se podrían ver afectados a periodos de retorno de 100 años en el peor de los eventos de precipitación extrema. En la metodología se tomó como referencia los caudales de crecida máximos registrados en cada afluente que desemboca en los ríos principales antes mencionados. Con estos datos y con las demás características geomorfológicas e hidrológicas se generó la marca de inundación sobre modelos digitales de terreno para luego ser plasmada sobre ortofotografías de la zona. El caudal máximo de crecida acumulado fue de 309.49 m3/s para el río Pindo antes de unirse al río Puyo y de 163.6m3/s para el río Puyo antes de unirse con el Pindo. El área de inundación neta calculada fue de 0.95 km2 para el río Pindo y 0.61 km2 para el río Puyo. Finalmente, se identificó que las zonas de posible inundación afectarían a sectores poblados como el dique de Shell, puente de Bellavista, barrio Las Palmas y barrio el Obrero entre los principales.

Palabras Clave: Crecida, caudal, HEC-RAS, HEC-HMS.

Abstract

The present investigation work arises as a response to the damages generated at the local level by the floods presented in the province of Pastaza. The objective was to determine the flood risk zones in the Pindo and Puyo branches to identify which urban and rural sectors could be affected at return periods of 100 years in the worst of the extreme precipitation events. In the methodology, the maximum flood flows registered in each tributary that flows into the main rivers mentioned above were taken as a reference. With these data and with the other geomorphological and hydrological characteristics, the flood mark was generated on digital terrain models to later be captured on orthophotographs of the area. The maximum cumulative flood flow was 309.49 m3/s for the Pindo River before joining the Puyo River and 163.6m3/s for the Puyo River before joining the Pindo. The calculated net flood area was 0.95 km2 for the Pindo River and 0.61 km2 for the Puyo River. Finally, it has been identified that the areas of possible flooding would affect populated sectors such as the Shell dam, the Bellavista bridge, the Las Palmas neighborhood and the El Obrero neighborhood, among the main ones.

Keywords*:* Inundation, flow, HEC-RAS, HEC-HMS.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas dentro de la provincia de Pastaza, se han presentado múltiples eventos de inundaciones reportadas a lo largo de los cauces de los ríos Pindo y Puyo, ocasionando daños y pérdidas económicas, sociales y estructurales. En la mayoría de estos eventos se desconoce el alcance del área que puede verse afectada tras este fenómeno poniendo en riesgo no solamente la calidad de vida de la población en cuanto al desarrollo de sus actividades económicas y sociales, sino su seguridad. De ahí que, Mora y Ochoa (2016) afirmaron lo siguiente:

El recurso hídrico, es esencial para todos los seres vivos y su dinámica se convierte en una fuerza importante que nos ofrece constantemente grandes beneficios, aunque existen momentos y sitios en los cuales se pueden generar inundaciones con impactos adversos que traen como consecuencias pérdidas económicas, ambientales y sociales en las poblaciones

ubicadas próximas a los ríos. Estos fenómenos climáticos son un factor principal en la modelación y continua transformación de la superficie terrestre, estos dependiendo de cada región afectan de manera diferente y traen consecuencias nefastas en el desarrollo de una localidad según su intensidad y duración. Las inundaciones son uno de los riesgos naturales que producen mayor número de pérdidas tanto humanas como materiales. (p.11)

Dentro de los aspectos importantes a considerar en el desarrollo de un modelamiento de inundaciones están la estimación de caudales, números de curva, lluvia de diseño y el modelamiento mismo a través de los softwares de HEC-RAS (Hydrologic Engineeering Center, 2022), HEC-HMS (Hydrologic Engineeering Center, 2019) y ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, 2016).

Cada uno de estos parámetros articulados y procesados en el software pertinente, permiten estimar y estructurar un modelamiento de inundación de una zona determinada.

Una de las herramientas más importantes de las antes mencionadas es el modelamiento a través del programa HEC-RAS, mismo que permite determinar el nivel de agua a través de la simulación de flujos en determinados afluentes. Este software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos es uno de los modelos más utilizados a nivel mundial para estudios hidráulicos de flujo uniforme, unidimensional y permanente, su popularidad se debe a su flexibilidad en la creación de escenarios hidráulicos, a su rapidez en los cálculos, su fácil manejo y operación. (Mora y Ochoa, 2016, p. 21)

Actualmente no se cuenta con información actualizada de estos afluentes que permitan desarrollar una Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial pertinente. El objetivo del presente trabajo fue determinar las zonas de riesgo de inundación en los ramales Pindo y Puyo para identificar que sectores urbanos y rurales se podrían ver afectados a periodos de retorno de 100 años en el peor de los eventos de precipitación extrema.

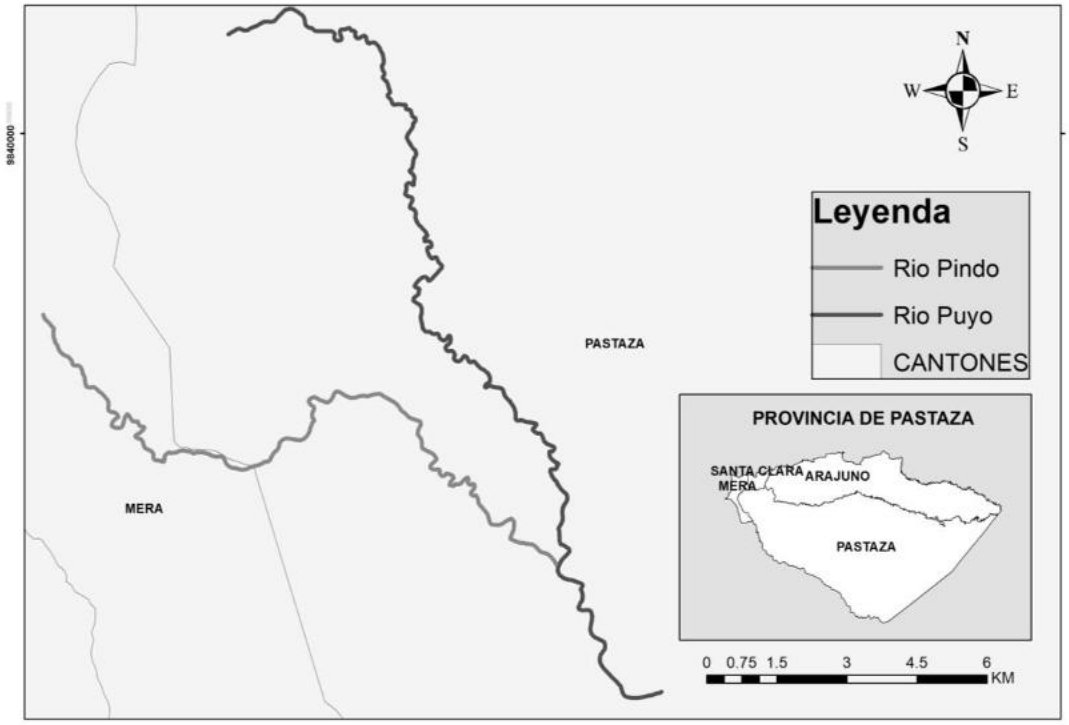
2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

2.1 Localización

El área de estudio comprende las zonas que atraviesan los afluentes del río Pindo y del río Puyo, mismos mantienen su curso activo por sectores rurales como las parroquias Shell

y Tarqui, dentro del cantón Mera y también zonas urbanas en el cantón Pastaza como la ciudad de Puyo (Figura 1).

Figura 1. Localización de los afluentes de la zona de estudio.



Fuente: autor.

2.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación usado fue descriptivo e histórico documental y su enfoque netamente cuantitativo de acuerdo con todos los valores y variables que se han manejado durante el estudio.

Para el presente trabajo de investigación, se tomó como referencia los trabajos realizados por Abril et al. 2019 para el río Pindo; Mejía, 2013 para el río Motolo; Valle & Vargas, 2018 e Illanes & Paucar, 2019 para el río Plata; Soria, 2015 y Acan & Acosta, 2021 para el río Salome; Paredes, 2021 para el río Pindo Chico; Alvarado & Apolo, 2019 para el río Puyo; Huatatoca & Chanaluisa, 2019 para el río Pambay y Abril et al. 2021, para el río Churuyaco, Paico y Sandalias. De los cuales se obtuvieron los datos de los caudales presentes en los diferentes afluentes y tributarios del río Puyo y río Pindo, así como los respectivos números de curva.

Se identificaron los puntos donde se realizaron los monitoreos en estos estudios y a través del programa ArcGIS utilizando modelos digitales de terreno obtenidos del sitio Sig. Tierras (Ministerio de Agricultura y Ganadería 2022) se determinaron las características morfológicas como área de recarga, longitud del curso principal y curvas de nivel de las zonas de recarga de cada uno de los afluentes.

En función de estas características, se determinó el tiempo de concentración a través de la ecuación de Kirpich (ecuación 1).

$$T = 0{,}02L^{0{,}77}S^{-0{,}385} \quad (1)$$

Dónde:
T= tiempo de concentración (minutos)
L= longitud máxima a la salida (m)
S= pendiente media del lecho (m/m)

Se utilizaron los datos de la estación meteorológica Pindo Mirador (Abril, et al. 2019) para los cursos hídricos Pindo Parte Alta, y Motolo, considerando el mayor evento registrado, correspondiente al 30 de diciembre del año 2016. Para los cursos hídricos Plata, Pindo Chico, Salome y todos los del ramal Puyo se utilizaron los datos reportados de la estación meteorológica Puyo (Guachamin, et al. 2019) para lo cual se determinó la lluvia de proyecto (Martínez, 2006) a través de curvas de intensidad, duración y frecuencia proyectadas a 100 años.

Con esta información se generó el modelo de crecida a través del programa HEC-HMS. Por otro lado, con los caudales máximos registrados en los modelos se determinaron las zonas de inundación a través del programa HEC-RAS. Una vez obtenidas las áreas de inundación, se las proyectó en el programa ArcGIS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características de la morfología, caudales y numero de curva de los afluentes y curso principal se muestran en la tabla 1, donde la principal área de recarga para el afluente Pindo

se encuentra en su parte alta y del afluente Puyo corresponde al curso Churuyaco. De la misma manera, el mayor tiempo de concentración en horas en el ramal Pindo corresponde a su parte alta mientras que en ramal Puyo corresponde al afluente Churuyaco.

Por otro lado, se puede observar los caudales máximos obtenidos con el modelamiento a través del software HEC-HMS en cada afluente del ramal Pindo (Tabla 2) y del ramal Puyo (Tabla 3). En este sentido, para el río Pindo se identifica el caudal máximo de crecida en la parte alta del afluente Pindo y de la misma forma el caudal máximo de crecida identificado para el ramal Puyo es en su parte alta. Además, en las figuras 2 y 3, se puede observar el área de recarga de todos los fluentes del ramal Pindo y del ramal Puyo respectivamente de acuerdo con la geografía de la zona de estudio.

Tabla 1. Características, morfología, numero de curva y caudal de los afluentes y cursos principales.

Río	Afluente	Caudal inicial (m^3/s)	Número de curva	Área de recarga (km^2)	Tiempo de concentración (horas)
Pindo	Pindo parte alta	0.75	36	12	0.96
	Motolo	0.4	36	1.47	0.82
	Plata	3.7	36	1.6	0.38
	Pindo Chico	2.7	36	6.1	0.74
	Salome	2.3	36	0.8	0.49
Puyo	Puyo parte alta	12.9	68	31.2	1.87
	Churuyaco	2	56	55.16	3.17
	Pambay	3.5	56	10.5	0.91
	Paico	0.7	68	14.6	2.64
	Sandalias	1.17	68	31.8	2.23

Fuente: autor.

Tabla 2. Caudales máximos de crecida de los afluentes del ramal Pindo con sus intersecciones.

Afluente	Caudal de crecida (m^3/s)	Caudal de salida de la intersección (m^3/s)
Pindo Parte Alta	217	
Motolo	18.38	235.38
Plata	20.01	255.39
Pindo chico	33.2	288.59
Salome	20.9	309.49

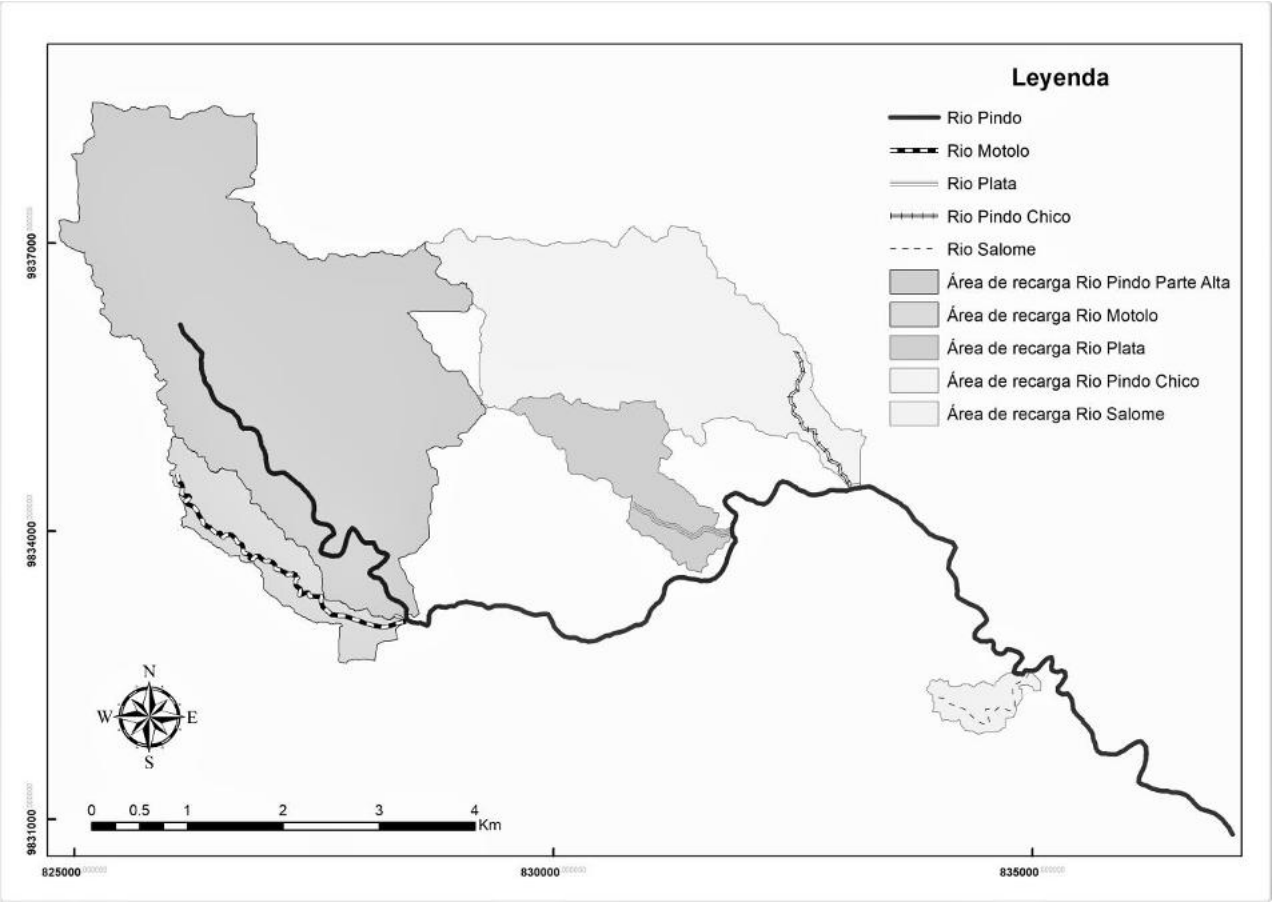
Fuente: autor.

Tabla 3. Caudales máximos de crecida de los afluentes del ramal Puyo con sus intersecciones.

Afluente	Caudal de crecida (m^3/s)	Caudal de salida de la intersección (m^3/s)
Puyo parte alta	59.5	
Churuyaco	24.8	84.3
Pambay	12.4	96.7
Paico	19.6	116.3
Sandalias	47.3	163.6
Pindo	309.49	473.09

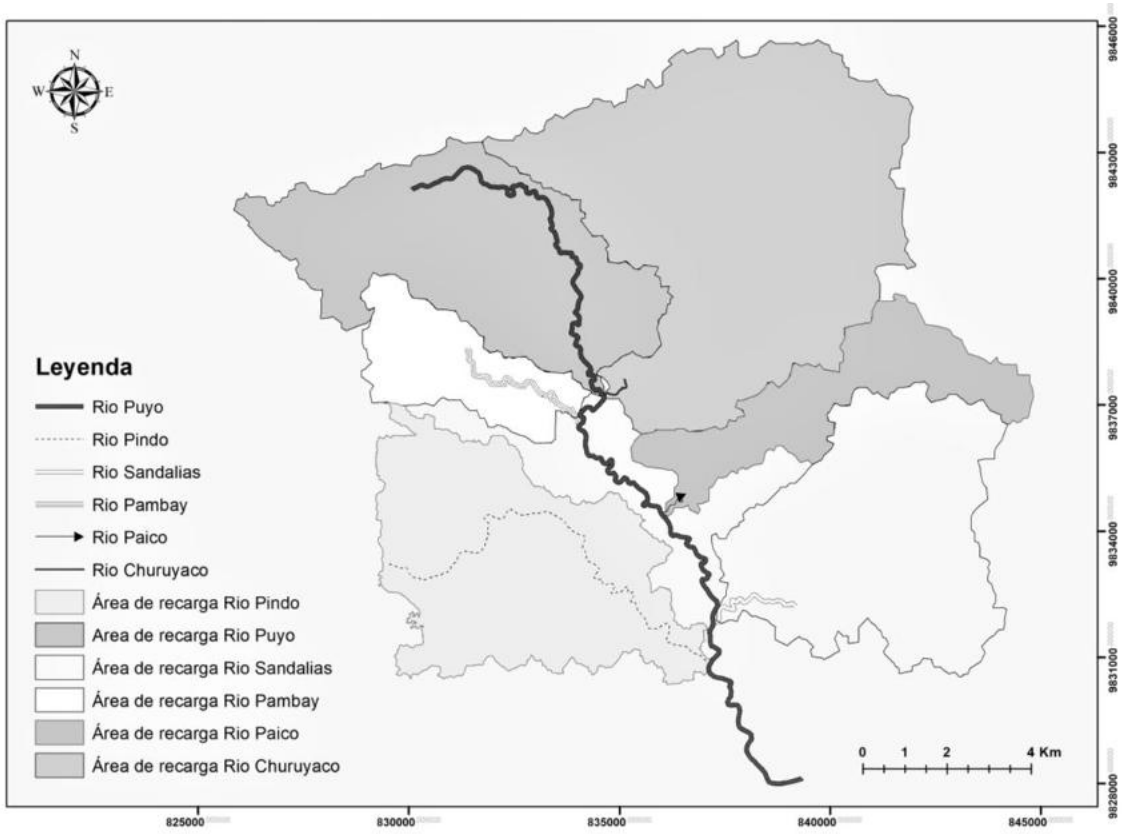
Fuente: autor.

Figura 2. Zonas de recarga de los cursos hídricos del ramal Pindo.



Fuente: autor.

Figura 3. Zonas de recarga de los cursos hídricos del ramal Puyo.

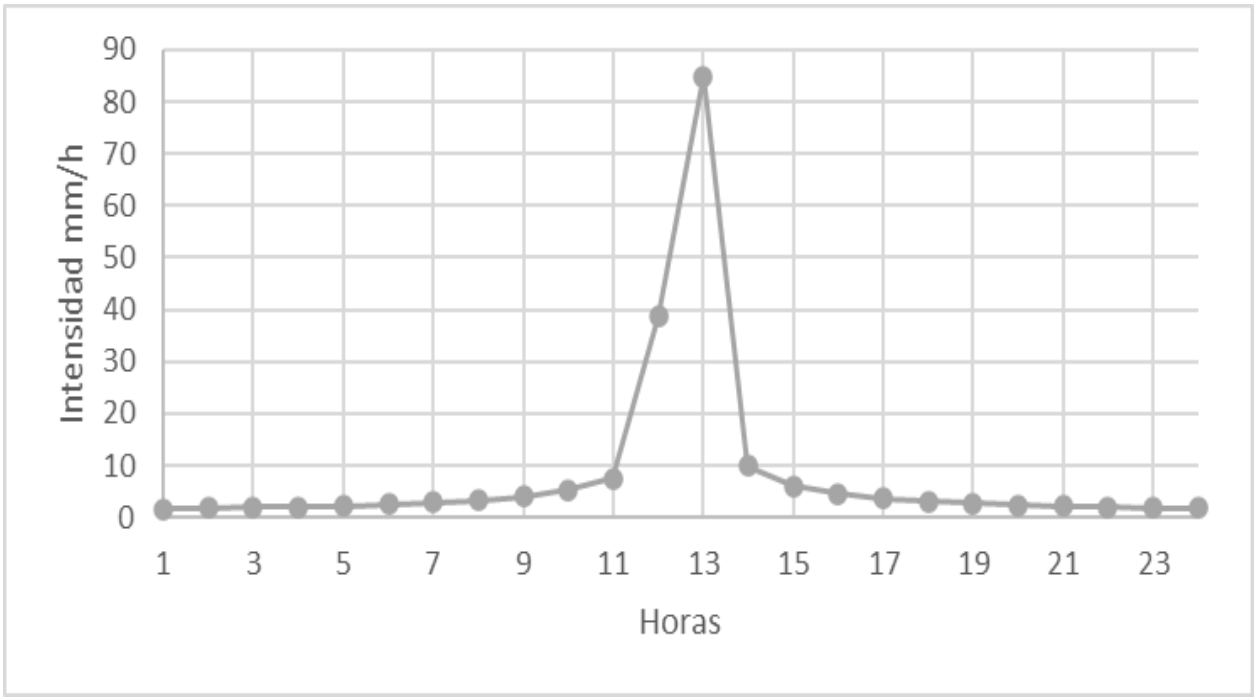


Fuente: autor.

En función de las ecuaciones de la estación Puyo (Guachamin et al. 2019), se estableció la lluvia de proyecto (Figura 4) donde se obtuvo una intensidad máxima de 84.9 mm/h identificado a la una de la tarde aproximadamente. Mientras que en la figura 5, se muestra el hidrograma del Ramal Puyo a la altura de su unión con el afluente Sandalias, obteniendo un caudal máximo de 163.6 m^3/h. y para el ramal Pindo antes de su unión con el Puyo, el caudal máximo estimado es de 309.49 m^3/h.

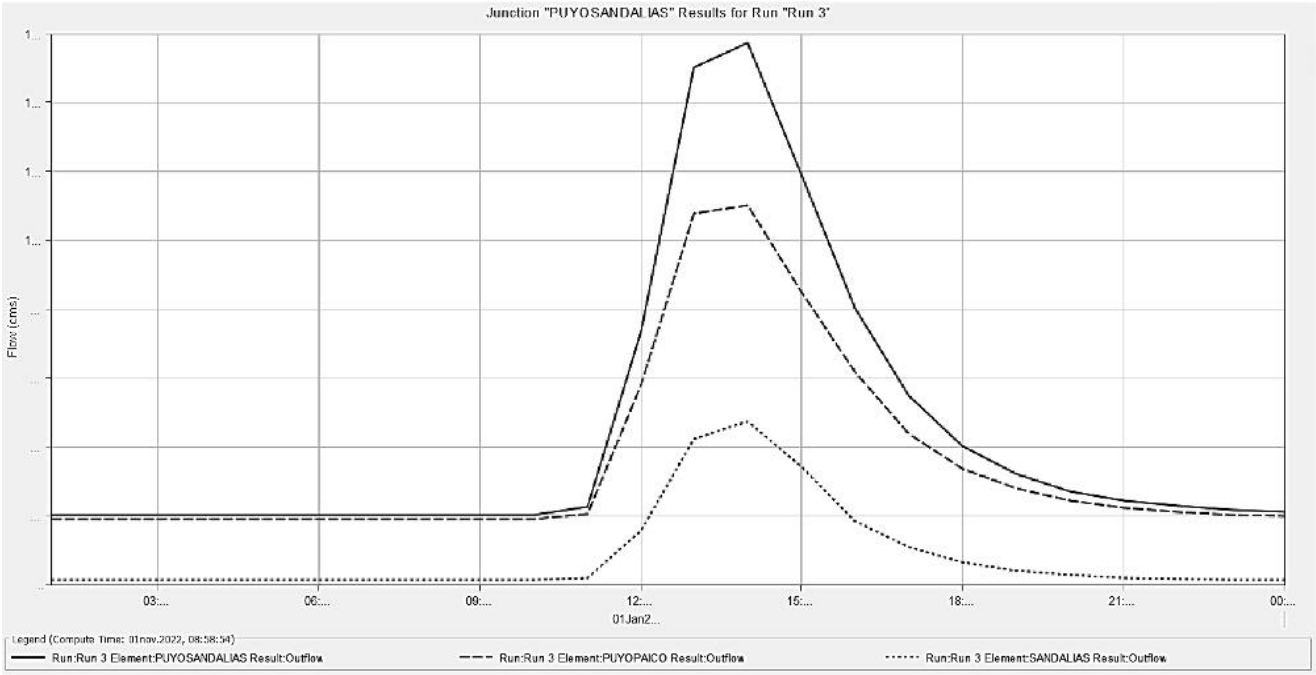
Para el desarrollo de los modelos digitales de elevación, se consideró el análisis desde el punto donde se estimó el caudal de crecida máximo en el afluente Pindo en su parte alta (figura 2), en función de lo cual, se estimó las zonas de posible inundación (Figura 7) dentro del modelo digital de elevación (Figura 6).

Figura 4. Lluvia de proyecto del ramal Puyo.



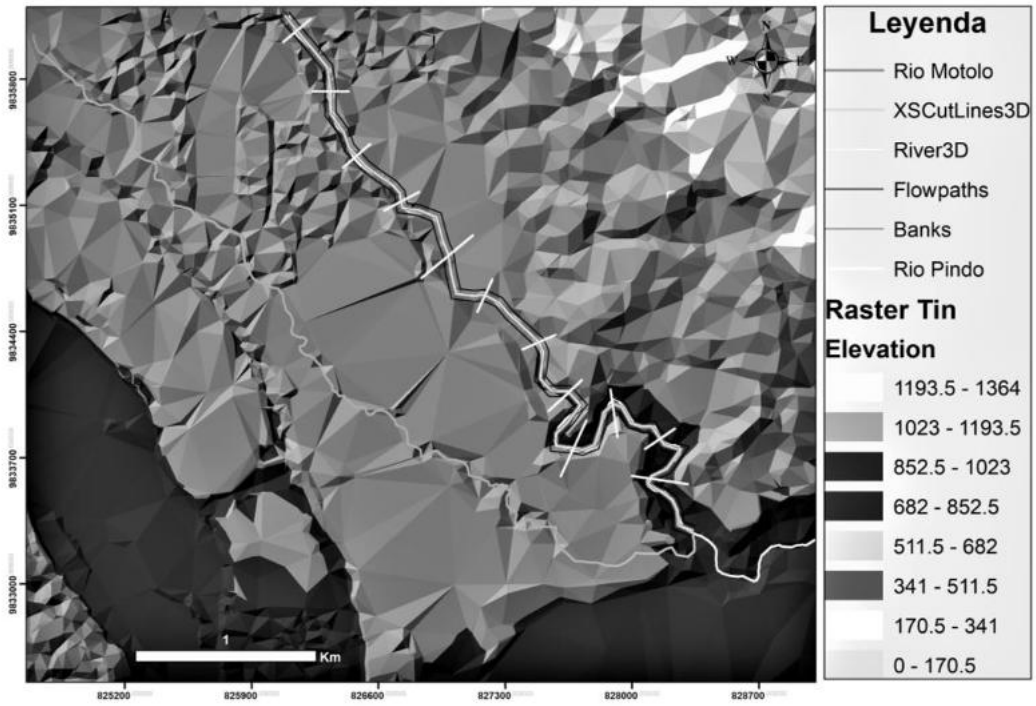
Fuente: autor.

Figura 5 . Hidrograma del Ramal Puyo a la altura de su unión con el afluente Sandalias.



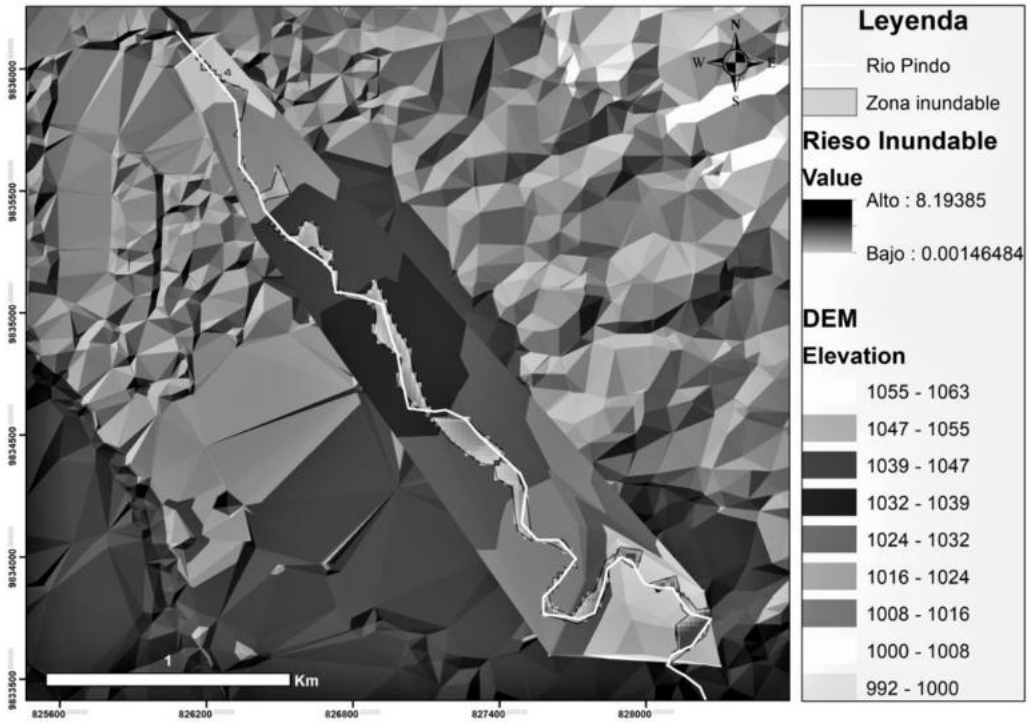
Fuente: autor.

Figura 6. Modelo Digital de Elevación del curso río Pindo.



Fuente: autor.

Figura 7. Modelo de Inundación del río Pindo.

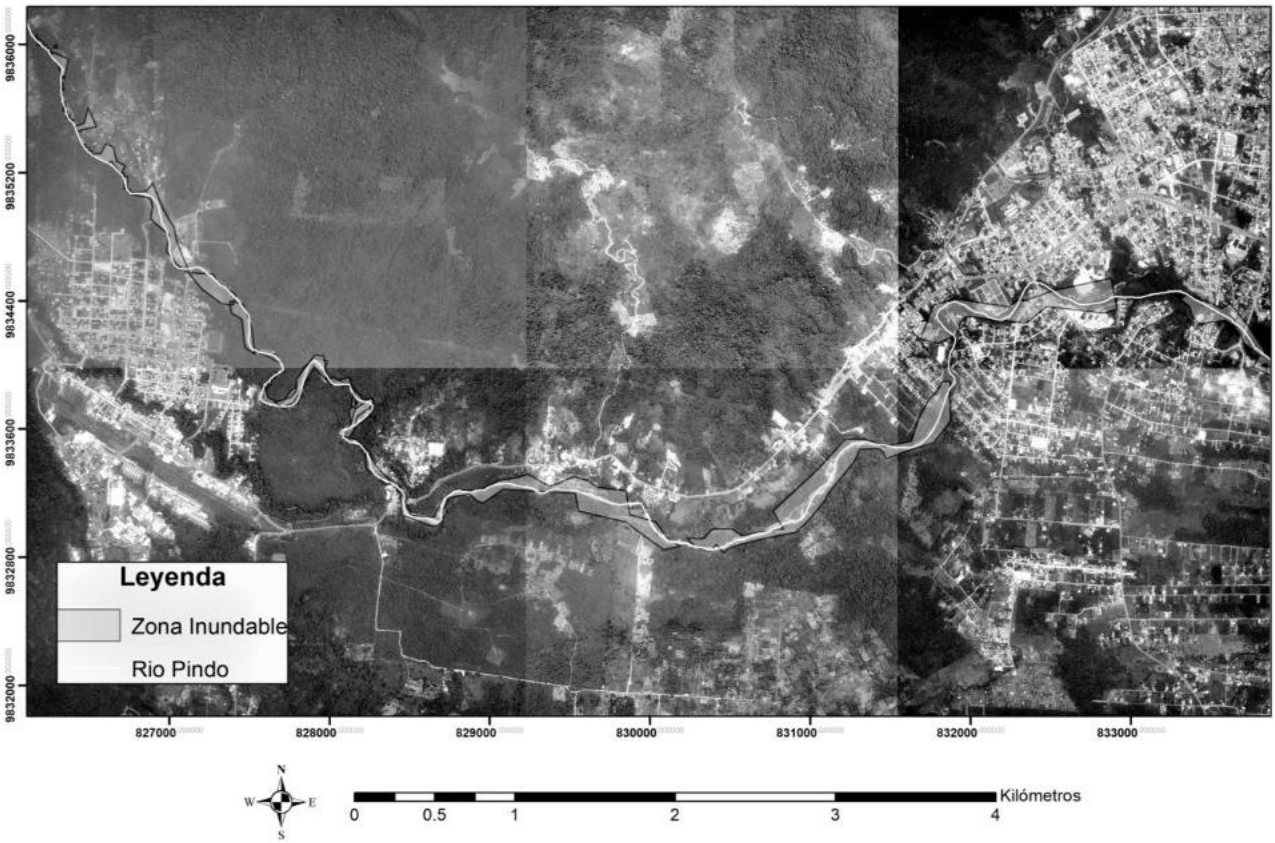


Fuente: autor.

En la figura 8, se puede apreciar la proyección de estas áreas en la imagen satelital, donde se observa la formación de áreas indudables que afectan a sectores poblados como: Sacha Runa, dique de Shell, puente de Bellavista, zonas bajas del sector Santa Rosa y Las Palmas. Mientras que, en la figura 9 correspondiente al mismo ramal se observan posibles áreas inundables en el sector El Recreo en la zona de las viviendas municipales y a la altura del puente de la Comunidad San Jacinto.

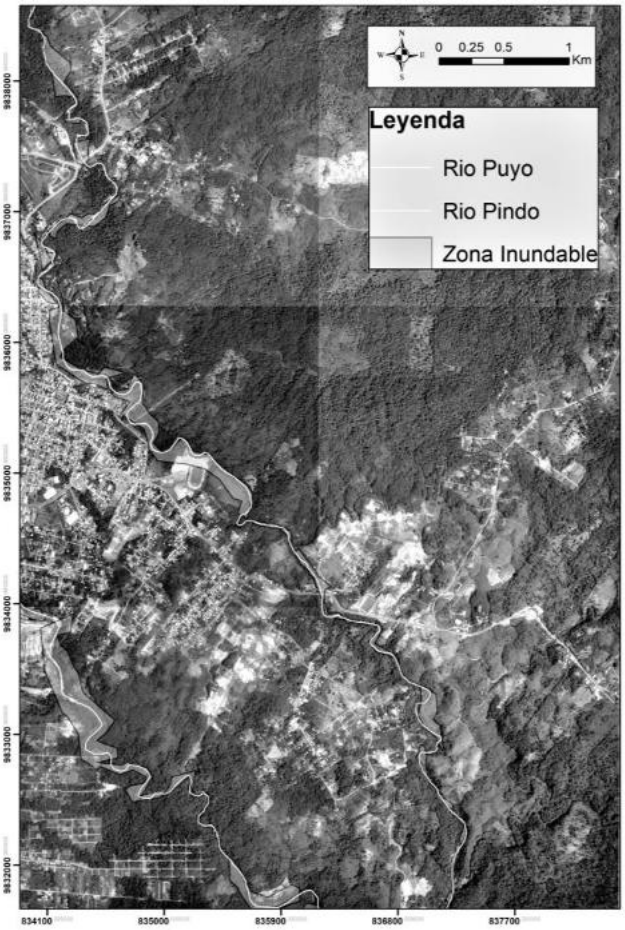
En el ramal Puyo (Figura 9), se observa la formación de zonas de inundación, a la altura del puente del Km 21/2 vía a Napo, en el sector del paseo turístico, barrio el Obrero, La Isla, el estadio Víctor Hugo Georgis y a la altura del puente del Km 2 Vía Puyo- Macas. Posteriormente en la unión de los dos ramales (Figura 10), no se identifican lugares poblados con problemas de posible inundación. El área de inundación neta calculada es de 0.95 km^2 para el río Pindo y 0.61 km^2 para el río Puyo respectivamente.

Figura 8. Zonas inundables del ramal Pindo Tramo 1.



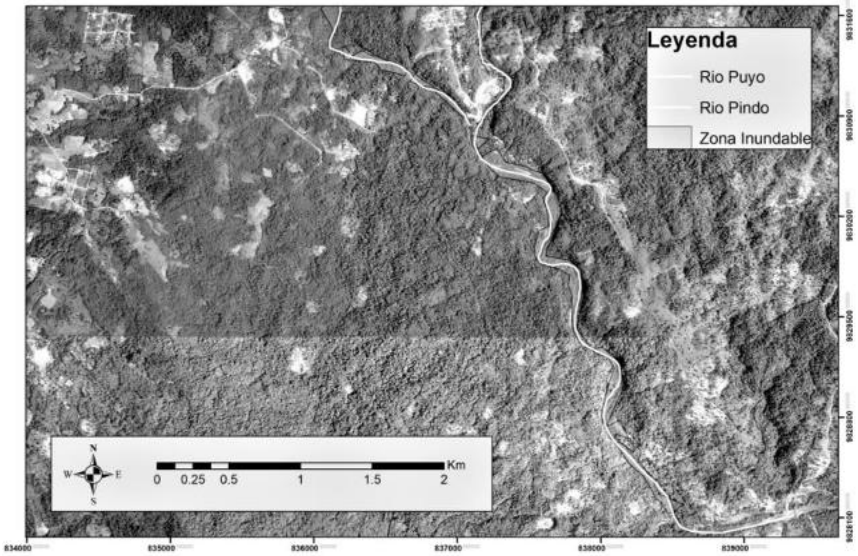
Fuente: autor.

Figura 9. Zonas inundables del ramal Pindo Tramo 2 y del ramal Puyo tramo 1.



Fuente: autor.

Figura 10. Zonas inundables del ramal Pindo Tramo 3 y del ramal Puyo tramo 2.



Fuente: autor.

Discusiones

Para desarrollar un modelamiento de inundación aproximado a la realidad en el peor de los escenarios de precipitación, es importante el uso de un software capaz de considerar las características y geomorfología de la zona de manera precisa. HEC-RAS usado en el presente trabajo de investigación fue también empleado en el trabajo presentado por Orellana (2021), mismo que se desarrolló en el departamento de Piura en Perú y destaca la posibilidad del programa de calcular perfiles de flujo, considerando flujo unidimensional.

Los resultados de una simulación de inundación permiten observar la altura y velocidad de la lámina de agua en una gráfica de perfil de todo el tramo modelado, además de la extensión de la inundación a través de un ploteo de las secciones en 3D. El modelamiento se puede realizar con flujo permanente y flujo no permanente gradualmente variado (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). El primero está basado en la ecuación de energía unidimensional, mientras que el segundo se fundamenta en la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momento.

Al igual que en la investigación de Galeno (2014), en donde se utilizó el software HEC-RAS para evaluar la vulnerabilidad de las superficies afectadas por crecidas de ciertos tramos del río, con los resultados hidrológicos conseguidos en el presente trabajo es posible elaborar mapas de riesgo de inundaciones de los tramos estudiados.

Por otra parte, en cuanto a la modelación hidráulica de los tramos de los ríos Pindo y Puyo, se utilizaron métodos estadísticos para periodos de retorno al igual que sucede en la investigación presentada por Mora (2016) en el río Chicamocha. Dicho estudio empleó un periodo de retorno de 5, 20, 50 y 100 años para los cálculos de las huellas de inundación respectivas.

En el estudio realizado por Orellana (2021), se tiene conocimiento de que la alta tasa de producción de sedimentos se debe a un incontrolado crecimiento de áreas deforestadas, especialmente en las subcuencas altas. Por otra parte, resulta claro que en un evento extremo los mayores aportes de caudal se producen precisamente en esta zona y que ello también se encuentra estrechamente relacionado con los altos índices del número de curva.

(p.91). De la misma manera en el presente estudio se ha identificado que los máximos caudales de crecidas se presentan en las partes altas de los afluentes que están claramente influenciados por las actividades antropológicas realizadas por los moradores del sector que deforestan amplias zonas cercanas a los afluentes.

En los resultados de investigación presentados por Carpio (2018), se determina la zona inundable para el río Catarama sobre modelos digitales de terreno generados a partir de la información brindada por la plataforma Sig Tierras en el año 2018 y se emplea la misma metodología. Además, el modelo digital de terreno se asemeja al utilizado en esta investigación en cuanto a la altitud de terreno, sin embargo, la zona inundable de este estudio es inferior por mucho a la del estudio de Carpio que indica zonas inundables superiores a 200 ha^2.

4. CONCLUSIONES

La principal área de recarga del ramal Pindo se encuentra en su parte alta, mientras que la del ramal Puyo corresponde al afluente Churuyaco, por lo cual su tiempo de concentración es proporcional. De la misma manera, sus caudales máximos de crecida registrados para ambos son en su parte alta, con 217 m^3/s y 59.5 m^3/s para los ríos Pindo y Puyo respectivamente.

El caudal máximo de crecida acumulado en el río Pindo desde su parte alta hasta el río Salome con desembocadura en el río Puyo es de 309.49 m^3/s mientras que el caudal máximo de crecida acumulado desde la parte alta del río Puyo hasta el río Sandalias previo a su unión con el Pindo es de 163.6 m^3/s. Una vez dada la unión de estos se estima un caudal de crecida máximo acumulado de 473.09 m^3/s que se mantiene hasta el próximo afluente que tenga su desembocadura en el ramal Puyo.

Las áreas netas de inundación calculadas con estos caudales son de 0.95 km^2 para el río Pindo y de 0.61 km^2 para el río Puyo. Dichas áreas de posible inundación afectan a zonas urbanas principales a lo largo de su cauce como el dique de Shell, puente de Bellavista, barrio Las Palmas y barrio Obrero, mismos que ya se han visto previamente afectados en eventos meteorológicos pasados.

REFERENCIAS

Abril Saltos, R. V., Rodríguez Badillo, L. M., Sucoshañay Villalba, D. J., & Bucaram Visuma, E. M. (2017). Caracterización preliminar de calidad de aguas en subcuenca media del río Puyo. *Ingeniería hidraúlica y ambiental*, *38*(2), 59-72.

Abril Saltos, R.V., Armas-Chugcho, P. A., Chamorro, W. P., Toscano-Salazar, V. E., Sucoshañay-Villalva, D. J., & Ríos-Rodríguez, F. A. (2021). Calidad de agua del río Puyo y afluentes, Pastaza, Ecuador. *Tecnología y ciencias del agua*, *12*(3), 379-417.

Abril, R., Yanez, Y., Villarroel, C., Idrovo, I., Caicedo, E., Vargas, M., ... & Valle, M. (2019). Influence of land use and geomorphology on the flow of the Pindo river, Ecuador. *Journal of Environmental Hydrology*, *27*, 1-14.

Acan Guamán, S. y Acosta Hurtado, F. (2021). *Modelamiento de inundaciones en el tributario Salomé parroquia Tarqui*. Universidad Estatal Amazónica.

Álvarado Carrasco, O. F., & Apolo Echeverría, A. O. (2019). *Caracterización hidrológica y geomorfológica de la subcuenca del Río Puyo en el tramo Fátima-Sector puente Km 2 1/2 vía Puyo* (Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Universidad Estatal Amazónica).

Aparicio F, Fundamentos de la hidrología de superficie. México D.F., ME: Editorial Limusa; 304 p (2015).

Bladé i Castellet, E., Sánchez Juny, M., Sánchez Tueros, H. P., Niñerola Chifoni, D., & Gómez Valentín, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable: una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Edicions UPC.

Campos, D. (1984). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí: UASLP.

Carpio Rugel, A. A. (2018). *Generación del Modelo de Áreas de Inundación del Río Catarama mediante el uso de los softwares HEC-RAS Y ARC-GIS* (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniería Civil.).

Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos (No. 627.13 C552h). Bogotá, CO: McGrawHill.

Diaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 452-470.

Duque-Sarango, Paola, Patiño, Daysi M., & López, Xavier E.. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información tecnológica*, *30*(6), 351-362. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351

Environmental Systems Research Institute, (2016). ArcGIS Dekstop 10.5 [*software*]. https://www.esri.com/en-us/home

Espinales Cedeño, F. R., Alulema del Salto, R. A., & Caicedo Toro, M. D. (2021). Determinación del Número de Curva (CN) de la cuenca del Río Portoviejo. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, *8*(SPE2).

Galeno, C. H. (2018). Modelación de áreas de afectación por desbordamiento de ríos en zonas de transición fluvial. Caso del río La Antigua, Veracruz.

Garcia, M. L., Basile, P. A., & Riccardi, G. A. (2011). Estudio de registros de caudales y niveles hidrométricos para grandes crecidas sobre tramo del río Paraná. In *Actas del XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, Argentina* (pp. 88-108).

Guachamin, W., García, F., Arteaga, M., Cadena,J. (2019). Determinación de ecuaciones para el cálculo de Intensidades máximas de precipitación, Instituto Nacional de Meteorologia e Hidrología. Obtenido de: https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FINAL.pdf

Guerrero Coronel, F. R. (2018). *Evaluación y análisis de la intensidad de lluvia de diseño influenciada por oscilaciones decadales de precipitación mediante la determinación de una metodología de cálculo para la cuenca del río Paute* (Bachelor's thesis). Retrieved from http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31528

Huatatoca Chimbo, J. L., & Chanaluisa Chiliquinga, W. O. (2019). *Análisis geomorfológico de la subcuenca del Río Pambay para determinar las zonas vulnerables e inundaciones mediante el modelamiento hidrológico* (Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Universidad Estatal Amazónica).

Hydrologic Engineeering Center, (2022). River Analysis System. [*software*] U.S: Army Corps of Engineers. www.hec.usace.armi.mil

Hydrologic Engineeering Center, (2019). Hidrologic Modeling System. [*software*] U.S: Army Corps of Engineers. www.hec.usace.armi.mil

Illanes Cerda, I. y Paucar Paucar, M. (2019). Caracterización edafológica, hidrológica y geomorfológica de la zona de recarga del Rio Plata, Barrio Las Palmas, Cantón Pastaza.

Jaramillo, G. P., Upegui, J. V., Sánchez, O. J. M., Bonilla, L. C., Arias, M. Z., & Ortiz, C. H. (2002). Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de la curva de recesión de caudales. *Meteorol. Colomb*, *6*, 73-80.

Li, J., Liu, C., Wang, Z., & Liang, K. (2015). Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM. *Journal of Geographical Sciences*, *25*, 311-318.

Martinez, E, (2005) Hidrologia Práctica 2da ed. Colegio de Ingenieros en Caminos, Canales y Puertos.

Mejía Cerda, G. M. (2013). *Diagnóstico del estado actual de la microcuenca del río Motolo y propuesta de plan de manejo en la parroquia Shell, Cantón Mera* (Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental).

Ministerio de Agricultura y Ganadería, (2022). http://www.sigtierras.gob.ec

Mora Mariño, W., & Ochoa Guerrero, R. G. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales-Paz del Rio a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá.

NRCS, "Hydrologic soil groups". (2009). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Natural Resources Conservation Service, Ed. USA: USDA, cap. 7, pp. 1-3.

Orellana Cabello, R. E. (2021). Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS.

Paredes, J. (2021). *Aplicación de Hidrogramas Sintéticos SCS para el modelamiento de crecidas en los ríos Puyo y Pindo*. (Tesis para la obtención del título de Ingeniero

Ambiental, Universidad Estatal Amazónica).

Smakhtin, V. 2001: Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology. 240, 147–186.

Soria Castro, R. I. (2015). *Estudio hidrológico de la calidad de agua de la cuenca media del río Puyo Ramal Salomé* (Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Universidad Estatal Amazónica).

Urrutia, R., y M. Vuille, Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, Journal of Geophysical Research, doi: 10.1029/2008JD011021, 114, D02108 (2009).

Valle Ramírez, M. L., & Vargas Franco, M. G. (2018). *Caracterización geomorfológica de los tributarios Plata y Charaguayacu de la subcuenca del Río Pindo Grande* (Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Universidad Estatal Amazónica).

ANEXOS

Marco Teórico

Estimación de caudales

En general, el caudal de un río es el resultado de procesos naturales complejos que actúan sobre su cuenca de drenaje. En el caso particular de los caudales mínimos se pueden considerar aspectos fundamentales tales como la distribución y características de infiltración de los suelos; las condiciones hidráulicas y extensión de los acuíferos; la tasa, frecuencia y cantidad de la recarga; las tasas de evapotranspiración en la cuenca; la distribución y los tipos de vegetación; la interceptación; la topografía y el clima entre otros (Smakhtin, 2001).

De otro lado, cuando no se tienen cuencas instrumentadas se debe recurrir a otros métodos que permitan conocer, de manera aproximada, el valor del caudal mínimo en un punto determinado. Estos métodos pueden ser clasificados en diferentes grupos como por ejemplo: (i) los que apuntan a la estimación de ciertos índices, tales como la media o cuantiles específicos a partir de técnicas de regionalización, involucrando parámetros geomorfológicos (área, pendiente de la cuenca y/o canal, densidad de drenaje, etc.), fisiográficos (porcentaje de lagos y zonas boscosas), climáticos (precipitación y evaporación) e hidrológicos; (ii) métodos gráficos (construcción de curvas regionales); (iii) técnicas de interpolación espacial y (iv) los que permiten estimar ciertas características del caudal mínimo a partir de series sintéticas de caudal. Estos últimos requieren la aplicación de métodos de simulación que buscan la generación de series continuas de caudal en uno o varios sitios de una cuenca, que eventualmente pueden ser utilizados en métodos que requieran mayor cantidad de información (Jaramillo, 2002).

Número de curva

En 1972, el Soil Conservation Service (SCS) (Li., Lui., Wang & Liang, 2015), actualmente llamado Servicio de Conservación de los Recursos Naturales desarrolló un parámetro empírico llamado el número de curva (CN). El método determina la escorrentía potencial a través del conocimiento de características físicas de la cuenca tales como la densidad, el tipo y tratamiento de las coberturas del suelo y su grupo hidrológico (Díaz &Mercado, 2017).

El CN se estima a partir de la combinación de la cobertura del suelo y el grupo hidrológico del suelo (HSG) área en estudio, el cual se clasifica en los siguientes grupos (NRCS, 2009):

• Grupo A: Aquellos suelos en los cuales su composición predominan las partículas arenosas, lo que permite que el agua se percole fácilmente y deriva en un bajo nivel de escorrentía cuando se encuentran húmedos (>77 mm/hora).

• Grupo B: En este grupo entran los suelos cuyas partículas son moderadamente gruesas a moderadamente finas. Se consideran suelos con una capacidad de escorrentía efectiva moderadamente baja cuando se encuentran húmedos (76-78 mm/hora).

• Grupo C: Suelos en los que en su composición predominan partículas moderadamente finas a finas. Se caracterizan por tener un potencial de escorrentía moderadamente alto (36-13 mm/hora).

• Grupo D: Aquellos suelos cuyas partículas son mayoritariamente finas (texturas arcillosas) en donde la tasa de infiltración es baja. Tienen un potencial de escorrentía alto (< 13 mm/hora).

Cabe recalcar, que en cuencas donde los tipos de uso de suelo varían dentro del área de esta se puede calcular un CN compuesto considerando el porcentaje de incidencia en la cuenca de acuerdo con el uso de tierra (Chow, 1994).

Lluvia de diseño

La lluvia de diseño se refiere principalmente a un posible evento en el cual la precipitación se presenta de forma intensa. Para lo cual es posible estimar de manera aproximada la duración y recurrencia de la mismo con el fin de prever y proponer medidas de planificación o contingencia en una zona determinada. De la misma manera, sirve de soporte para la estructuración de diversos planes de desarrollo y ordenamiento territorial en diferentes zonas.

La metodología utilizada para la obtención de lluvias d diseño dependen de la amplitud de los registros y del periodo de retorno deseado. Para registros con amplitud menor a 10 años se utilizan series de duraciones parciales. Por otro lado, si los registros son mayores a 10 años el método a utilizar depende del periodo de retorno del evento a calcular (Campos,

1984).

Si el periodo de retorno es menor a 10 años se utilizan series de excedencias anuales. En caso de ser mayor a 10 años se procede a utilizar series de máximos anuales. Posteriormente se usa el criterio de interpolación si el periodo de retorno es menor al número de años registrados. En caso de que el periodo de retorno sea mayor al número de años registrados se utilizan distribuciones de probabilidad como criterio de extrapolación (Campos, 1984).

Modelamiento con HEC-RAS

La modelación numérica del flujo en lámina libre es una herramienta cada vez más utilizada y con un creciente abanico de posibles aplicaciones. HEC-RAS es un modelo numérico en continuo desarrollo, aplicable en el ámbito de la ingeniería hidráulica y fluvial, con una gran aceptación por parte de la administración pública. Mediante la aplicación del modelo a casos reales, se presentan las bases teóricas esenciales (conceptos de régimen lento, régimen rápido, resalto, etc.), el funcionamiento general del programa (elaboración de un proyecto, creación de geometrías, gestión de planes, etc.), los aspectos clave a considerar en su ejecución (establecimiento de las condiciones de contorno, espaciamiento entre secciones, rugosidad, etc.), al tiempo que se trabaja también con elementos singulares (puentes, encauzamientos, pasos entubados bajo vía, etc.) (Bladé i Castellet, 2009).

Modelamiento con HEC-HMS

El centro de Ingeniería Hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, diseñó el programa de computación Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS), este provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y también tránsito de caudales entre otros (Urrutia, 2009).

El programa realiza la simulación del hidrograma de una cuenca facilitándole datos físicos de la misma y con ello estima los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) partiendo de condiciones extremas de tormentas. También calcula, por los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, las pérdidas por infiltración, el flujo base y la conversión en escorrentía directa.

Las fases de trabajo que realiza el programa son las siguientes: Separación de la lluvia neta (calcular qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa), calcular la escorrentía directa producida por esa precipitación neta, sumar a la escorrentía directa la escorrentía básica, si existía previamente y calcular cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o a través de un depósito o embalse (tránsito de hidrogramas). Al final suma todos los caudales generados y transitados al largo del recorrido y nos proporciona (en tabla y en gráfico) el hidrograma en la salida de la cuenca (Aparicio et al, 2015).