



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño hidrológico y tránsito de avenidas para el río San Pedro

Borja Sacheri, Francisco Javier y Paredes Ríos, Abel Alexander

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Masabanda Caisaguano, Marco Vinicio Ph.D

30 Agosto de 2023



Plagiarism report

MIC_BORJA_PAREDES_copyfinal.docx

Scan details

Scan time:
August 22th, 2023 at 21:16 UTC

Total Pages:
48

Total Words:
11961

Plagiarism Detection



Types of plagiarism	Percentage	Words
Identical	3.2%	385
Minor Changes	1.1%	129
Paraphrased	4.7%	568
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

Plagiarism Results: (49)

Fisiografía | Drupal

<http://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/pampas/f>

Pasar al contenido principal ...

0.8%

Fisiografía | Drupal

<https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/pampas/f>

Pasar al contenido principal ...

0.8%

Informe de la Cuenca de Nepeña

<https://es.slideshare.net/angeloalvarezsifuentes/informe-de-...>

Inicio Explorar Enviar búsqueda Cargar Iniciar sesión Registrarse Informe de la Cuenca de Nepeña Denunciar Angelo Alvarez Sifuent...

0.7%



Revisado por:

Ing. Masabanda Caisaguano Marco Vinicio PhD.

C.C. 1802179190

Certified by
Copyleaks

About this report
help.copyleaks.com

copyleaks.com



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular, "**Diseño hidrológico y tránsito de avenidas para el río San Pedro**" fue realizado por los señores **Borja Sacheri Francisco Javier** y **Paredes Ríos Abel Alexander**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2023



Ing. Masabanda Caisaguano, Marco Vinicio Msc.

C.C.: 1802179190



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Borja Sacheri Francisco Javier** y **Paredes Ríos Abel Alexander**, con cédulas de ciudadanía N°1724413867 y N°1723461453, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular "**Diseño hidrológico y tránsito de avenidas para el río San Pedro**" es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2023

Borja Sacheri Francisco Javier

C.C.: 1724413867

Paredes Ríos Abel Alexander

C.C.: 1723461453



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Autorización de Publicación

Nosotros, **Borja Sacheri Francisco Javier** y **Paredes Ríos Abel Alexander**, con cédulas de ciudadanía N°1724413867 y N°1723461453, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular "**Diseño hidrológico y tránsito de avenidas para el río San Pedro**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 24 de Agosto del 2023

Borja Sacheri Francisco Javier
C.C.: 1724413867

Paredes Ríos Abel Alexander
C.C.: 1723461453

Dedicatoria

A toda mi familia...

Alexander Paredes Ríos Abel

A mi amada hija Rafaella,

Eres mi luz constante, mi fuente inagotable de inspiración y mi razón de ser. Cada paso que he dado en este camino académico ha estado guiado por el deseo de construir un mundo mejor para ti y para las generaciones venideras.

Tu sonrisa, tu alegría y tu curiosidad infinita han sido mi motor durante esta travesía. Cada desafío que he superado, cada logro que he alcanzado, ha sido con la esperanza de que algún día puedas mirar hacia atrás y sentirte orgullosa de tu padre.

Esta tesis no es solo un reflejo de mis esfuerzos, sino también un tributo a tu futuro. Que estas palabras grabadas en papel sean un recordatorio constante de que nunca hay límites para lo que puedes lograr. Que siempre persigas tus sueños con pasión y que enfrentes cada obstáculo con valentía.

Rafaella, eres mi mayor logro, mi mayor alegría y mi mayor motivo para seguir adelante. Que esta dedicación sea una expresión eterna de mi amor y admiración hacia ti.

Francisco Javier Borja Sacheri

Agradecimiento

Agradezco profundamente a mi familia por su apoyo inquebrantable. Sus palabras de aliento y comprensión necesaria para concluir este desafío en mi vida, el cual fue realizado por y para ustedes. En especial a mis 3 madres y mis 2 padres.

A mi novia y mejor amiga, compañera de tantos acontecimientos que definieron este CAMINO. Siempre lista para inspirarme y llenarme de motivación con sus palabras de fuerza

A mis hermanos que me han soportado entre estrés y angustia, a mis primos cuya complicidad llevo siempre conmigo y me han demostrado que la felicidad va más allá de éxitos o fracasos.

A mis amigos de toda la vida, que han estado presentes para un consejo o un reproche oportuno, Sebastián Zurita, Williams Llerena, Abigail Encalada, Miguel Cárdenas. A los amigos de proyectos paralelos fundamentales en mi vida: Martín Tobar y Paul Cachiguango. Y una mención para un amigo incondicional cuya compañía ha sido un gran aporte en este sendero, Mauricio de La Torre.

Un agradecimiento eterno a mis compañeros de titulación y amigos de toda la carrera, Francisco Borja, Clara Ortiz y Angélica Almeida, sin duda sus ganas inmensas de superarse en este trabajo fueron el motor que movió este barco aguas arriba.

A las amistades forjadas en el aula virtual y presencial, que formaron parte del proceso difícil, interesante y divertido: Dylan Quiroz, Ricardo Morales, Israel Torres, Miguel Sánchez.

Finalmente, a nuestro Tutor: Ing. Marco Masabanda PhD. Por sus enseñanzas y la oportunidad de formar parte de este proyecto de titulación.

Sr Alexander Paredes Ríos Abel

En el camino hacia la realización de este proyecto académico, han sido invaluable las personas que han brindado su apoyo y aliento. Es un honor expresar mi gratitud a quienes han sido fundamentales en este recorrido.

En primer lugar, quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, Raúl y Paola, por su amor incondicional, guía constante y sacrificios incansables que me han permitido llegar hasta aquí. A mis hermanos, Pablo, Ángelo y Pamela, por ser mi fuente de inspiración y por compartir siempre momentos memorables que han iluminado mi camino.

A mi amada esposa, Cristina, mi compañera de vida, cuyo apoyo inquebrantable y comprensión han sido mi mayor fortaleza. Tu amor y paciencia han sido un faro constante en este proceso, y por ello te estoy eternamente agradecido.

No puedo dejar de mencionar a mis valiosos compañeros de titulación, Clara, Angélica y Abel. Juntos enfrentamos desafíos, celebramos logros y compartimos conocimientos, creando lazos que perdurarán mucho más allá de este proyecto. Su amistad y colaboración han sido un pilar fundamental.

Un agradecimiento especial a nuestro tutor, el Ing. Marco Masabanda, PhD. Su experiencia, orientación y dedicación han sido esenciales para moldear y enriquecer este trabajo.

Francisco Javier Borja Sacheri

Índice de contenidos

Reporte de similitud de contenidos	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	8
Resumen	20
Abstract.....	21
Capítulo I	22
Antecedentes	22
Estado del Arte	23
Planteamiento del problema	24
<i>Macro</i>	24
<i>Meso</i>	25
<i>Micro</i>	26
Justificación del problema	27
Alcance del proyecto	28
Objetivos	28
<i>Objetivo General</i>	28
<i>Objetivos Específicos</i>	29
Hipótesis	29
Capítulo II	30
Marco Teórico	30
Bases teóricas.....	30

<i>Sistema Hidrografico</i>	30
Elementos	30
<i>Cuenca hidrográfica</i>	30
<i>Divisorio de aguas</i>	31
<i>Río principal</i>	31
<i>Características morfológicas</i>	35
<i>Longitud de cauce principal (Lc)</i>	36
<i>Pendiente media del curso principal</i>	36
<i>Pendiente Media del Curso Principal (S)</i>	36
<i>Coeficiente de Compacidad o Gravelius</i>	36
<i>Factor de forma Horton</i>	37
<i>Número de orden de la cuenca</i>	38
<i>Rectángulo Equivalente</i>	39
<i>Densidad de Drenaje</i>	39
<i>Pendiente Media del Ro (Ic)</i>	40
<i>Tiempo de concentracin</i>	41
<i>Frmula Kirpich</i>	42
<i>Frmula Ven T Chow</i>	42
<i>Frmula Giandotti</i>	42
<i>Caudal medio</i>	43
<i>Parámetros de Relieve</i>	43
<i>Escorrentia</i>	44
<i>Formula anonima</i>	44
<i>Keller</i>	45
<i>Duracin (D)</i>	46
<i>Frecuencia</i>	46

<i>Intensidad</i>	46
<i>Obtención curvas Intensidad-Duración-Frecuencia</i>	46
<i>Caudales máximos</i>	48
<i>Hidrograma</i>	48
<i>Numero de curva de la cuenca</i>	50
<i>Caudales máximos</i>	51
<i>Coefficiente de rugosidad</i>	52
<i>Tránsito de avenidas</i>	54
Capítulo III Metodología	56
Ubicación del proyecto	56
<i>Sangolquí</i>	56
<i>Mapa de isotermas</i>	59
<i>Mapa de isoyetas</i>	60
<i>Media Anual</i>	62
<i>Delimitación cuenca</i>	64
<i>Parámetros de la cuenca del rio san pedro</i>	65
<i>Área (A)</i>	66
<i>Perímetro (P)</i>	68
<i>Longitud del cauce principal (L)</i>	69
<i>Criterio de Campos</i>	69
<i>Método ArcGIS</i>	70
<i>Longitud axial (La)</i>	71
<i>Ancho promedio (Ap)</i>	72
<i>Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc)</i>	73
<i>Factor Forma (If)</i>	74
<i>Curva Hipsométrica de la cuenca (Rh)</i>	76

	13
<i>Histograma de frecuencias altimétricas</i>	78
<i>Desnivel Altitudinal</i>	79
<i>Pendiente media del cauce principal (Scp)</i>	79
<i>Pendiente de la Cuenca</i>	80
<i>Número de Orden de los cursos de agua</i>	82
<i>Densidad de Drenaje (Dd)</i>	83
<i>Coefficiente de rugosidad</i>	84
<i>Tiempo de concentración</i>	87
<i>Fórmula Goroshkov (1979)</i>	88
<i>Fórmula de Temez</i>	88
<i>Coefficiente de escorrentía</i>	89
Datos hidrológicos.....	100
<i>Análisis de datos</i>	101
<i>Regresión exponencial</i>	106
<i>Coefficientes de regresión</i>	106
<i>Ecuación Intensidad</i>	107
<i>Intensidad</i>	108
<i>Caudal máximo</i>	109
Capítulo IV	115
Modelación HEC-RAS Y Diseño hidráulico	115
<i>Secciones transversales</i>	115
<i>Creación del proyecto</i>	117
<i>Archivo de geometría</i>	117
<i>Archivo de flujo</i>	119
Resultados	120
Conclusiones y recomendaciones.....	123

Conclusiones.....	123
Recomendaciones.....	124
Referencias.....	126
Apéndices.....	132

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Valores de Areas de cuenca</i>	35
Tabla 2	<i>Coeficiente de compacidad Kc</i>	37
Tabla 3	<i>Valores de factor de forma</i>	38
Tabla 4	<i>Valores del coeficiente K3</i>	44
Tabla 5	<i>Valores de K Método Cowan</i>	45
Tabla 6	<i>Precipitación anual mínimos</i>	63
Tabla 7	<i>Precipitación anual máximo</i>	63
Tabla 8	<i>Precipitación anual promedio</i>	64
Tabla 9	<i>Coeficiente de compacidad (Kc)</i>	74
Tabla 10	<i>Valores interpretativos del Factor de forma</i>	76
Tabla 11	<i>Determinación para las Frecuencias Altimétricas</i>	78
Tabla 12	<i>Clases de desnivel altitudinal (msnm)</i>	79
Tabla 13	<i>Valores interpretativos de la densidad de drenaje</i>	84
Tabla 14	<i>Tabla Resumen tiempo de concentración</i>	89
Tabla 15	<i>Resumen CN</i>	92
Tabla 16	<i>Valores del coeficiente K3</i>	95
Tabla 17	<i>Tabla valores de K</i>	96
Tabla 18	<i>Resumen coeficiente de escorrentía</i>	97
Tabla 19	<i>Resumen parámetros morfológicos e hidrológicos de la cuenca</i>	99
Tabla 20	<i>Datos Estación Izobamba</i>	101
Tabla 21	<i>Valores cálculo distribución de Gumbal</i>	104
Tabla 22	<i>Constantes ecuación de intensidad</i>	107
Tabla 23	<i>Intensidad para tiempo de concentración y diferentes tiempos de retorno</i>	109
Tabla 24	<i>Resumen Caudales Máximos</i>	112

Tabla 25	<i>Valores hidrograma</i>	113
Tabla 26	<i>Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno</i>	119

Índice de figuras

Figura 1	<i>Divisorio de aguas.....</i>	31
Figura 2	<i>Área de drenaje en una cuenca.....</i>	33
Figura 3	<i>Número de orden según diferentes autores.....</i>	39
Figura 4	<i>Hidrograma unitario triangular</i>	49
Figura 5	<i>Hidrograma trapecial.....</i>	50
Figura 6	<i>Número de Curva.....</i>	51
Figura 7	<i>Valores del coeficiente de rugosidad según ven te Chow.....</i>	53
Figura 8	<i>Ubicación cantón Rumiñahui.....</i>	56
Figura 9	<i>Mapa Cuenca hidrografica delimitada</i>	57
Figura 10	<i>Precipitación en Sangolquí.....</i>	58
Figura 11	<i>Temperatura en Sangolquí.....</i>	59
Figura 12	<i>Mapa de isotermas</i>	60
Figura 13	<i>Mapa de isoyetas.....</i>	61
Figura 14	<i>Cuenca hidrográfica delimitada e Isoyetas.....</i>	62
Figura 15	<i>Divisoria de aguas o divortium Aquarium</i>	64
Figura 16	<i>Divisoria de aguas</i>	65
Figura 17	<i>Partes de una cuenca.....</i>	65
Figura 18	<i>Modelo Digital de Elevación (MDE).....</i>	67
Figura 19	<i>Tabla propiedades de la Cuenca del Rio San Pedro (Área).....</i>	68
Figura 20	<i>Tabla propiedades de la Cuenca del Rio San Pedro (Perimetro).....</i>	69
Figura 21	<i>Modelo de la cuenca ArcGIS.....</i>	70
Figura 22	<i>Tabla propiedades del Cauce Principal del Rio San Pedro.....</i>	70
Figura 23	<i>Longitud Axial de la cuenca del rio San Pedro.</i>	71
Figura 24	<i>Longitud Axial de la cuenca del rio San Pedro</i>	72

Figura 25	<i>Factor de forma</i>	75
Figura 26	<i>Curvas de cuencas con potenciales evolutivos distintos.</i>	77
Figura 27	<i>Curva Hipsométrica de la Cuenca.</i>	77
Figura 28	<i>Mapa de pendientes media de la Cuenca</i>	81
Figura 29	<i>Pendiente media de la cuenca (%)</i>	81
Figura 30	<i>Mapa del orden de los Recursos de Agua.</i>	82
Figura 31	<i>Valores de N para coeficiente de rugosidad</i>	85
Figura 32	<i>Coeficiente de rugosidad Ve Ten Chow</i>	86
Figura 33	<i>Tabla resumen tipo de cobertura.</i>	91
Figura 34	<i>Resumen precipitación máxima Abril</i>	94
Figura 35	<i>Mapa de estaciones meteorológicas (INAMHI 2023)</i>	100
Figura 36	<i>Precipitaciones máxima y promedio (1962-2021)</i>	102
Figura 37	<i>Precipitaciones máximas y desviación estándar (1962-2021)</i>	102
Figura 38	<i>Valor V crítico en su rango de alfa.</i>	103
Figura 39	<i>Precipitación máxima corregida para cada periodo de retorno.</i>	105
Figura 40	<i>Precipitación máxima Pd por tiempos de duración.</i>	105
Figura 41	<i>Intensidad de lluvia según el tiempo de retorno</i>	106
Figura 42	<i>Regresión exponencial I-D-T para un periodo de retorno= 100 años</i>	106
Figura 43	<i>Curvas IDF obtenidas para diferentes tiempos de retorno</i>	108
Figura 44	<i>Intensidades – Duración -Frecuencia.</i>	108
Figura 45	<i>Hidrograma unitario triangular obtenido</i>	114
Figura 46	<i>Fotografía de la sección transversal del puente Avelina Lasso</i>	116
Figura 47	<i>Esquema de archivos para creación de proyecto.</i>	117
Figura 48	<i>Sección modelada para el punto de control en el puente.</i>	118
Figura 49	<i>Geometría del Río San Pedro usada para el modelamiento</i>	118
Figura 50	<i>Sección 1 del proyecto.</i>	119

Figura 51	<i>Ventana de flujo.....</i>	120
Figura 52	<i>Tramo a) sección: 10-7 b) sección:1-6.....</i>	120
Figura 53	<i>Modelación de avenidas en el puente Avelida Lasso.....</i>	121
Figura 54	<i>Modelación Río San Pedro Caudal actual.....</i>	121
Figura 55	<i>Modelación punto de control Tiempo de retorno=10 años.....</i>	121
Figura 56	<i>Modelación Río San Pedro Tiempo de Retorno 10 años.....</i>	122
Figura 57	<i>Modelación Río san Pedro Tiempo de retorno 100 años.....</i>	122

Resumen

En la planificación de obras hidráulicas, el procesamiento geográfico e hidrológico emerge como una herramienta esencial. Programas como ARCGIS y HEC-RAS se presentan como valiosos complementos a las teorías propuestas por diversos autores, que buscan predecir los posibles impactos del agua en la infraestructura y la población a lo largo del tiempo. La realización de estudios que prioricen las crecidas potenciales en cauces naturales se vuelve imperativa para prevenir desastres derivados de eventos de precipitación, especialmente en naciones como la nuestra, que enfrentan períodos de lluvias intensas, agravados por terrenos montañosos que aceleran el flujo de agua. El propósito central de esta investigación radica en llevar a cabo un diseño hidrológico y tránsito de avenidas en la cuenca del Río San Pedro, específicamente en el punto de control sobre el puente Avelina Lasso, ubicado en la parroquia de Sangolquí. Este cometido fue llevado a cabo a través de herramientas de geoprocusamiento, mediante las cuales se exploran y caracterizan los parámetros morfológicos inherentes a la cuenca. El resultado culminante de esta investigación arrojó un detallado panorama de las condiciones del río frente a crecidas en distintos intervalos de tiempo de retorno, obtenido mediante un exhaustivo modelamiento digital. Esta información proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en futuras estrategias de gestión hidrológica y planificación de infraestructuras, con el propósito de salvaguardar a las comunidades y minimizar los riesgos en el entorno fluvial.

Palabras clave: diseño hidrológico, cuencas hidrográficas, infraestructura hidráulica, tránsito de avenidas.

Abstract

In the planning of hydraulic works, geographic and hydrological processing emerges as an essential tool. Programs such as ARCGIS and HEC-RAS are presented as valuable complements to the theories proposed by various authors, who seek to predict the possible impacts of water on infrastructure and the population over time. Carrying out studies that prioritize potential flooding in natural channels becomes imperative to prevent disasters derived from precipitation events, especially in nations like ours, which face periods of intense rains, aggravated by mountainous terrain that accelerates the flow of water. The focus of this research lies in carrying out a hydrological design and traffic of avenues in the San Pedro River basin, specifically at the control point on the Avelina Lasso bridge, located in the parish of Sangolquí. This task was carried out through geoprocessing tools, through which the morphological parameters of the basin are explored and characterized. The culminating result of this investigation yielded a detailed panorama of the conditions of the river against floods in different return time intervals, through an exhaustive digital modeling. This information provides a solid basis for informed decision-making in future water management strategies and infrastructure planning, with the aim of saving communities and minimizing risks in the river environment.

Keywords: hydrological Design, Hydrologic Basins, hydraulic infrastructure, traffic flood.

Capítulo I

Antecedentes

El ser Humano se ha movilizó a través de ríos y montañas a lo largo de la historia, muchas civilizaciones se han asentado cerca de grandes masas de agua ya que han permitido una prospera vida y desarrollo. A pesar de lo mencionado es inevitable pensar en los desastres que las fuentes de agua han causado a lo largo de la historia humana; Deslaves, inundaciones, Tsunamis, lahares y muchos otros fenómenos relacionados con el líquido vital han impulsado a la academia a estudiar los fenómenos meteorológicos y sistematizarlos a través de datos.

En el planeta, todos los países están expuestas a desastres debido a la combinación de fenómenos naturales y de la vulnerabilidad de las personas. La CEPAL ha estudiado desastres de origen climático así como hidrológico para entender las consecuencias de los fenómenos naturales, 1972 y 2011 existió 311.127 fallecimientos, y fueron afectaron alrededor de 34 millones de personas, lo cual provocó un gran impacto económico a nivel global de aproximadamente 210.000 millones de dólares, los cuales se dividen en: 140.000 millones de dólares correspondientes a daños y 70.000 millones de dólares entre perdidas (CEPAL, 2013)

En recientes años la infraestructura vial del Ecuador continental ha tenido un desarrollo en auge, según Bonilla 2018, se han invertido una gran cantidad de recursos económicos para la construcción y mantenimiento, sin embargo 30269 siniestros se han registrado por la ANT en el año 2016 producidos por desastres fortuitos como derrumbes o deslaves, esto debido a las irregularidades por donde atraviesan las vías.

En el Ecuador la red de estaciones meteorológicas la opera integralmente el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) además de instituciones privadas que realizan estudios o consultorías sin embargo estos datos no son públicos. A pesar de que existen 35 estaciones automáticas en las 10 cuencas de las 79 que posee Ecuador, la información es escasa y usualmente incompleta por lo que no son suficientes para ser utilizados en proyectos

hidráulicos existen 35 estaciones automáticas en 10 cuencas de la 79 que posee el Ecuador.(INAMHI, 2015)

Estado del Arte

Ecuador está ubicado en la cordillera de los andes, abundante en montañas y volcanes que están en constante cambio por la glaciación, sismos, movimientos de tierra y el cambio climático. En la región de la Sierra, las poblaciones se abastecen de agua que proviene de los deshielos de los varios nevados y lagunas existentes, mientras que en los subtrópicos y trópicos occidental y oriental de la cordillera Andina las cascadas y ríos de la vertiente del Pacífico y los de la vertiente Amazónica abastecen de este elemento a las poblaciones y ciudades asentadas(Izurieta et al., 2019).

Las vertientes que desembocan en el pacífico o en el gran Río Amazonas que cruza prácticamente todo el continente sudamericano, nacen en los glaciares y páramo de la sierra, por lo tanto, el inicio de toda la cuenca hidrográfica debe ser estudiada desde su punto más alto y recopilando información a lo largo de sus microcuencas aportantes. de agua parte de un sector alto (Geraldí et al., 2011).

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta complementaria con la que se puede analizar el ciclo hidrológico y las relaciones físicas en el entorno con los problemas aledaños en un sector determinado (Cely R., 2013). La variedad de software y la base de datos geoespaciales SIG han permitido un gran avance en la investigación científica especialmente encontrando simulaciones y modelos fieles de un suceso hidrológico.(Osorio, 2016)

Los datos meteorológicos cumplen una parte fundamental en el estudio de análisis en cuencas hidrográficas, por ello es imperativo contar con datos básicos sobre precipitaciones en los sectores estudiados. El INHAMI proporciona estos datos gracias a estaciones meteorológicas que recopilan información continua que es valiosa para investigación científica

El siguiente escrito es el diseño Hidrológico y de avenidas en el Puente Avelina Lasso que atraviesa el Río San Pedro, ubicado en las coordenadas: a una altitud de: en el Cantón Rumiñahui, Provincia de Pichincha

Planteamiento del problema

Macro

El manejo del agua en el mundo es de fundamental importancia ya que un correcto y óptimo uso ha llevado a las civilizaciones a convertirse en referentes de ingeniería para el desarrollo. Por ejemplo, Las civilizaciones asiáticas generaron mediciones aproximadas de registros pluviométricos para sistematizar sus hábitos, especialmente de agricultura llegando a una teoría sobre el ciclo hidrológico, algunas se usan actualmente debido a su utilidad. Los romanos construyeron líneas de conducción con acueductos para transportar el líquido vital en su pueblo. Y en el imperio inca se trasladó un sistema de riego a través de Machu Pichu como las ruinas nos han permitido ver.

El interés por racionalizar el manejo y explotación de los recursos naturales ha ido aumentando en las últimas décadas como una alternativa por utilizar el manejo integral de cuencas hidrográficas con el objetivo de contribuir con el desarrollo sostenible de la sociedad, esta tiene su base en las posibilidades directas que definen dichos espacios (Uvillus Ayala, 2020) ya que los cuerpos de agua están sometidos a fuertes modificaciones como resultado de los cambios en el uso y cobertura de la tierra Según (Moreira Braz et al., 2020).

Las condiciones medio ambientales que habitualmente dominan en los la costa de Perú y Chile se invierten, momentáneamente, durante el fenómeno de El Niño, con cambios oceanográficos en el lecho del mar, alteraciones en la flora y fauna continental, este fenómeno de lluvia puede adquirir fuertes características monzón en uno de los desiertos más inhóspitos de la tierra. Las grandes inundaciones en el golfo de Guayaquil, Piura, Tumbes y Lambayeque, ocurridas durante el fenómeno del niño de 1998, fueron la causa de un gran desastre que

inundando campos de cultivo y promulgo enfermedades aumentando así el índice de mortalidad Según (Molina, 1999).

Además el cambio climático ha afectado a las poblaciones de América Latina tal como lo menciona (Paterson, 2017). A partir del 2012 el cambio climático ha afectado significativamente al continente Sudamericano. Una muestra es la ciudad de Sao Paulo, la cual tuvo una escasez de agua potable, además en enero del 2017 Chile se vio afectada por uno de los incendios forestales más destruyentes de su historia. El fenómeno del niño también generó millones de pérdidas económicas en Perú, a causa de inundaciones y tormentas; mientras que en Bolivia se secaban lagos enteros producto de las amplias sequías

Meso

Existen gran cantidad de registros históricos sobre inundaciones, En nuestro país se debe mayormente a fuertes épocas de lluvias, ya que Ecuador está situado en el frente de contacto de Agua fría y Caliente, debido a esto, cualquier cambio en este sistema de contacto repercute en modificaciones del régimen de precipitaciones (Cadier et al., 1994).

Ecuador es uno de los países donde más se ve afectado durante el fenómeno del niño, por lo que es importante conocer y diferenciar entre la corriente del niño, la cual es la corriente cálida del pacífico sudamericano, y el niño-oscilación del sur, patrón climático donde se ve una variación en la temperatura en dos fases, el fenómeno del niño y la niña. (Vélez et al., 2015). Este fenómeno se considera positivo, ya que define la época óptima para la agricultura de la zona debido a las condiciones climáticas. Adicionalmente los pescadores de las costas ecuatorianas y peruanas pusieron este nombre (fenómeno del niño) ya que se daba durante el 18 al 25 de diciembre, coincidiendo con la celebración de Navidad (Rosero Villamar, 2003)

Sin embargo, En el país la falta de recolección de datos históricos ha puesto en vulnerable situación a gran parte de la costa Ecuatoriana frente a inundaciones y sequías extremas, tal es el caso del episodio de 1983 donde duro 14 meses y provocó 2000 víctimas y sus daños representaron alrededor de 10 mil millones de dólares mientras tanto, el episodio de

1997 se extendió por 12 meses afectando al 60% de la población ecuatoriana, es decir aproximadamente a 7 millones de personas, especialmente en las provincias de la costa. (Bitrán, 1998).

Una ventaja de conocer los datos de precipitación, es la posibilidad de prevenir inundaciones, dado que son anomalías que se presentan sobre 10000 km repartidas en el océano pacífico, por consecuencia, pueden ser detectadas con meses de anticipación. Mediante tecnología de satélites o estaciones meteorológicas sobre barcos oceanográficos, Sin embargo la falta de gestión en las entidades públicas han ocasionado que no se prevea desastres aún en nuestra época (Cadier et al., 1994).

Micro

Además de la creciente expansión sobre la urbe ecuatoriana, se evidencia en las parroquias que antes eran consideradas rurales, un crecimiento económico y poblacional, como es el caso del Cantón Rumiñahui por lo tanto es necesario estudios sobre vulnerabilidad y riesgos en inundaciones, desbordamiento de Rios o Aluviones. Como lo menciona el plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial realizado en 2019. La mayoría de inundaciones que han ocurrido en la zona urbana del cantón fue consecuencia de estos varios asentamientos como: Sangolquí, San Rafael y Selva Alegre se encuentran cerca de las orillas de los ríos Pita, San Pedro y Santa Clara.

El siguiente estudio se realizó en el Río San Pedro. Cuya cuenca hidrográfica, como se comprobará, a continuación, nace en las vertientes de Los Ilinizas (Kingue, 2021), recibiendo aportes hídricos de cantones como Machachi, Tambillo, El Chaupi etc. Esta cuenca está sometida a diferentes condiciones que la perjudican y proporcionan un escenario óptimo para causar desgracias. Dentro del área de influencia se encuentran grandes construcciones, vertientes de aguas servidas, lluvias intensas y una de las más importantes posibilidades de ser vía a un Lahar del Volcán Cotopaxi.

El agua que es drenada desde los glaciares debido a la radiación, se une a aguas abajo con los ríos Santa Clara y San Pedro, estos ríos desembocan eventualmente en el cauce del Río Guayllabamba pero previamente cruzan los poblados de Sangolquí, el Valle de los Chillos, Cumbayá y quebradas dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Además lo colocan como el cuarto punto de riesgo en el drenaje de posibles Lahares (Ordoñez et al., 2013).

Las Zonas que presentan susceptibilidad a inundación dentro del cantón Rumiñahui representan un 0.16% sobre el área total. Este porcentaje representa un riesgo a nivel parroquial debido a que varios asentamientos urbanos se ubican dentro de esta área (Tibanlombo & Villacís, 2013a) Por lo que es necesario analizar diferentes datos como deslizamiento, o socavones. Provocados por la velocidad del agua o las condiciones meteorológicas.

En síntesis, el cantón Rumiñahui presenta un bajo nivel de susceptibilidad a eventos relacionados con la lluvia como deslizamientos, específicamente estas zonas representan el 70,13% de la zona urbana del cantón, es decir, debido a las diversas edificaciones que han ocupado casi la totalidad de la zona el cantón no presenta amenazas dentro de las áreas menos vulnerables (Tibanlombo & Villacís, 2013b)

Justificación del problema

La conservación, el manejo adecuado y sustentable del agua son temas de suma importancia para el país, pues las desigualdades en el país tienen una relación directa con el acceso al agua. Es importante reconocer las causas que producen los problemas en las fuentes hidrográficas ya que dentro de las quebradas y laderas un exceso de agua de escorrentía producen grandes volúmenes de agua almacenada si su drenaje no es el correcto, de igual forma los fenómenos pluviales afectan a las cuencas que drenan un volumen considerable de agua que pocas veces es analizado para prevenir inundaciones.

Los fenómenos naturales como el fenómeno de El Niño, ha causado grandes afectaciones a la población y a la infraestructura del país, a pesar de que se conocen datos

para prevenir los desastres, no existe una gestión integral o un análisis que permita concluir posibles afectaciones en el futuro. Las lluvias y sequías también siguen este patrón de análisis ya que no se efectúan suficientes estudios para el futuro.

Actualmente disponemos de tecnología nunca vista para recoger información y procesarla, en programas como ArcGIS y HEC-RAS. Además de información satelital que nos permiten realizar modelos de elevación a una precisión casi exacta de los terrenos, de igual forma se pudo conseguir información Geográfica gracias al INAMHI en donde se procesó los datos de precipitación para conocer posibles lluvias futuras que puedan afectar la zona de estudio.

Un diseño hidrográfico requiere conocimiento e investigaciones acerca de la topografía, precipitaciones, simulaciones, modelos matemáticos además de criterios ingenieriles para aplicar el software deseado. Por lo tanto, se debe realizar estudios como el siguiente presentado donde se analizarán factores geográficos y meteorológicos en el sector del río san pedro en el puente Lasso ubicado en el valle de los Chillos.

Alcance del proyecto

Mediante el diseño hidrográfico y tránsito de avenidas se podrá conocer el comportamiento del puente Avelina Lasso ubicado en las coordenadas (WGS84) 783 400E, 9965734N en el cantón Rumiñahui Provincia de Pichincha, frente a una lluvia extrema en los próximos 100 años que se calculará a través de datos de precipitación proporcionados por el INAMHI y el cálculo de hidrogramas procesados en el software HEC-RAS en las secciones del puente.

Objetivos

Objetivo General

Realizar el diseño hidrológico y tránsito de avenidas en el río San Pedro en las coordenadas (WGS84) 783 400E, 9965734N

Objetivos Específicos

- Analizar la información hidrometeorológica histórica disponible de la zona de estudio, mediante recopilación de datos provistos por el INAMHI.
- Caracterizar morfológica e hidrológicamente la cuenca hidrográfica de estudio a través de un software con tecnología SIG y herramientas de geoprocésamiento satelital.
- Modelar el Río San Pedro en el software HEC-RAS y observar el comportamiento de las secciones transversales ante el caudal que se tiene para un tiempo de retorno de 100 años.

Hipótesis

La sección del puente no es apta para la altura del puente frente a una crecida no prevista.

Capítulo II

Marco Teórico

Bases teóricas

Sistema Hidrografico

Un río es un sistema natural complejo y dinámico que transporta agua, sedimentos y sustrato. Es un sistema en constante cambio, que está influenciado por las precipitaciones, la escorrentía, la erosión y la sedimentación.

Los ríos se pueden dividir en cuatro dimensiones:

- Dimensión longitudinal: es la dirección del flujo del río, desde su nacimiento hasta su desembocadura.
- Dimensión transversal: es la sección transversal del río, que incluye el lecho del río, las orillas y las zonas inundadas.
- Dimensión vertical: es la profundidad del río, que varía según la época del año y la ubicación.
- Dimensión temporal: es el cambio en las características del río a lo largo del tiempo, que puede ser causado por factores naturales o por la actividad humana.

Elementos

Cuenca hidrográfica

De acuerdo con (Jiménez & Benegas, 2008), el concepto integral de una cuenca hidrográfica es mucho más complejo. Es una unidad de gestión territorial definida principalmente por la red de ríos y arroyos visibles en la superficie. En una cuenca hidrográfica, el ser humano, los recursos naturales, los ecosistemas y el medio ambiente interactúan entre sí desde una perspectiva biofísica y socioeconómica. El agua desempeña un papel crucial al ser el recurso que une e integra de manera sistémica todos los componentes de la cuenca.

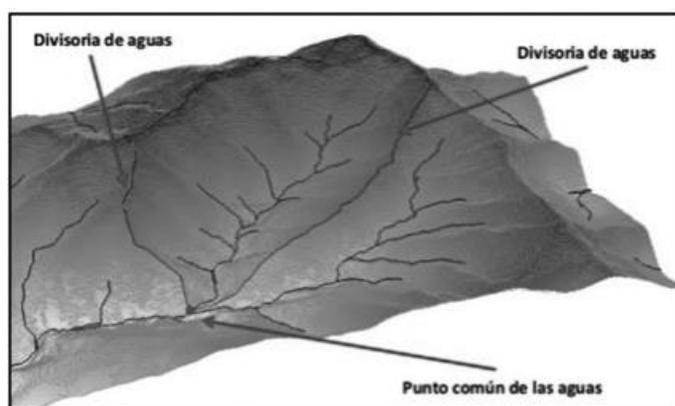
A continuación se describen los elementos (Araque Arellano et al., 2019) que componen una cuenca hidrográfica y que son utilizados para el estudio hidráulico en su mayoría:

Divisorio de aguas

La divisoria de aguas es la línea imaginaria que separa dos cuencas hidrográficas. Se encuentra en la parte más alta de las montañas, y es el límite natural en el que las aguas superficiales se dirigen hacia diferentes cuencas.

Figura 1

Divisorio de aguas



Nota. Tomado de *Cuencas hidrográficas*, por Araque, 2019, Cuencashidrograficas.com

Río principal

El río principal es el río más largo y con mayor caudal de una cuenca hidrográfica. Se caracteriza por tener tres tramos:

- **Curso superior:** El curso superior es el tramo más alto del río. Se caracteriza por tener pequeños caudales que provienen de deshielos, manantiales o afloramientos naturales de agua. La calidad del agua captada en este tramo es alta, ya que no hay contaminación por actividades humanas.
- **Curso medio:** El curso medio es el tramo intermedio del río. Se caracteriza por tener caudales constantes durante todo el año hidrológico. En este tramo se construyen

obras hidráulicas para aprovechar el agua para riego, generación de energía eléctrica y consumo humano.

- Curso inferior: El curso inferior es el tramo más bajo del río. Se caracteriza por tener un caudal más variable, dependiendo de las precipitaciones. En este tramo el río suele desembocar en el mar, un lago o otro río.

Existen dos tipos principales de cuencas hidrográficas:

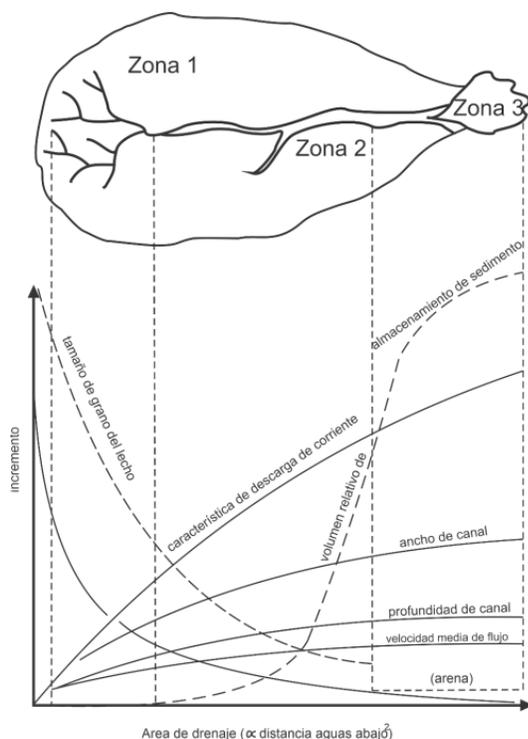
1. Las cuencas endorreicas son aquellas que no tienen una salida natural hacia el mar. Como resultado, el agua se acumula en sistemas de agua estancada, como lagos o lagunas, sin una conexión directa con el océano.
2. Las cuencas exorreicas, a diferencia de las endorreicas, tienen un río principal que fluye hacia el mar. Estas cuencas no están limitadas por montañas u otras barreras naturales, lo que permite que el agua fluya hacia el océano.

Tanto las cuencas endorreicas como las exorreicas suelen tener numerosos afluentes. Los afluentes son cursos de agua más pequeños que desembocan en el río principal o en el cuerpo de agua final. A medida que los afluentes se acercan a su destino final, van perdiendo gradualmente la intensidad que tenían al comienzo de su recorrido. Esto se debe a que se van alimentando de otros afluentes más pequeños, y a que el terreno se va haciendo más plano.

El curso inferior de un río es el tramo final del río. Se caracteriza por tener un cauce ancho y profundo, con un caudal muy alto y una velocidad de flujo muy baja. Esta baja velocidad de flujo induce a la sedimentación en el fondo del cauce.

Una cuenca hidrográfica es un área determinada de terreno que recibe precipitación y que además es un medio de transporte de esta, hasta un punto de salida del cauce principal.

(González & Mirabetty, 2015), Una cuenca hidrográfica es un área determinada de terreno que recibe precipitación y que además es un medio de transporte de esta, hasta un punto de salida del cauce principal.

Figura 2*Área de drenaje en una cuenca*

Nota. Tomado de *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca*, por Gonzáles y Mirabetty, 2015, Universidad Católica.

(Robert, 2003) asoció la disminución del gradiente del canal con la disminución del tamaño de partícula, aumento en el tamaño del caudal y aumento de almacenamiento de sedimentos.

Maldonado (Maldonado Albuja, 2017) identificó tres zonas geomorfológicas básicas en las cuencas hidrográficas:

- Zona 1: La parte más elevada del cauce, con un gran tamaño de grano, el cual es erosionado y transportado por la corriente aguas abajo.
- Zona 2: Una zona de transición, con un tamaño de grano medio, donde la erosión es menos agresiva que en la zona 1. Los sedimentos siguen su camino aguas abajo.

- Zona 3: La parte de menor pendiente del sistema, donde los sedimentos resultantes de la erosión en las zonas 1 y 2 son depositados. La velocidad del cauce disminuye al mínimo en esta zona.

(LORA CARRANCO, 2020) señaló que las cuencas hidrográficas son drenadas de manera natural, y que el uso de los recursos naturales se regula administrativamente separando el territorio por las cuencas hidrográficas. Esto permite una verdadera integración social y territorial por medio del agua.

Una cuenca hidrográfica es un área de terreno que drena hacia un cuerpo de agua común. Está formada por tres zonas funcionales:

- Cuenca: Es el área más grande de una cuenca hidrográfica. Está formada por varias subcuencas o microcuencas.
- Subcuenca: Es una área más pequeña de una cuenca hidrográfica. Está formada por varias microcuencas.
- Microcuenca: Es el área más pequeña de una cuenca hidrográfica. Es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca.

Las cuencas hidrográficas son importantes porque proporcionan agua para el consumo humano, riego, generación de energía eléctrica y otros usos. También son un hábitat importante para la vida silvestre.

(Ordoñez et al., 2013) identificaron los diferentes tipos de cuencas hidrográficas:

Cuencas exorreicas: Son las cuencas que desembocan en el océano, un lago o otro río.

Cuencas endorreicas: Son las cuencas que no desembocan en el océano, sino que el agua se evapora o se infiltra en el suelo.

Cuencas mixtas: Son las cuencas que combinan las características de las cuencas exorreicas y endorreicas.

Las cuencas hidrográficas pueden ser clasificadas de otras maneras, dependiendo de su tamaño, forma, geología, clima y otros factores.

Características morfológicas

Las características geomorfológicas de una cuenca hidrográfica son las características físicas de la cuenca, como su forma, tamaño, geología, vegetación y clima. Estas características afectan el funcionamiento del sistema hidrológico, que es el ciclo del agua dentro de la cuenca. El funcionamiento del sistema hidrológico puede ser evaluado mediante 26 lineamientos. Estos lineamientos se basan en las características geomorfológicas de la cuenca y permiten identificar los distintos relieves y comportamiento en la superficie terrestre. (Bravo, 2019)(Bravo, 2019)

Una cuenca hidrográfica es un área de tierra que drena agua hacia un río, lago o océano. La cuenca está delimitada por las líneas divisorias de aguas, que son las líneas que separan las aguas que fluyen hacia un cuerpo de agua de las aguas que fluyen hacia otros cuerpos de agua. El área de una cuenca hidrográfica se mide en metros cuadrados (m²) o kilómetros cuadrados (km²). El tamaño de una cuenca hidrográfica puede variar desde unos pocos metros cuadrados hasta millones de kilómetros cuadrados (Rivas Ramírez & Moreno Rivas, 2019). Valores de Areas de cuenca

Tabla 1

Valores de Areas de cuenca

Area (km²)	Nombre
>5	Unidad
5 – 20	Sector
20 – 100	Microcuenca
100 – 300	Subcuenca
>300	Cuenca

Longitud de cauce principal (Lc)

El cauce longitudinal de una cuenca hidrográfica es el recorrido que realiza el río principal desde su nacimiento hasta su desembocadura. Sigue todos los cambios de dirección o sinuosidades del río, hasta llegar al punto fijo o punto de interés. El cauce longitudinal es importante para el estudio de los ríos, ya que permite conocer su longitud, su pendiente, su caudal y otros datos. (Bravo, 2019).

Pendiente media del curso principal

La pendiente media del cauce es la relación entre la diferencia de altitudes del cauce principal y la proyección horizontal del mismo. Se expresa en porcentaje o en grados.

Es la relación entre el área de la cuenca hidrográfica y la longitud del río:

$$Ap = \frac{A}{L}$$

Ap = Ancho promedio de la cuenca o Unidad Hidrográfica (km)

A = Área de la cuenca o Unidades Hidrográficas (km²)

L = Longitud mayor del río (km)

Pendiente Media del Curso Principal (S)

La pendiente del cauce es la relación entre la diferencia de altitudes entre el punto más alto y el punto más bajo del cauce, y la distancia horizontal entre estos dos puntos. La pendiente del cauce es importante porque afecta la velocidad del agua, la capacidad de transporte de sedimentos y la erosión del cauce. (Bravo, 2019)

Coefficiente de Compacidad o Gravelius

El índice de forma es una medida de la forma de una cuenca hidrográfica. Se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia cuya área es equivalente al área de la cuenca en estudio. El índice de forma afecta la escorrentía directa, que es el agua que fluye sobre la superficie del suelo hacia el río principal. También afecta la

geometría del hidrograma, que es la curva que representa el cambio en el caudal de un río con el tiempo. Se determina con la siguiente expresión:

Dónde:

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Kc = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Tabla 2

Coeficiente de compacidad Kc

Kc	Clasificación	Interpretación Ambiental
1 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda	Alta tendencia a inundaciones
1.25 a 1.5	Oval redonda a oval-alargada	Mediana tendencia a inundaciones
1.5 a 1.75	Oval alargada a alargada	Baja tendencia a la inundación
>1.75	Alargada	Cuencas propensas a la conservación

Nota. Tomado de *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca*, por Gonzáles y Mirabetty, 2015, Universidad Católica.

Factor de forma Horton

El índice de forma de Horton es una medida de la forma de una cuenca hidrográfica. Se define como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de la mayor corriente de la cuenca. El índice de forma afecta las crecidas de una cuenca, en tanto la forma de la cuenca hidrográfica afecta los hidrogramas de escorrentía y las tasas de flujo

$$\text{máximo } Ff = \frac{Am}{L}$$

Dónde:

Ff = Factor de forma

A_m = Ancho medio de la cuenca (km)

L = Longitud del curso más largo (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Tabla 3

Valores de factor de forma

Rango de Valores	Forma de la Cuenca
< 0.22	Muy Alargada
0.22 -0.30	Alargada
0.3 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.12	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Nota. Tomado de *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca*, por Gonzáles y Mirabetty, 2015, Universidad Católica.

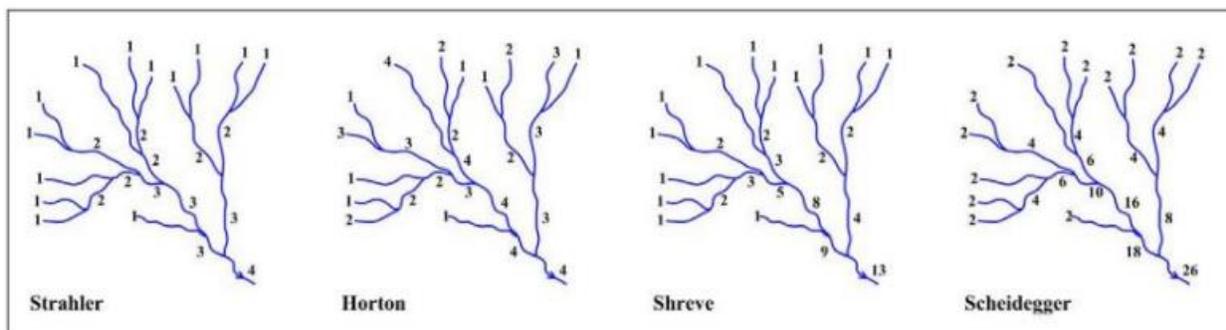
Número de orden de la cuenca

El número de orden de una cuenca hidrográfica es una medida de la complejidad de la red de drenaje de la cuenca. Se define como el número de ramificaciones de la red de drenaje. La clasificación de Horton es un sistema de clasificación de cuencas hidrográficas basado en el número de orden. En el sistema de clasificación de Horton, el cauce principal es de orden 1, los afluentes del cauce principal son de orden 2, y así sucesivamente. Las cuencas con un número de orden más alto son más complejas y tienen una red de drenaje más ramificada.

Luego se desarrolló otros criterios para su clasificación. (Figura 3), (Strahler, 1957), Scheidegger (1965) y Shreve (1966).

Figura 3

Número de orden según diferentes autores



Nota. Tomado de *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca*, por Gonzáles y Mirabetty, 2015, Universidad Católica.

Rectángulo Equivalente

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica que convierte una cuenca hidrográfica en un rectángulo con el mismo área y perímetro. El rectángulo equivalente es una herramienta útil para estudiar el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, ya que permite simplificar la forma de la cuenca y hacerla más fácil de analizar.

El rectángulo equivalente se calcula de la siguiente manera:

$$Lxl = A \text{ (km}^2\text{)}$$

$$2(Lxl) = P \text{ (km)}$$

Dónde:

L = Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km).

l = Longitud del lado menor del rectángulo equivalente (km).

Densidad de Drenaje

La densidad de drenaje es una medida de la densidad de la red de drenaje de una cuenca hidrográfica. Se define como la longitud total de los cauces de agua en una cuenca hidrográfica dividida por el área de la cuenca hidrográfica, se calcula de la siguiente forma:

$$Dd = \frac{Li}{A}$$

Dónde:

Li = Suma de longitudes de todos los tributarios y cauce principal (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Dd = Densidad de Drenaje (km/km²)

Li = Longitud total de los cursos de agua perennes e intermitentes (km)

De acuerdo con Montsalve, Dd usualmente toma los siguientes valores:

Entre 0.5 km/km²

para hoyas con drenaje pobre.

Hasta 3.5 km/km² para hoyas excepcionalmente bien drenadas.

Pendiente Media del Río (Ic)

La pendiente media de un río es la diferencia de altura entre dos puntos a lo largo del río dividida por la distancia horizontal entre los dos puntos. La pendiente media se expresa en metros por kilómetro (m/km) o en pies por milla (ft/mi).

Se determina de la siguiente forma:

$$Ic = \frac{(HM - Hm)}{1000 * L}$$

Siendo:

Ic = Pendiente media del río.

L = Longitud del río (km)

HM y Hm = Altitud máxima y mínima del lecho del río; referidas al nivel medio de las aguas del mar m.s.n.m.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda el agua de lluvia en llegar desde el punto más alejado de una cuenca hidrográfica hasta el punto de salida. El tiempo de concentración es un factor importante en el diseño de sistemas de drenaje y alcantarillado, ya que determina el tamaño y la capacidad de los sistemas (Guacho M, 2018).

Existen algunas metodologías para calcular este parámetro, se emplearon cinco fórmulas: Temez, Bransby-Williams, Kirpich, Ven T Chow y Giandotti que se detallan a continuación:

Fórmula de Temez

$$T_c = 0.30 * \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}}$$

Dónde:

Tc = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del curso principal en kilómetros.

S = Pendiente a lo largo del cauce en m/m.

Fórmula de Bransby – Williams

$$T_c = 0.2433 * \frac{L}{A^{0.1} * S^{0.2}}$$

Dónde:

Tc = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del curso principal en kilómetros.

A = Área de cuenca en Km².

S = Pendiente a lo largo del cauce en m/m

Fórmula Kirpich

Según el criterio de Kirpich (Paulet, 1982) se presenta la siguiente ecuación

$$T_c = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración

L= Longitud del cauce principal

Scp= Pendiente del cauce principal

Fórmula Ven T Chow

$$T_c = 0.2734 * L^{0.64} * S^{-0.32}$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración

L= Longitud del cauce principal

S= Pendiente del cauce principal

Fórmula Giandotti

Según(Iroume, 1997) el criterio de Giandotti se calcula con la siguiente ecuación

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{0.8 * \sqrt{H}}$$

Donde:

Tc=Tiempo de concentración

A=Area de la cuenca

L= Longitud del cauce principal

H=Diferencia de altura del cauce

Caudal medio

La ecuación que se utiliza para el cálculo del caudal medio es la presentada por (Sandoval & Aguilera, 2014)

$$Q_o = \frac{31.71 * P * A * C}{10^6}$$

Donde:

Q_o= caudal medio de la cuenca

P= Precipitación media anual

A= Area de la cuenca

C= coeficiente de escorrentia

Parámetros de Relieve

Los parámetros más utilizados para estudiar las cuencas hidrográficas son las curvas hipsométricas, los histogramas de frecuencia y la pendiente de la cuenca.

- Las curvas hipsométricas son un gráfico que muestra la relación entre la altura y el área de una cuenca. Las curvas hipsométricas pueden utilizarse para estimar el porcentaje de área que existe por encima de una cota determinada.
- Los histogramas de frecuencia son un gráfico que muestra la distribución de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al área total de la cuenca. Los histogramas de frecuencia pueden utilizarse para estimar el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel.
- La pendiente de la cuenca es la diferencia de altura entre dos puntos de la cuenca dividida por la distancia horizontal entre los dos puntos. La pendiente de la cuenca tiene una gran influencia en la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación. Una pendiente mayor incrementa la velocidad del escurrimiento en los cauces.

Escorrentía

(Sandoval, 2013) propone el cálculo del coeficiente de escorrentía por el siguiente método

$$C = 0.25 * k1 * k2 * k3$$

$$k1 = 3.7 * -A^{-0.152}$$

$$K2 = 0.71 * Ln(P) - 3.51$$

Tabla 4

Valores del coeficiente K3

Valores del coeficiente K3	
Características de la cuenca	K3
Cuenca llana y permeable	0.5 a 0.7
Cuenca ondulada	0.5 a 1.2
Cuenca montañosa e impermeable	1.2 a 1.5

K1= Factor de extensión de la cuenca

K2= Factor de la lluvia media anual

K3= Factor de la pendiente y de la permeabilidad del suelo

A=Área de la cuenca

P= precipitación media anual

Formula anonima

Existen otros métodos para el cálculo de C, uno de ellos es el citado por (ENACON, 2012) donde se presenta la siguiente ecuación para el cálculo de escorrentía (Guacho M, 2018)

$$c = K1 + K2 + K3 + K4$$

Donde los valores de K serán tomados de la tabla

K1= La pendiente media de la cuenca

K2 = La permeabilidad con textura de arenas

K3=La cobertura vegetal

K4 =La capacidad de almacenamiento

Tabla 5

Valores de K Método Cowan

Pendiente	K1	Permeabilidad	K2
>0.3	0.4	Roca	0.2
De 0.1 a 0.3	0.3	Arcilla	0.15
De 0.05 a 0.1	0.2	Limos	0.10
Áreas planas	0.05	Arenas	0.05
Cobertura vegetal	K3	Capacidad de almacenamiento	K4
Nada	0.20	Nada	0.20
Poca	0.15	Poca	0.15
Media	0.10	Media	0.10
Mucha	0.05	Mucha	0.05

Keller

Mientras tanto la fórmula de Keler (Ibañez Asensio et al., 2011a) se utiliza para determinar precipitaciones mayores a 500 mm

$$C = a - \frac{b}{p}$$

Donde:

a= es un coeficiente que oscila entre 0.88 y 1.00, el mayor para cuencas torrenciales

b= es un coeficiente que oscila entre 350 y 460 , el mayor para cuencas torrenciales

P=Precipitación media anual

Duración (D)

La duración de la tormenta es el tiempo que transcurre desde que comienza a llover hasta que deja de llover. La duración de la lluvia de diseño es el tiempo que tarda el agua de lluvia en llegar desde el punto más alejado de una cuenca hidrográfica hasta el punto de salida. La duración de la lluvia de diseño es igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que al cabo de dicho tiempo la escorrentía alcanza su valor máximo, al contribuir toda el área aportante al flujo de salida.

Frecuencia

Según Villon a frecuencia de una tormenta es el número de veces que se repite una tormenta con características de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años (Villón, 2002).

Intensidad

Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta, es la intensidad máxima que se haya presentado, ella es la intensidad máxima de agua caída por unidad de tiempo Según (Villón, 2002). De acuerdo a esto la intensidad se expresa así:

$$I_{max} = \frac{p}{t}$$

Obtención curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Para determinar las curvas IDF, se deben determinar las intensidades máximas para diferentes duraciones y períodos de retorno. Luego, se aplica logaritmo a cada valor de intensidad

máxima y se procede a graficar estos valores. Las curvas IDF se obtienen al interpolar los valores graficados.

Cada quiebre en una curva IDF representa una ecuación tipo. Estas ecuaciones pueden utilizarse para calcular la intensidad de la lluvia para diferentes duraciones y períodos de retorno.

Las curvas IDF son una herramienta importante en el diseño de sistemas de drenaje y alcantarillado, ya que permiten determinar el tamaño y la capacidad de los sistemas (Guacho M, 2018).

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

I= Intensidad (mm/h)

T= periodo de retorno (años)

t=tiempo de duración (minutos)

K,m,n= constantes de ajuste propias de cada estación

A la ecuación anterior se le aplica logaritmos a cada término por lo que obtendremos la siguiente expresión:

$$\log I = \log K + m \log T - n \log t$$

Se realiza un cambio de variables a la ecuación:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

Donde:

$$y = \log i; a_0 = \log k; a_1 = m; x_1 = \log T; a_2 = -n; x_2 = \log t$$

Al hacer el ajuste de la correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos (Intensidad, duración y frecuencia), se obtiene un sistema de ecuaciones con tres incógnitas.

$$\sum y = N a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2$$

$$\sum x_1 y = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum X_1 x_2$$

$$\sum x_2 y = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum X_1 x_2 + a_2 \sum (x_1) + a_2 \sum (x_1)^2$$

Una vez encontradas las constantes K, m y n mediante la resolución del sistema de ecuaciones, se procede a establecer los modelos en función del período de retorno (T) en años y la duración (t) en minutos.

Caudales máximos

Los caudales máximos son utilizados en la predicción de inundaciones y diseño de obras hidráulicas, tales como conductos, alcantarillas, canales entre otros. Asimismo, el caudal máximo puede ser estimado con: ajuste de una distribución estadísticas, regionalización de caudales y precipitación (Tucci, 1993).

Hidrograma

Para definir un hidrograma base para el diseño de las estructuras se requiere disponer de estaciones hidrográficas y, en caso de ausencia, se puede recurrir a una cuenca cercana o de condiciones hidrológicas semejantes (Sandoval & Aguilera, 2014) Si es que no se dispone de los elementos antes citados, se toma un hidrograma sintético, desarrollado propuesto por varios autores

De acuerdo con el National Resources Conservation Service (USDA United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 1999) (NRCS, ex-SCS), para un hidrograma triangular el tiempo base $T = 2,67t_1$, Figura 4, en el que t_1 es el tiempo pico es igual a:

$$t_1 = \frac{de}{2} + Tr$$

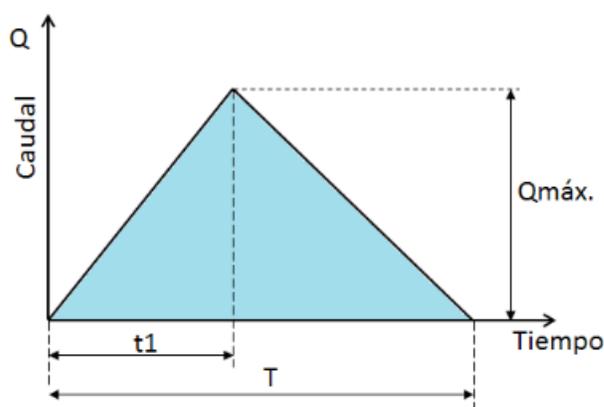
La duración en exceso de , para cuencas pequeñas, es $de = tc$ y para cuencas grandes $de = 2\sqrt{tc}$

T_r es el tiempo de retraso que se considera igual a, $t_r = 0.6t_c$; siendo t_c el tiempo de concentración de la cuenca.

De acuerdo con (Sandoval, 2013) en los hidrogramas triangulares, para cuencas pequeñas, el tiempo pico $t_1 = t_c$ y $T = 2t_1$ para cuencas grandes $t_1 = 1.5t_c$ y $T = 2.5t_1$.

Figura 4

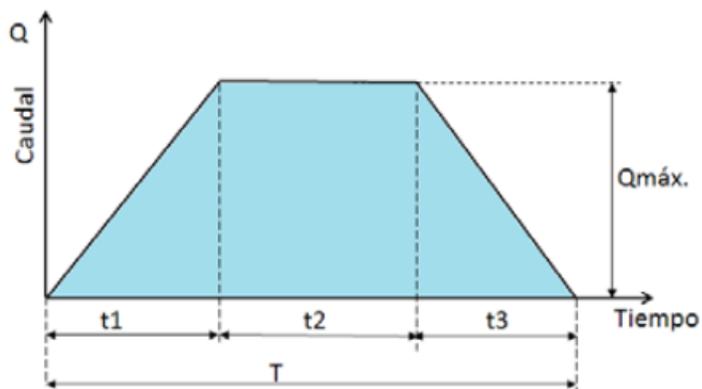
Hidrograma unitario triangular



Nota. Tomado de *Principios de la Hidráulica 2*, por Sandoval, 2013, EDIESPE.

En las cuencas de $A < 30\text{km}^2$; $t_1 = t_c$ y $T = 2t_c$. Para las cuencas de área igual o mayor a 30 km^2 el tiempo base está dado por una tabla que se aproxima a la siguiente ecuación, $T = 3t_c[l + (0.9\ln A - 2)]$. A partir de las recomendaciones expuestas se tiene que; para cuencas pequeñas, el volumen de agua con el Hidrograma del SCS resulta 1,43 veces mayor a los propuestos por (Gaspari et al., 2013)

Para cuencas grandes y montañosas, con varios cauces y diferentes tiempos de llegada, los hidrogramas resultan complejos, con varios picos, por lo que recomienda tomar uno de forma trapecial, figura 5, especialmente si las lluvias tienen una duración mayor al tiempo de concentración.

Figura 5*Hidrograma trapecial*

Nota. Tomado de *Principios de la Hidráulica 2*, por Sandoval, 2013, EDIESPE.

El caudal máximo de un hidrograma trapecial resulta siempre menor al determinado con las ecuaciones anteriormente expuestas (Sandoval, 2013). Para el caso de cuencas sin información, Goroshkov (1979) recomienda reducir el caudal máximo en un valor igual a:

$$Q_{máx} t_{dk} > t_p = \frac{Q_{máx}}{\sqrt{1 + \frac{tdl}{t_p}}}$$

Aquí, tdl es el tiempo de precipitación con una duración mayor al tiempo pico t_p

Numero de curva de la cuenca

En su libro fundamentos de hidrología de superficie, nos presenta la siguiente tabla para conocer el numero de curva basándonos en los tipo de tierra y la pendiente del terreno para un hidrograma unitario triangular del SCS (Aparicio Mijares, 2003)

Figura 6

Número de Curva

Números de escurrimiento						
Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de Suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-	77	86	91	94
Cultivo en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	<1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales		>1	68	79	86	89
		<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
Pradera permanente		<1	30	58	71	78
Bosques naturales						
	Muy ralo		56	75	86	91
	Ralo		46	68	78	84
	Normal		36	60	70	77
	Espero		26	52	62	69
	Muy Espeso		15	44	54	61
Camino						
	De terracería		72	82	87	89
	Con superficie dura		74	84	90	92

Nota. Tomado de *Principios de la Hidráulica 2*, por Sandoval, 2013, EDIESPE.

Caudales máximos

Los caudales máximos son una herramienta importante en la gestión del agua, ya que permiten planificar y diseñar obras hidráulicas que puedan soportar eventos de alta precipitación.

Según (Tucci, 1993), los caudales máximos pueden ser estimados con:

- Ajuste de una distribución estadísticas: este método utiliza una distribución estadística para estimar la probabilidad de ocurrencia de un caudal máximo dado.

- Regionalización de caudales y precipitación: este método utiliza datos de caudales y precipitación de otras cuencas hidrográficas para estimar el caudal máximo de una cuenca hidrográfica dada.

Coefficiente de rugosidad

El valor del coeficiente de rugosidad se caracteriza por ser variado y dependiente de otros parámetros que intervienen en su cálculo, los cuales son la **Rugosidad** Superficial; este parámetro está definido por el material granular arrastrado por el agua del cauce, y su relación radica en la cantidad de material frente a la velocidad del flujo. Otro parámetro influyente es la Vegetación, la cual disminuye la capacidad del flujo en el canal, donde intervienen otros factores como la densidad del follaje y el tipo de especies vegetales; dentro de las características del canal las más representativas son el perímetro mojado y su geometría. Además la sinuosidad del río también interfiere en el valor de rugosidad, puesto que si existen curvas abruptas, el coeficiente aumentará; Finalmente un factor igual de importante es la cantidad de material granular convertido en sedimentos y la presencia de socavones en la cuenca en donde estos se almacenaran con el tiempo. En ese caso se puede efectuar un efecto de presa donde los materiales restrinjan la movilidad del flujo (Te Chow et al., 1988).

Figura 7

Valores del coeficiente de rugosidad según ven te Chow

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<i>b.</i> Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
<i>a.</i> Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>b.</i> Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<i>c.</i> Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<i>d.</i> Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
<i>a.</i> Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	0.060
<i>b.</i> Sección irregular y rugosa	0.035	0.100
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
<i>a.</i> Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

Nota. Tomado de *Principios de la Hidráulica 2*, por Sandoval, 2013, EDIESPE.

Tránsito de avenidas

El tránsito de avenidas en cauces, es una técnica hidrológica que es usada para predecir las variaciones temporales y espaciales de una onda al pasar la extensión de un tramo de río (determinando su tiempo y magnitud), además es útil para calcular el efecto de almacenamiento del cauce en la forma y movimiento de la misma, esto permite tomar medidas de evacuación temporal ya sea de bienes o personas, Tránsito de avenidas se puede definir como el procedimiento bajo el cual el tiempo y magnitud de una ola de avenida es determinado por medio de los datos o información conocida o - supuesta en uno o más puntos aguas arriba (MORENO ZEPEDA, 1987)

El Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.3 con su extensión HEC – GeoHMS permite obtener la información geomorfológica de la cuenca en la que los Modelos Digitales de

Elevación (DEM) permitirán obtener direcciones de flujo, pendientes, distribución de microcuencas en la subcuenca, longitudes de cauce y demás información que permite obtener las condiciones básicas de la subcuenca (Castillo Sarmiento, 2019).

Las características morfométricas definen el estado de la subcuenca hidrográfica de un Río en las que se identifican las relaciones altura – área, la pendiente y las condiciones particulares del suelo; tipos de suelos, usos del suelo y por consiguiente conflictos del uso del suelo; toda esta información es básica a fin de determinar la temporalidad y el comportamiento específico del escurrimiento En una subcuenca. A su vez las características del drenaje determinan la velocidad y demás parámetros hidrológicos que en respuesta condicionan la capacidad de la cuenca frente a las precipitaciones que en la zona se presenten (Aparicio Mijares, 2003).

El diseño hidrológico de un puente es indispensable previo a cualquier proyecto que requiera una intervención a un caudal, ya que según (Seaurz, 2006), la mayoría de los puentes, fallan por razones hidráulicas, generalmente erosión en pilares o estribos. Tomando

en cuenta el criterio del autor, considera que las oportunidades de interacción y cruce entre las redes de infraestructura y la red hidrográfica son muy numerosas. Muchos de los proyectos como autopistas, carreteras, ferrocarriles o transporte de tuberías, han de cruzar un curso de agua a través de puentes.

Capítulo III

Metodología

Ubicación del proyecto

El proyecto está ubicado en el cantón Rumiñahui, específicamente en La parroquia de Sangolquí en el valle de los chillos, este valle poblado es la capital del cantón Rumiñahui y forma parte de la hoya de Guayllabamba. Se encuentra entre Ríos que desembocan en la cuenca del Río esmeraldas, como el Río Pita. Limita con la parroquia La Armenia, al sur con el cantón Mejía, al este con las parroquias de Alangasí y Pintag, , al oeste limita con las parroquias de Amaguaña. las cuales pertenecen al Distrito Metropolitano de Quito Conocoto.(Rumiñahui, 2012).

Sangolquí

La parroquia de Sangolquí está ubicada en la provincia de pichincha por lo tanto su altitud radica entre los 2415 y 2512 metros sobre el nivel del mar, la temperatura promedio es de 16 °C y 23 °C, y su precipitación media mensual es 1804 mm³, donde los meses más lluviosos son Abril y octubre según datos del GAD de Rumiñahui, (Rumiñahui, 2012)

Figura 8

Ubicación cantón Rumiñahui



Nota. Tomado de *Estudio de flujo de sedimentos de la cuenca baja del río pita desde el sector de Cochapamba hasta la sección de control de la ESPE*, por Lora, 2013, RepositorioESPE.

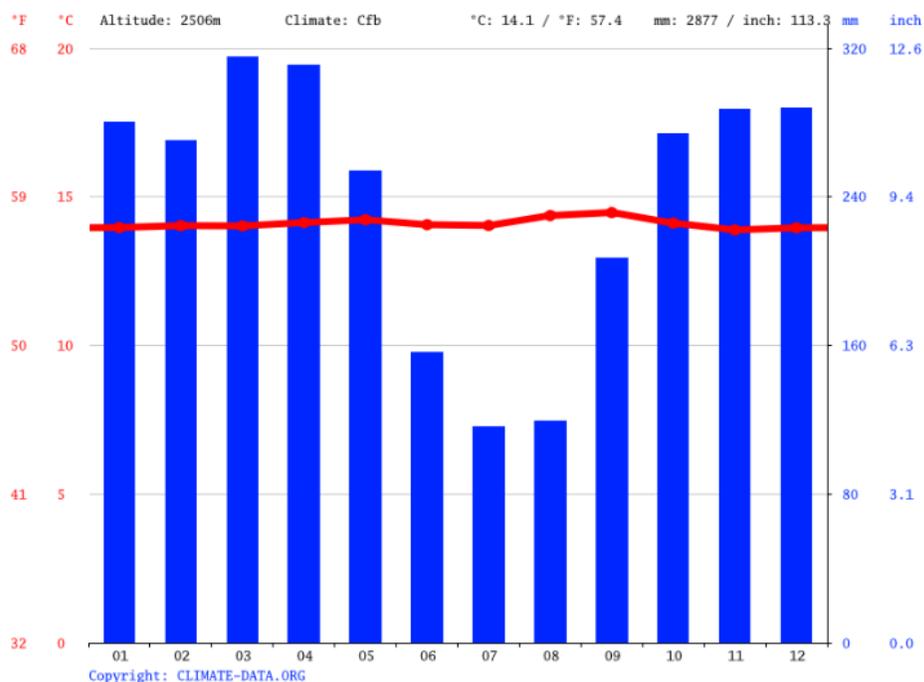
Esmeraldas, Según el informe del plan Hidráulico regional (2016), El área que ocupa la cuenca Guayllabamba es de 9181.86 Km2 en donde están involucrados varios cantones como: Latacunga, Eloy Alfaro, Quinindé, Cotacachi, Otavalo, Quito, Cayambe, Mejía, Pedro Moncayo, Rumiñahui, San Miguel de Los Bancos, Pedro Vicente Maldonado, Puerto Quito.

Datos generales del clima de Sangolquí

Según (CLIMATE- DATA, 2023) la precipitación en la parroquia de Sangolqui presenta varios picos y épocas marcadas a lo largo del año, De acuerdo a datos desde 1996 hasta 2021, el mes más seco del año, es Julio teniendo un promedio de precipitación de 116 mm, mientras que la mayor parte de la precipitación es en el mes de marzo en donde el promedio de precipitaciones es de 315 mm

Figura 10

Precipitación en Sangolqui

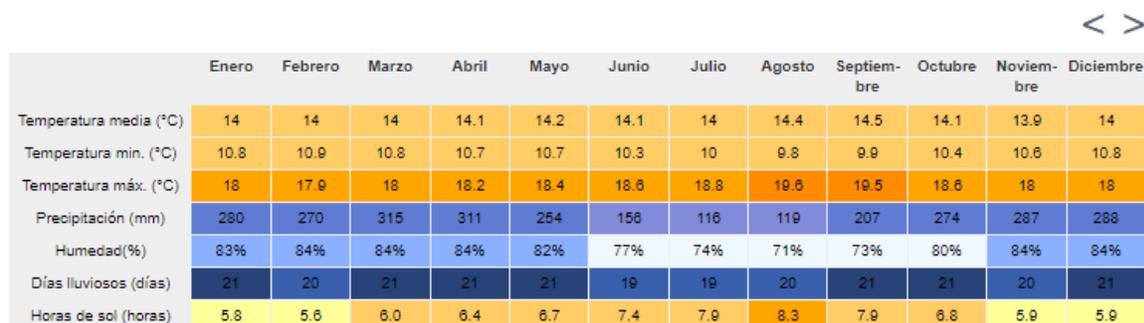


La parroquia de sangolqui presenta un clima templado, en la época de verano se presentan sequías marcadas en contraste con el invierno donde las precipitaciones pueden

llegar a desbordar ríos y causar deslaves. Según (CLIMATE- DATA, 2023). El promedio de temperatura es de 14.11 °C. Además, existe una diferencia de 199 mm de precipitación los meses más húmedos y secos del año, con una variación de 0.6 °C.

Figura 11

Temperatura en Sangolquí



	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	14	14	14	14.1	14.2	14.1	14	14.4	14.5	14.1	13.9	14
Temperatura mín. (°C)	10.8	10.9	10.8	10.7	10.7	10.3	10	9.8	9.9	10.4	10.6	10.8
Temperatura máx. (°C)	18	17.9	18	18.2	18.4	18.6	18.8	19.6	19.5	18.6	18	18
Precipitación (mm)	280	270	315	311	254	156	116	119	207	274	287	288
Humedad(%)	83%	84%	84%	84%	82%	77%	74%	71%	73%	80%	84%	84%
Días lluviosos (días)	21	20	21	21	21	19	19	20	21	21	20	21
Horas de sol (horas)	5.8	5.6	6.0	6.4	6.7	7.4	7.9	8.3	7.9	6.8	5.9	5.9

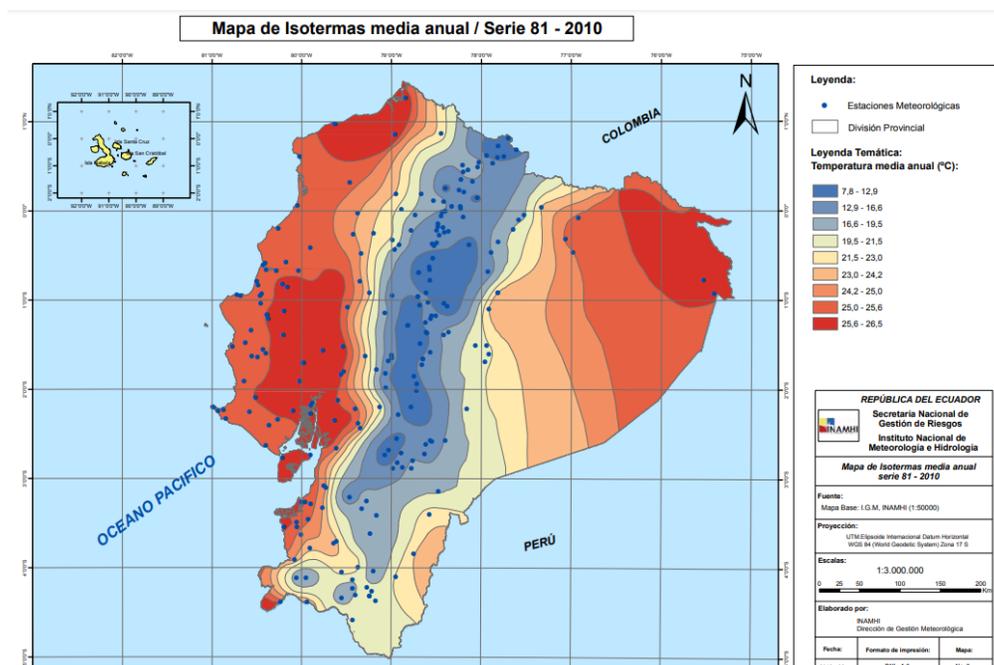
Mientras tanto en cuanto a la humedad relativa del medio, (CLIMATE- DATA, 2023) menciona que la más baja a lo largo del año es en agosto con un 70.58 %. Sin embargo, el mes con mayor humedad no es marzo en donde se presentan más precipitaciones, es diciembre con una humedad promedio del 84.26 %. En un mes el mayor número de días lluviosos es de 28.63 y en el mes de marzo, mientras que el mes con el menor número de días lluviosos es julio con 25.30 días.

Mapa de isotermas

A continuación se presenta el mapa de isotermas (figura 11), con el fin de encontrar la temperatura en la zona de estudio.

Figura 12

Mapa de isotermas

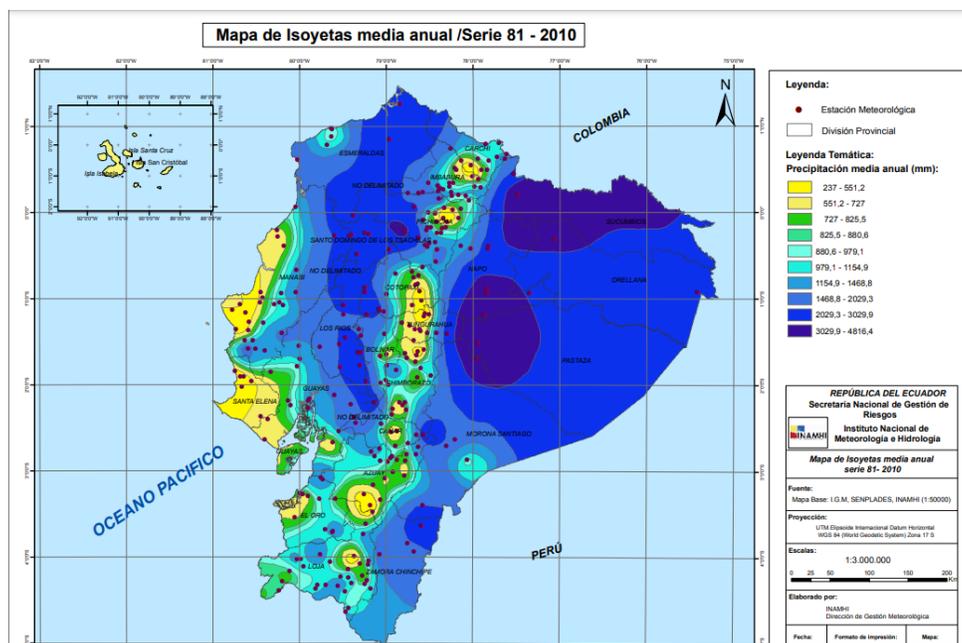


Mapa de isoyetas

El mapa de isoyetas presentado a continuación representa las precipitaciones en una unidad de tiempo, ubicada en una zona estudiada. Estos valores ayudan al cálculo de las precipitaciones anuales medias que tienen las cuencas hidrográficas.

Figura 13

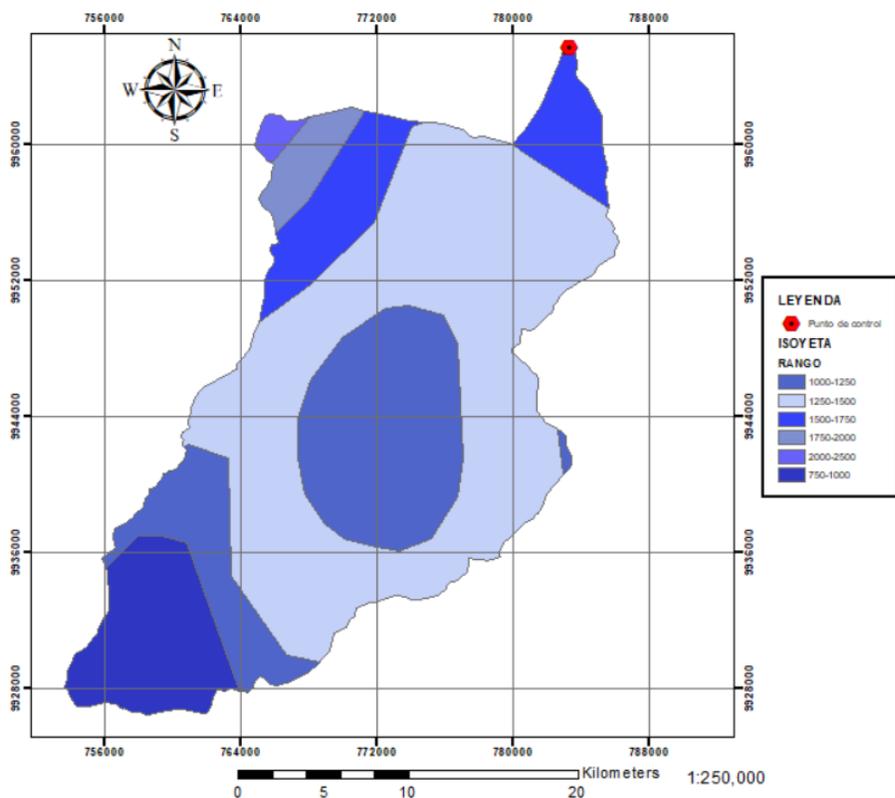
Mapa de isoyetas



Se desarrolló el mapa de la figura 14 en donde se visualiza la precipitación para cada franja de área en la cuenca con el fin de obtener la precipitación media anual de la cuenca estudiada.

Figura 14

Cuenca hidrográfica delimitada e Isoyetas



Media Anual

La precipitación se la puede definir como el agua aportada en forma de líquido, sólido o vapor que se genera en las nubes cuando alcanza un punto de condensación. Para determinar las áreas ponderadas se utilizó el mapa de isoyetas (INAMHI, 2010) en donde se realizó una clasificación de las áreas para su diferente valor. Del mapa de isoyetas se determinó la precipitación con valores máximos, mínimos y promedio aplicando la ecuación:

$$\bar{P} = \frac{A1*P1+A2*P2+A3*P3+A4*P4+A5*P5+A6*P6}{A\text{ TOTAL}}$$

Tabla 6*Precipitación anual mínimos*

	Area (Km2)	Precipitación anual(mm)	Área * precipitación
A1	69,71	750	52282,5
A2	163,819	1000	163819
A3	338,64	1250	423300
A4	68,5	1500	102750
A5	19,4012	1750	33952,1
A6	4,74	2000	9480
total	664,8102		785583,6

$$\bar{P} = \frac{785583.6}{664.81}$$

$\bar{P} = 1181.67 \text{ mm} = \text{Precipitación ponderada mínima}$

Tabla 7*Precipitación anual máximo*

	Area (Km2)	Precipitación anual(mm)	Área * precipitación
A1	69,71	1000	69710
A2	163,819	1250	204773,75
A3	338,64	1500	507960
A4	68,5	1750	119875
A5	19,4012	2000	38802,4
A6	4,74	2500	11850
total	664,8102		952971,15

$$\bar{P} = \frac{952971.15}{664.81}$$

$\bar{P} = 1433.44 \text{ mm} = \text{Precipitación ponderada máxima}$

Tabla 8*Precipitación anual promedio*

	Area (Km2)	Precipitación anual (mm)	Área * precipitación
A1	69,71	875	60996,25
A2	163,819	1125	184296,375
A3	338,64	1375	465630
A4	68,5	1625	111312,5
A5	19,4012	1875	36377,25
A6	4,74	2250	10665
total	664,8102		869277,375

$$\bar{P} = \frac{869277.375}{664.81}$$

$$\bar{P} = 1307.55 \text{ mm} = \textit{Precipitación ponderada media}$$

Delimitación cuenca

La delimitación realizada para la cuenca de estudio, se realizó trazando líneas que rodean las cumbres que delimitan el área, también llamada como divisoria de aguas,, como se muestra en las Figuras 13 y 14 . Estas líneas guían el flujo del agua hacia cada lado de la divisoria de aguas, dirigiéndola hacia un punto en común en las respectivas cuencas.

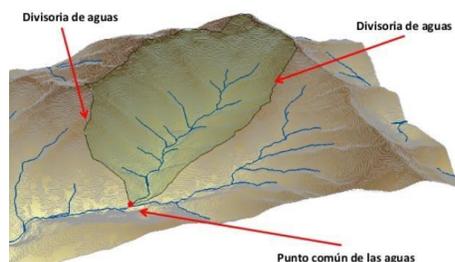
Figura 15*Divisoria de aguas o divortium Aquarium*

Figura 16

Divisoria de aguas

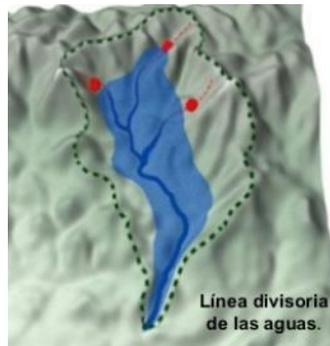


Figura 17

Partes de una cuenca



Parámetros de la cuenca del río san pedro

Se utilizó el software Arc GIS para delimitar la cuenca en el río San Pedro. Esta herramienta ofrece una amplia variedad de comandos que permiten realizar un análisis exhaustivo de la cuenca de interés. De esta manera, se puede obtener el parámetro deseado o transferir los resultados del programa a hojas de cálculo de Excel. Esto proporciona el valor requerido no de forma directa, sino mediante la aplicación de diversos métodos de manejo de datos.

Según (Gaspari, 2000), la modelación hidrográfica de una cuenca, parte de los parámetros morfométricos y funcionales como la forma, el relieve y la red de drenaje. Este análisis permite determinar cómo se mueve y se captura el agua de lluvia en la cuenca.

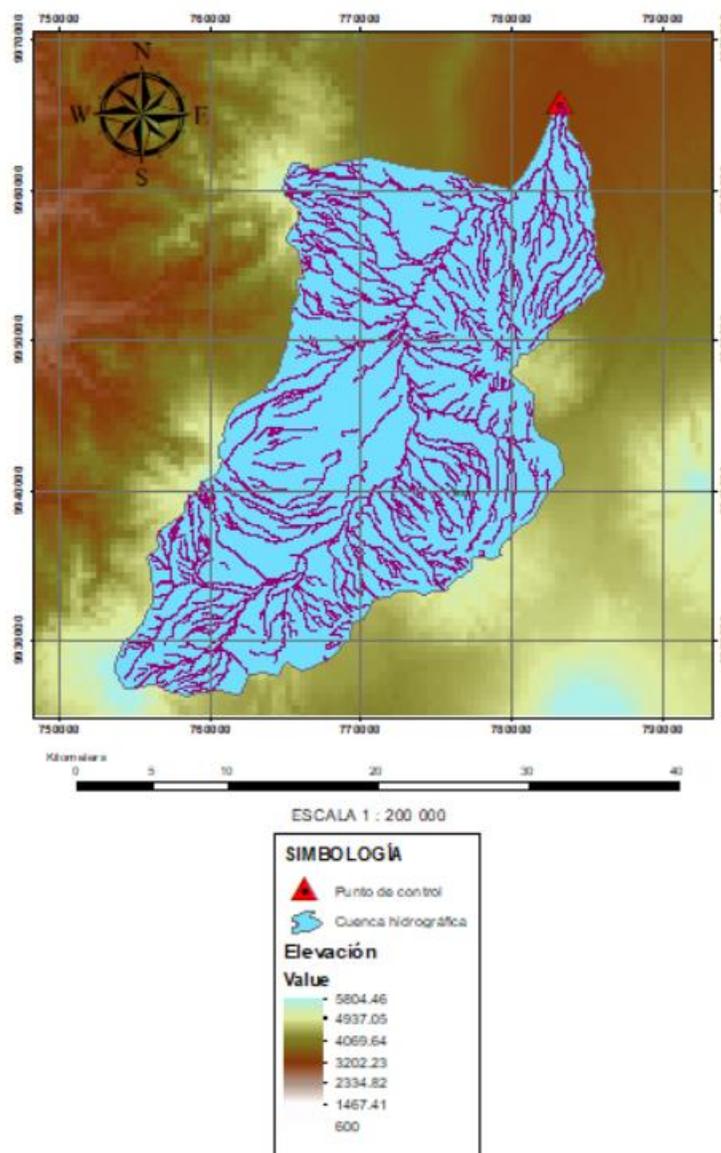
Área (A)

El área se refiere a la superficie que está delimitada por la divisoria de aguas en la zona de estudio. Esta delimitación se realiza utilizando el software ArcGIS y la técnica de polinización de la cuenca, utilizando las coordenadas proporcionadas. Como resultado de este proceso, se genera un Modelo Digital del Terreno (MDT).

En el caso específico de la cuenca del río San Pedro, se utilizó información del Instituto Geográfico Militar (IGM) para su delimitación. Esta información es especialmente útil para trabajar con áreas extensas de terreno, como es el caso de esta cuenca.

Figura 18

Modelo Digital de Elevación (MDE)



Según, (Ruiz & Torres, 2008), un Modelo Digital del Terreno (MDT) es información transformada en una recopilación de datos numéricos en donde se representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, estos datos pueden ser temperatura, elevación, presión, precipitación o altitud.

En el caso específico en que la variable transformada a numeración sea altura del terreno, se denomina Modelo Digital de Elevación (MDE). En la Figura 18, se ilustra la Cuenca del Río San Pedro, utilizando datos almacenados de elevación, procesando información proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM).

El valor obtenido para el Área de la cuenca a través del software fue el siguiente:

Figura 19

Tabla propiedades de la Cuenca del Río San Pedro (Área)

Cuenca hidrográfica					
	FID	Shape *	Id	gridcode	AREA_km2
	0	Polygon	1	0	664.81

$$\text{Área (A)} = 664.81 \text{ km}^2$$

Según (Ibañez Asensio et al., 2011) El área juega un papel fundamental en la relación entre la escorrentía y las características morfológicas de una cuenca, ya que tanto la escorrentía directa como indirecta convergen hacia un mismo cauce natural. La escorrentía superficial puede tener un impacto negativo en la superficie de drenaje, especialmente cuando se encuentran suelos de mala calidad, lo que puede dar lugar a problemas graves de erosión. Por lo tanto, el tamaño del área de una cuenca hidrográfica es un factor crítico que influye en la dinámica de la escorrentía y su impacto en la morfología del terreno.

Perímetro (P)

El perímetro de una cuenca hidrográfica esta definido por la longitud que se traza a lo largo de los límites, bajo la lógica de la divisoria de aguas donde los límites son los puntos más altos de las zonas adyacentes. Este valor se puede obtener utilizando software, el valor obtenido fue el siguiente:

Figura 20

Tabla propiedades de la Cuenca del Rio San Pedro (Perimetro)

Cuenca hidrográfica						
	FID	Shape *	Id	gridcode	ÁREA_km2	PERIMETRO_km
	0	Polygon	1	0	664.81	133

$$\text{Perimetro } (P) = 133 \text{ km}$$

Longitud del cauce principal (L)

La longitud del cauce principal es la medida del recorrido del flujo de agua principal desde el punto más bajo (aguas abajo) hasta el punto más alto (aguas arriba) siguiendo el curso de agua.

Criterio de Campos

Según (Campos & Daniel, 1998), "es posible estimar la longitud del río principal con la relación entre el área y la longitud del cauce.

$$(L)_{CAMPOS} = 1.312 * A^{0.568}$$

Donde:

$$\text{Área } (A) = 664.81 \text{ km}^2$$

Entonces al aplicar la ecuación se tiene

$$(L)_{CAMPOS} = 1.312 * 664.81^{0.568}$$

$$(L) = 52.63 \text{ km}$$

La longitud del río principal es uno de los parámetros más importantes al momento de modelar o analizar una cuenca hidrográfica, pues desempeña un papel fundamental dentro de las ecuaciones e índices morfométricos.

Método ArcGIS

El software crea un trazado del curso principal del río, desde su origen hasta el punto de desembocadura especificado, con el propósito de determinar su longitud a lo largo de toda la cuenca.

Figura 21

Modelo de la cuenca ArcGIS

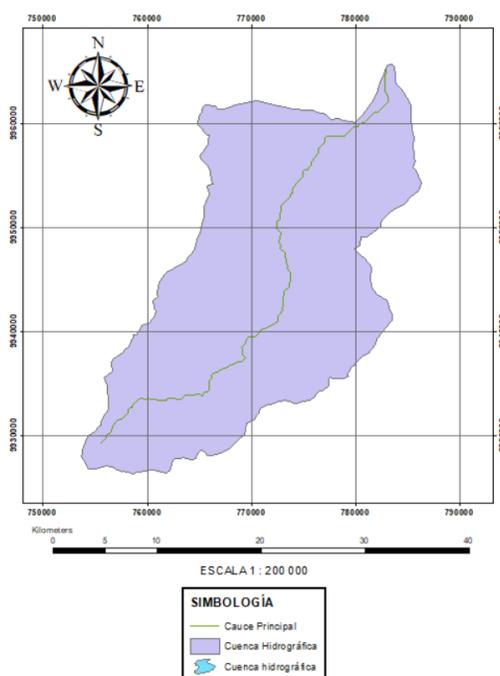


Figura 22

Tabla propiedades del Cauce Principal del Rio San Pedro

Cauce Principal				
	OBJECTID *	Shape *	LONGITUD	Shape_Length
	1	Polyline	56425.9	56475.904483

$$(L)_{ArcGIS} = 56.43 \text{ km}$$

Existe una diferencia significativa entre los valores de longitud del cauce principal calculados utilizando el criterio de Campos y los valores proporcionados por el software ArcGIS debido al detalle y calidad de la información topográfica. Es importante destacar que el primer criterio se basa en un enfoque analítico, mientras que ArcGIS utiliza valores empíricos que se ajustan a la morfología específica de la cuenca. Por lo tanto, se ha tomado la decisión de utilizar el valor obtenido a través del software para el análisis en curso.

$$(L)_{ArcGIS} = 56.43 \text{ km}$$

Longitud axial (L_a)

La longitud axial es el parámetro que representa la distancia existente entre la desembocadura del río, o en su defecto, un punto de control; y el punto más alejado de la cuenca aguas arriba. En la Figura 9 se muestra la herramienta utilizada en el software ArcGIS para calcular este parámetro, y en la Figura 10 se presenta una representación visual de esta medida.

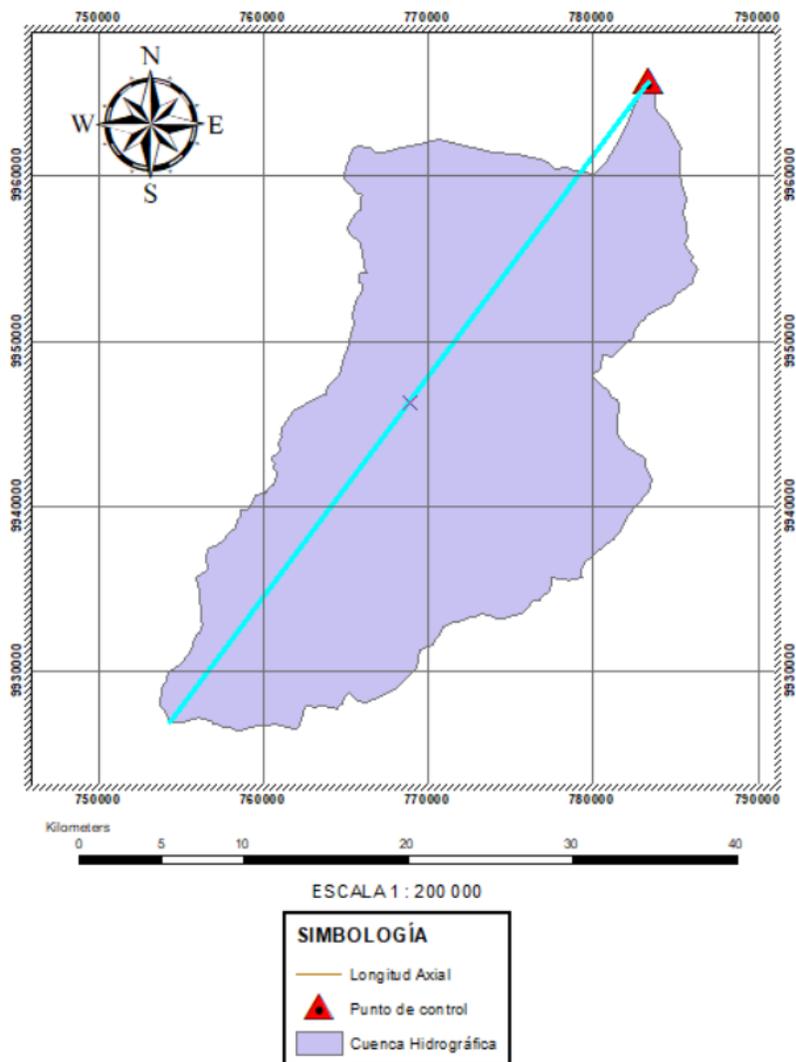
Figura 23

Longitud Axial de la cuenca del río San Pedro.

Longitud Axial			
FID	Shape *	Longitud_km	
0	Polyline	48.53	

Figura 24

Longitud Axial de la cuenca del rio San Pedro



$$Longitud Axial (La) = 48.53 k$$

Ancho promedio (Ap)

Según el estudio de (Gaspari et al., 2013), es la relación dell área de la cuenca y su longitud axial.

$$Ap = \frac{A}{La} \quad (3.2)$$

Donde:

$$\text{Área (A)} = 664.81 \text{ km}^2$$

$$\text{Longitud Axial (La)} = 48.53 \text{ km}$$

Entonces al aplicar la ecuación se tiene:

$$Ap = \frac{664.81 \text{ km}^2}{48.53 \text{ km}}$$

$$Ap = 13.70 \text{ km}$$

El parámetro del ancho es uno de los parámetros más importantes ya que establece la relación entre 2 parámetros básicos de la cuenca, así su resultado nos proporciona una impresión sobre la naturaleza de la cuenca y su comportamiento.

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Según (DE TANCÍTARO, 2004) “ El coeficiente de Gravelius es una medida utilizada para comparar la forma de una cuenca hidrográfica con la forma de una circunferencia, en donde el círculo que está inscrito tiene la misma área de la cuenca analizada Este coeficiente de compacidad relaciona el perímetro de la cuenca con su área en un solo valor para su posterior interpretación”.

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}}$$

Donde:

$$\text{Área (A)} = 664.81 \text{ km}^2$$

$$\text{Perímetro (P)} = 133 \text{ km}$$

Entonces:

$$Kc = \frac{133}{2\sqrt{\pi * 664.81}}$$

$$Kc = 1.46$$

Tabla 9

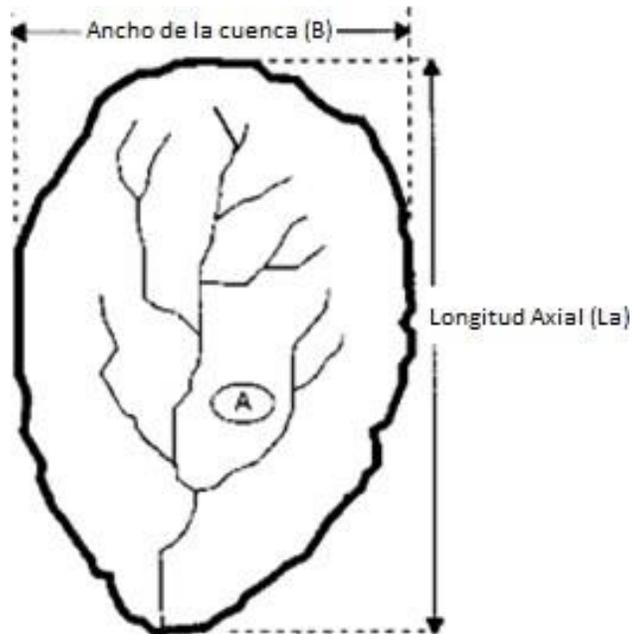
Coefficiente de compacidad (Kc)

Rango de Kc	Clases de compacidad
1-1,25	Redonda a oval redonda
1,25-1,50	De oval redonda a oval oblonga
1,50-1,75	De oval Oblonga a rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular - muy lobuladas

Un índice de Gravelius de 1.46 se interpreta, según la Tabla 10, como una cuenca que va desde una forma oval redonda hasta una forma oval oblonga. Este valor adimensional, cuando se acerca a la unidad (1), indica una cuenca perfectamente circular y sugiere una tendencia notable a acumular grandes volúmenes de agua de esorrentía.

Factor Forma (If)

El factor de forma es un parámetro adimensional que ayuda a determinar cómo se regula el escurrimiento superficial en una cuenca. Se calcula utilizando la ecuación 3.4, la cual proporciona una medida cuantitativa entre el área y la longitud axial de la cuenca.

Figura 25*Factor de forma**Nota: Fuente: (Villón, 2002)*

$$If = \frac{A}{La^2}$$

Donde:

$$\text{Área (A)} = 664.81 \text{ km}^2$$

$$\text{Longitud Axial (La)} = 48.53 \text{ km}$$

Entonces:

$$If = \frac{664.81 \text{ km}^2}{(48.53 \text{ km})^2}$$

$$If = 0.28$$

Tabla 10*Valores interpretativos del Factor de forma*

Valores Aproximados	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,300	Alargada
0,300 – 0,370	Ligeramente alargada
0,370 – 0,475	Ni alargada ni ensanchada
0,475 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80– 1,20	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

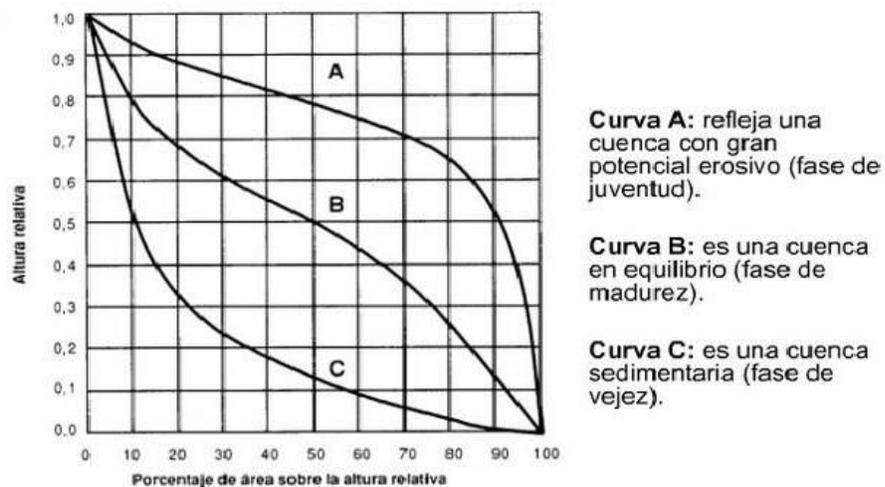
Un factor de forma de 0.28, según se interpreta en la Tabla 11, indica que la cuenca se considera alargada y presenta bajas amenazas de crecidas, ya que el escurrimiento de agua en la cuenca tiene un mayor tiempo de recorrido. En otras palabras, las cuencas alargadas tienden a tener un tiempo de concentración más largo. Esto se traduce en hidrogramas extendidos y caudales más bajos en estas cuencas.

Curva Hipsométrica de la cuenca (Rh)

La curva hipsométrica es una representación gráfica de la distribución de las áreas por encima de cada cota de altitud en una cuenca hidrográfica. Se construye a partir de la información de las curvas de nivel que representan la superficie de la cuenca. La curva hipsométrica muestra la forma de la cuenca, su pendiente y la distribución de las alturas (Metternicht, 2000).

Figura 26

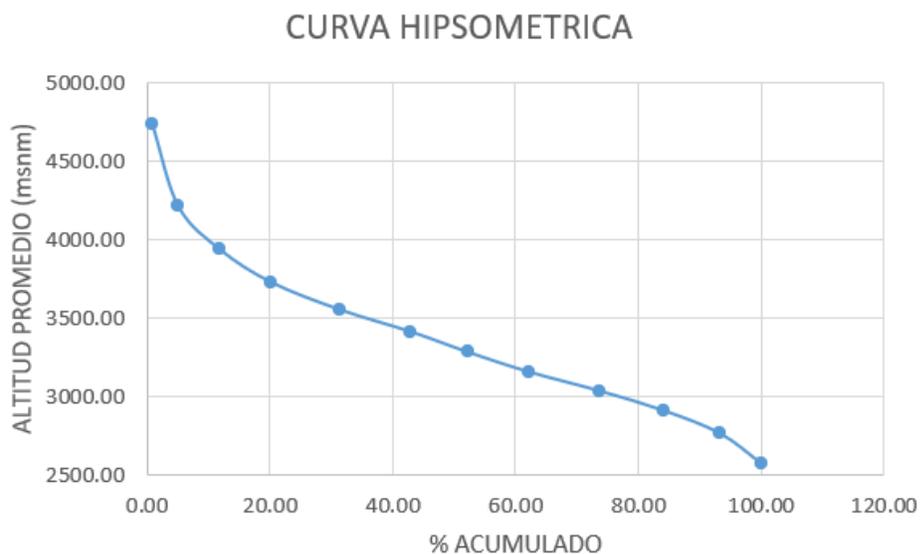
Curvas de cuencas con potenciales evolutivos distintos.



Fuente: Obtenido de: (Domínguez)

Figura 27

Curva Hipsométrica de la Cuenca.



Según la curva hipsométrica de la Figura 27, según (Strahler, 1964) la cuenca analizada se encuentra en un estado de madurez y equilibrio. Tipo B

Histograma de frecuencias altimétricas

Un histograma de frecuencias altimétricas es una representación gráfica de la distribución de las alturas de un conjunto de datos. El histograma se construye dividiendo el rango de alturas en intervalos y contando el número de datos que caen en cada intervalo (Clarke, 1968)

Tabla 11

Determinación para las Frecuencias Altimétricas

COTAS	% DE AREAS
2460 - 2681.88	6.74
2681.88 - 2845.81	9.18
2845.81 - 2974.45	10.38
2974.45 - 3095.92	11.61
3095.92 - 3220.01	9.92
3220.01 - 3348.51	9.15
3348.51 - 3476.80	11.60
3476.80 - 3631.79	11.19
3631.79 - 3826.15	8.36
3826.15	+
4050.75	6.79
4050.75 - 4378.22	4.23
4379.22 - 5098.79	0.84
Sumatoria	100

Desnivel Altitudinal

El desnivel altitudinal es la diferencia de altitud entre dos puntos. Se puede medir en metros o en pies. El desnivel altitudinal es un factor importante en la hidrología porque afecta la cantidad de precipitación que cae en un área, la velocidad de escorrentía y la erosión (Foster, 1982)

Tabla 12

Clases de desnivel altitudinal (msnm)

Rangos de Altitudes	Clase de Altitud
600 - 1220	Bajo
1221 - 1841	Mediano
1842 - 2462	Alto

La elevación máxima de la cuenca es de 5120 m y la mínima es de 2460 m, obteniendo un desnivel de la cuenca de 2660 m. Por lo tanto, se tiene se tiene una cuenca con altitudes altas según la tabla 12.

Pendiente media del cauce principal (Scp)

La pendiente media del cauce principal es un parámetro fundamental debido a su función de proporcionar una idea de la velocidad con la que el flujo desciende por la cuenca. Esto nos permite determinar el potencial del río para erosionar y su poder de arrastre. También nos permite entender el comportamiento del río cuando hay crecidas. Las crecidas son eventos de lluvia intensa que pueden causar grandes cantidades de escorrentía. A continuación se desarrolla la ecuación del parámetro mencionado:

Según (Smith, 1997), es la pendiente promedio de la línea que conecta los puntos más altos de la cuenca. Se puede calcular dividiendo la diferencia de altitud entre los puntos más altos por la longitud del cauce principal.

$$S_{cp} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{m\acute{a}xima} - H_{m\acute{i}nima}}{L} * 100$$

Donde:

S_{cp}: Pendiente media del cauce principal

ΔH: Diferencia de altura punto de control hasta la cota máxima

L: Longitud del cauce principal

Entonces:

$$S_{cp} = \frac{4760 - 2460}{56425.9} * 100$$

$$S_{cp} = 4.08\%$$

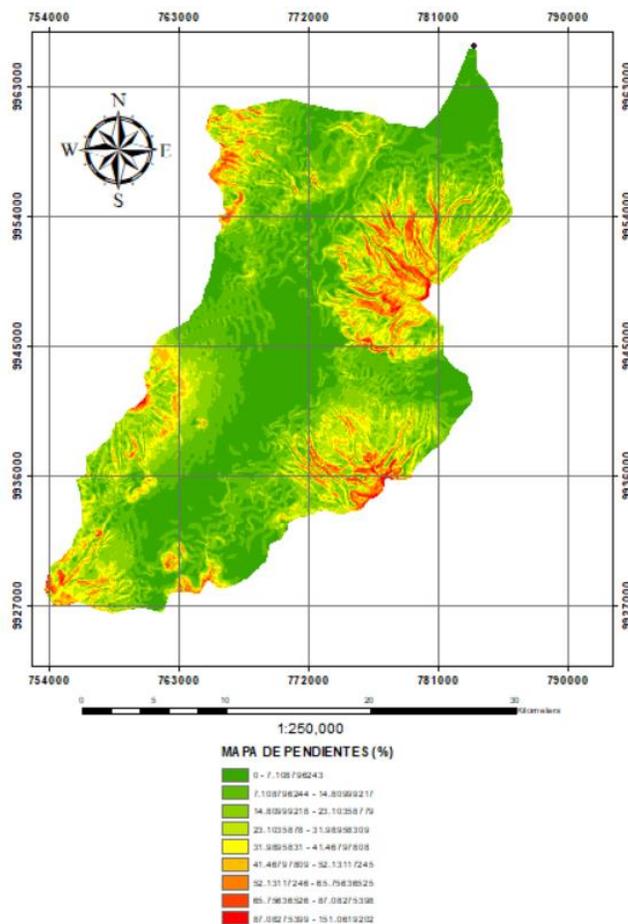
Pendiente de la Cuenca

La velocidad del flujo del agua esta directamente relacionada con el aumento de la pendiente debido a la gravedad como naturaleza del movimiento. Por el contrario, cuando la pendiente promedio de la cuenca es baja, los picos de crecida tienden a ser menos agresivos(Delgadillo & Moreno A., 2013).

El software ArcGIS fue empleado para llevar a cabo la clasificación de pendientes en porcentaje (%) utilizando las herramientas Slope y Reclassify. De esta manera, se obtuvieron los datos que se muestran en la Figura 46.

Figura 28

Mapa de pendientes media de la Cuenca



El valor resultante del software fue el siguiente:

Figura 29

Pendiente media de la cuenca (%)

Tabla_resultados			
Rowid	MIN	MAX	Pendiente media de la cuenca
1	0	151.06	18.79

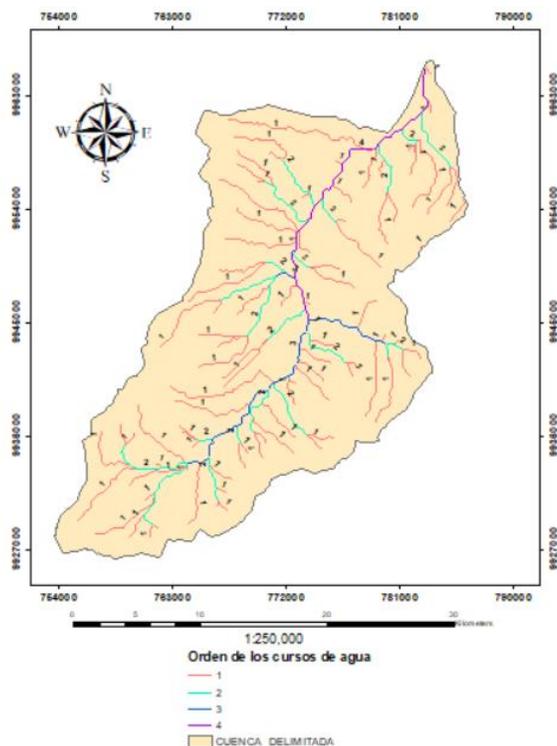
Número de Orden de los cursos de agua

El número de orden de un curso de agua es una medida de su tamaño y complejidad. Se define como el número de bifurcaciones que un curso de agua tiene. Un curso de agua de primer orden es un arroyo que no tiene afluentes (Strahler, 1964). Un curso de agua de segundo orden es un arroyo que tiene dos afluentes de primer orden. Un curso de agua de tercer orden es un arroyo que tiene dos afluentes de segundo orden, o un afluente de primer orden y un afluente de segundo orden. Y así sucesivamente.

Con el software ArcGis se procede a clasificar y enumerar los ríos y corrientes que fluyen desde las fuentes más altas de una cuenca hasta su punto final, ya sea su cierre o desembocadura. Esto incluye las divisiones de aguas que se presenten en el trayecto. Se obtuvo el siguiente orden:

Figura 30

Mapa del orden de los Recursos de Agua



Densidad de Drenaje (Dd)

La densidad de drenaje es un valor que describe la complejidad de una red de drenaje. Es la longitud total de los afluentes de una cuenca hidrográfica dividida por el área de la cuenca. Una densidad de drenaje alta indica que la red de drenaje es compleja y tiene muchos cauces, mientras que una densidad de drenaje baja indica que la red de drenaje es simple y tiene pocos cauces (Horton, 1945).

$$D_d = \frac{L + \sum l_i}{A_c}$$

Donde:

<i>D_d</i> : Densidad de drenaje	km/km ²
<i>L</i> : Longitud del cauce principal	56.48 km
<i>A</i> : Área de la cuenca	664.81 km ²
<i>l_i</i> : Longitud de afluentes que aportan al río principal	352.04 km

Entonces:

$$D_d = \frac{56.48 + 352.04}{664.81}$$

$$D_d = 0.61 \frac{km}{km^2}$$

Tabla 13*Valores interpretativos de la densidad de drenaje*

Densidad de drenaje (km/km²)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy alta

El resultado del análisis de la densidad de drenaje fue de 0.61, lo que se encuentra en la categoría baja según la Tabla 14. Esto implica que la capacidad de drenar y evacuar el volumen de agua se ve reducida debido a esta baja densidad de drenaje.

Coefficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad se encontró bajo el método de Cowan debido a la falta de información granulométrica y estudio de suelos en los taludes del punto de control, este método es práctico y de uso muy frecuente, estimando de manera correcta y efectiva cada coeficiente es el mejor método para estimar el coeficiente de rugosidad (Terry Cerdeña, 2019).

En la siguiente tabla se observan el rango de los valores para estimar el coeficiente de rugosidad por el método de Cowan.

$$C = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * n_5$$

Figura 31

Valores de N para coeficiente de rugosidad

Condiciones del cauce		Valores	
Material considerado	Tierra	n0	0.030
	Roca cortada		0.025
	grava fina		0.024
	grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	liso	n1	0.000
	menor		0.005
	moderado		0.010
	severa		0.020
Variación de sección transversal	gradual	n2	0.000
	ocasionalmente alternante		0.005
	frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de obstrucciones	despreciable	n3	0.000
	menor		0.010-0.015
	apreciable		0.020-0.030
	severo		0.040-0.060
Vegetación	baja	n4	0.005-0.010
	media		0.010-0.020
	alta		0.025-0.050
	muy alta		0.050-0.100
Cantidad de meandros	menor	n5	1.000
	apreciable		1.150
	severa		1.300

Se estima los coeficientes de acuerdo con los materiales vistos en el punto de control

$N_0=0.025$ Roca cortada

$N_1=0.005$ menor

$N_2= 0.000$ gradual

$N_3= 0.001$ menor

$N_4=0.020$ media

$N_5= 1.00$

$C=0.051$

Para comprobar el coeficiente de rugosidad recurriremos a la tabla propuesta (Te Chow et al., 1988), donde se especifican coeficientes para diferentes tipos de cauce

Figura 32

Coeficiente de rugosidad *Ve Ten Chow*

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 bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos 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 inundadas			
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	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase 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 follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Saucos densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento 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 <i>n</i> son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Basándonos en la geomorfología de la cuenca podemos decir que es un curso montañoso carente de vegetación en el fondo, con laderas pronunciadas y árboles en las laderas. Además, que en el cauce se puede encontrar grava, cantos rodados y algunas rocas.

Por lo tanto:

$$C=0.05$$

Tiempo de concentración

Se calculo el tiempo de concentración con 4 diferentes fórmulas para obtener un promedio. Según el criterio de Kirpich (Paulet, 1982) se presenta la siguiente ecuación

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{56.43}{0.0408^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración

L= Longitud del cauce principal 56.43 km

Scp= Pendiente del cauce principal 4.08 %

Tc=5.06

$$T_c = 1.796 * A^{0.325} * L^{-0.0965} * S^{-0.290}$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración en minutos

A= Area de la cuenca= 664.81 km²

L= Longitud del cauce principal = 56.43 km

Scp= Pendiente del cauce principal= 4.08%

Tc= 6.36 horas

Según (Iroume, 1997) el criterio de Giandotti se calcula con la siguiente ecuación

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{0.8 * \sqrt{H}}$$

Donde:

Tc=Tiempo de concentración

A=Área de la cuenca 664.81 km²

L= Longitud del cauce principal 56.43 km

H=Diferencia de altura del cauce = 4760 – 2460 = 2300 m

Tc=4.85 horas

$$T_c = 0.2734 * 56.43^{0.64} * 0.0408^{-0.32}$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración

L= Longitud del cauce principal 56.43 km

S= Pendiente del cauce principal 4.08%

Tc=10.05 horas

Fórmula Goroshkov (1979)

Se establece que con una velocidad conocida se puede obtener o comprobar el tiempo de concentración según la pendiente y el terreno, Según el Autor una velocidad para un terreno de media montaña será de 1.0 a 2.0m/s. Por consiguiente, tomaremos una velocidad de 1.0 m/s

Con la siguiente ecuación

$$T_c = 0.28 * \frac{L}{v}$$

$$T_c = 0.28 * \frac{56425.9 \text{ m}}{1.0 \text{ m/s}}$$

$$T_c = 4.39 \text{ horas}$$

Fórmula de Temez

$$T_c = 0.30 * \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}}$$

Dónde:

Tc = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del curso principal en kilómetros. . =56.43

S = Pendiente a lo largo del cauce en m/m. = 0.0468

Tc=11.80

Tabla 14*Tabla Resumen tiempo de concentración*

Autor	Tiempo de concentración Tc
Giandotti	4.85
Ven T chow	10.05
Temez	11.80
Valencia y Zuluaga	6.36
Kirpich	5.06
Goroshkov	4.39

Coefficiente de escorrentía

Este método es utilizado por la (USDA United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 1999) y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial frente a un periodo de lluvia máxima que se presenta en 24 horas, también se toma en cuenta la infiltración de diferentes factores que son:

- Características del suelo
- Uso del Suelo
- Cobertura Vegetal

Grupo hidrológico

Para el cálculo se utilizó el SIG de suelos del INAMHI para procesar las áreas de la cuenca y conocer su cobertura vegetal, así obteniendo la figura 29

En donde se agrupo las clases de cobertura en porcentajes respecto al área

Posteriormente se procesó la información con los números de escurrimiento según (Aparicio Mijares, 2003). Obteniendo así la siguiente tabla con el CN calculado con la siguiente ecuación

$$CN = \frac{1}{A} (A_1 * CN_1 + A_2 * CN_2 + A_3 * CN_3 + \dots + A_N * CN_N)$$

Donde:

CN=Número de curva

An= Área que abarca las características del terreno

A= área de la cuenca

Figura 33

Tabla resumen tipo de cobertura

Cobertura vegetal				
ITEM	Cobertura Vegetal	Área (km ²)	Área %	% Área Acumulada
0	Áreas erosionadas	3,13	0,00471	
1	Áreas erosionadas	0,84	0,00127	1,47%
2	Áreas erosionadas	1,87	0,00282	
3	Áreas erosionadas	3,93	0,00591	
4	Asentamiento poblado	0,91	0,00137	0,14%
5	Bosque natural	0,12	0,00018	
6	Bosque natural	0,21	0,00031	
7	Bosque natural	0,02	0,00002	
8	Bosque natural	0,08	0,00012	7,64%
9	Bosque natural	3,54	0,00533	
10	Bosque natural	3,79	0,00570	
11	Bosque natural	0,09	0,00014	
12	Bosque natural	42,97	0,06464	
13	Bosque natural - Pastos plantados	10,24	0,01540	1,54%
14	Bosque natural intervenido	0,93	0,00140	0,14%
15	Cultivos bajo invernadero	2,26	0,00340	
16	Cultivos bajo invernadero - Pastos plantados	9,61	0,01445	1,78%
17	Cultivos de ciclo corto	1,85	0,00278	
18	Cultivos de ciclo corto	1,60	0,00240	
19	Cultivos de ciclo corto	20,94	0,03150	
20	Cultivos de ciclo corto	1,62	0,00243	
21	Cultivos de ciclo corto	3,79	0,00569	15,73%
22	Cultivos de ciclo corto	1,80	0,00270	
23	Cultivos de ciclo corto	30,46	0,04581	
24	Cultivos de ciclo corto	3,87	0,00582	
25	Cultivos de ciclo corto	2,73	0,00410	
26	Cultivos de ciclo corto	35,94	0,05407	
27	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	11,65	0,01752	
28	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	8,47	0,01274	
29	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	1,50	0,00225	
30	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	19,73	0,02968	8,27%
31	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	6,03	0,00907	
32	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	1,05	0,00159	
33	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	6,53	0,00982	
34	Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados	0,00	0,00000	
35	Maíz	1,23	0,00186	
36	Maíz	3,57	0,00538	0,95%
37	Maíz	1,50	0,00225	
38	Maíz - Pastos plantados	1,60	0,00241	0,59%
39	Maíz - Pastos plantados	2,29	0,00345	
40	Nieve, glaciares	4,13	0,00622	
41	Páramo	33,30	0,05009	
42	Páramo	0,67	0,00101	
43	Páramo	0,00	0,00000	
44	Páramo	1,41	0,00211	19,37%
45	Páramo	35,68	0,05367	
46	Páramo	11,76	0,01769	
47	Páramo	5,76	0,00867	
48	Páramo	36,06	0,05424	
49	Páramo	0,00	0,00000	
50	Páramo intervenido	0,07	0,00010	
51	Páramo intervenido	2,09	0,00314	0,39%
52	Páramo intervenido	0,29	0,00043	
53	Páramo intervenido	0,12	0,00018	
54	Páramo intervenido	0,00	0,00000	
55	Pastos plantados	0,98	0,00147	
56	Pastos plantados	3,10	0,00466	36,92%
57	Pastos plantados	202,79	0,30503	
58	Pastos plantados	11,15	0,01677	
59	Pastos plantados	27,41	0,04123	
60	Plantaciones forestales	0,31	0,00047	
61	Plantaciones forestales	2,85	0,00429	1,01%
62	Plantaciones forestales	2,91	0,00438	
63	Plantaciones forestales	0,65	0,00098	
64	Plantaciones forestales - Cultivos de ciclo corto	0,27	0,00040	
65	Plantaciones forestales - Cultivos de ciclo corto	0,41	0,00062	0,91%
66	Plantaciones forestales - Cultivos de ciclo corto	5,39	0,00811	
67	Vegetación arbustiva	7,37	0,01108	
68	Vegetación arbustiva	2,60	0,00390	3,16%
69	Vegetación arbustiva	3,26	0,00490	
70	Vegetación arbustiva	4,58	0,00688	
71	Vegetación arbustiva	1,17	0,00176	
72	Vegetación arbustiva	2,01	0,00302	
	Área	664,81	100,00%	100,00%

Tabla 15*Resumen CN*

Uso de suelo	USO DE SUELO	Area (km2)	CN (B)	Area*CN
Areas erosionadas	Caminos de terraceria	9,78	82	801,76
asentamiento Poblado	caminos con superficie dura	0,91	84	76,40
Bosque natural	Bosques Naturales muy espeso	50,82	44	2236,00
Pastos plantados	Pastizales	10,24	67	685,91
Bosque intervenido	Bosque natural muy ralo	0,93	75	69,79
Cultivos bajo invernadero	Sin cultivo	11,87	86	1020,51
cultivos de ciclo corto	cultivo en surco	104,58	81	8471,19
cultivos de ciclo corto, pastos plantados	Praderas con rotación	54,95	72	3956,62
Maiz	cultivo en surco	6,31	81	510,88
Maiz- pasto plantado	praderas en rotación	3,89	72	280,39
páramo	Bosque Natural normal	128,78	60	7726,54
páramo intervenido	Pradera Permanente	2,56	58	148,57
pastos plantados	Pastizales	245,42	79	19388,09
plantaciones forestales	Bosque Natural muy Espeso	6,73	44	296,13
Plantaciones forestales - Cultivos de ciclo corto	pradera con rotación	6,07	72	436,85
Vegetación arbustiva	Bosque natural espeso	20,98	52	1090,71
	TOTAL	664,81	1109	47196,35
			CN	71,0

El método del número de curva permite relacionar la precipitación en 24 horas con la precipitación efectiva (P_e). Mediante la siguiente ecuación

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

P= precipitación de un evento en 24 horas

P_e = precipitación efectiva

S=almacenaje máximo de la captación mm

Según los datos del INAMHI en la estación M0003 Izobamba, la máxima precipitación se efectúa en Abril.

Figura 34

Resumen precipitación máxima Abril

Año	Prcipitación máxima 24 horas (mm)		
1962	134	1991	95,4
1963	176,8	1992	178,1
1964	314,8	1993	234,1
1965	284	1994	220,6
1966	159,3	1995	168,8
1967	72,8	1996	237,4
1968	143,3	1997	168,1
1969	275	1998	264,7
1970	154,3	1999	152,3
1971	111,7	2000	231,4
1972	177,6	2001	133,6
1973	234,4	2002	248
1974	173,2	2003	183,7
1975	166	2004	150,4
1976	234,2	2005	115,7
1977	130,4	2006	262
1978	188	2007	264,3
1979	154,1	2008	257
1980	153,4	2009	189,9
1981	240,9	2010	289,2
1982	176,3	2011	262,4
1983	230,6	2012	219,3
1984	261,4	2013	101,9
1985	104,7	2014	141,6
1986	251,9	2015	152,2
1987	159,6	2016	318,7
1988	351,5	2017	163,5
1989	156,5	2018	176,1
1990	292,5	2019	155,4
		2020	222
		2021	325,8
			351,5

Precipitación máxima mes de Abril= 351.5 mm

Se obtiene el almacenaje máximo con el CN calculado

$$S = \frac{25400}{64} - 254$$

$$S = 142.875 \text{ mm}$$

$$P_e = \frac{(351.5 - 0.2 * 142.88)^2}{351.5 + 0.8 * 142.88}$$

$$P_e = 223.87 \text{ mm /24h}$$

Finalmente obtuvimos el coeficiente de escorrentía mediante la siguiente expresión

$$C = \frac{P_e}{P}$$

$$C = \frac{223.87}{351.5}$$

$$C = 0.63$$

Tabla 16

Valores del coeficiente K3

Valores del coeficiente K3	
Características de la cuenca	K3
Cuenca llana y permeable	0.5 a 0.7
Cuenca ondulada	0.5 a 1.2
Cuenca montañosa e impermeable	1.2 a 1.5

K1= Factor de extensión de la cuenca

K2= Factor de la lluvia media anual

K3= Factor de la pendiente y de la permeabilidad del suelo

A=Área de la cuenca = 644.81 km²

P= precipitación media anual =1307.55 mm

$$k1 = 3.7 * 644.81^{-0.152} = 1.384$$

$$K2 = 0.71 * \ln(1307.55) - 3.51 = 1.584$$

El valor de K3 lo obtuvimos de la tabla , tomando de acuerdo con las características de la cuenca K3=1.2

$$C = 0.25 * 1.384 * 1.584 * 1.2$$

$$C = 0.65$$

Fórmula Anónima

$$c = K1 + K2 + K3 + K4$$

Los valores de los valores K se obtuvieron de la siguiente tabla

Tabla 17

Tabla valores de K

Pendiente	K1	Permeabilidad	K2
>0.3	0.4	Roca	0.2
De 0.1 a 0.3	0.3	Arcilla	0.15
De 0.05 a 0.1	0.2	Limos	0.10
Áreas planas	0.05	Arenas	0.05
Cobertura vegetal	K3	Capacidad de almacenamiento	K4
Nada	0.20	Nada	0.20
Poca	0.15	Poca	0.15
Media	0.10	Media	0.10
Mucha	0.05	Mucha	0.05

$$K1 = 0.4$$

$$K2 = 0.05$$

$$K3 = 0.10$$

$$K4=0.10$$

$$C = 0.4 * 0.05 * 0.05 * 0.10$$

$$C=0.6$$

Formulo de Keller

$$C = a - \frac{b}{p}$$

Donde:

a= es un coeficiente que oscila entre 0.88 y 1.00, el mayor para cuencas torrenciales

=0.90

b= es un coeficiente que oscila entre 350 y 460, el mayor para cuencas torrenciales =

460

P=Precipitación media anual =1307.55 mm

$$C = 1 - \frac{460}{1307.55}$$

$$C=0.55$$

Tabla 18

Resumen coeficiente de escorrentía

Autor	Coeficiente de escorrentía C
Nadal	0.65
Anónimo	0.6
Keller	0.55
Numero de curva (SCS)	0.63

Se realiza el promedio de todos los valores del coeficiente de escorrentías calculadas, exceptuando el método del número de curva (SCS). Ya que este método trabaja con

precipitaciones de un evento específico. Por lo tanto el promedio del valor de escorrentía por los autores Nadal, Anónimo, Y Keller es:

$$C=0.6$$

Mientras tanto que el modelo para usar la formula racional tendrá un coeficiente de escorrentía de

$$C=0.63$$

Tabla 19*Resumen parámetros morfológicos e hidrológicos de la cuenca*

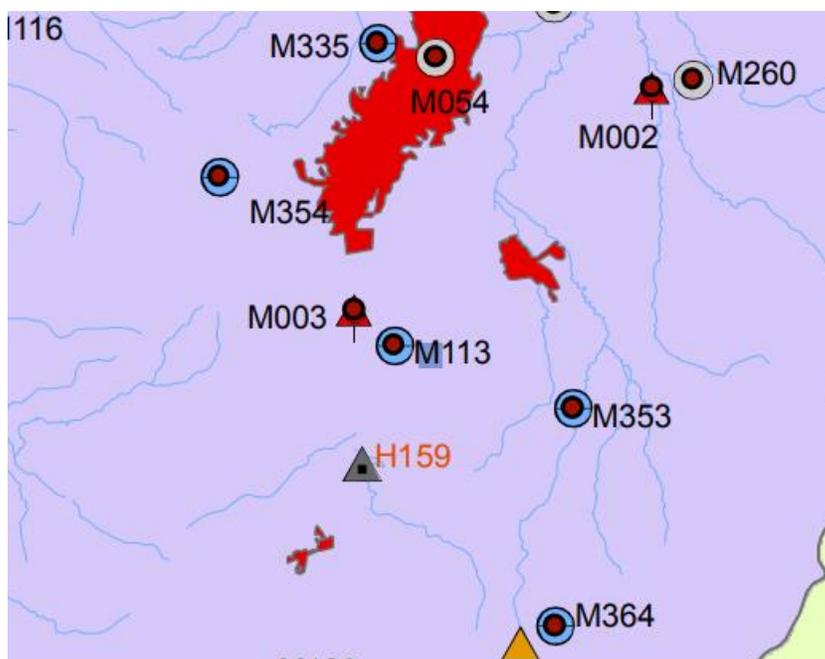
Item.	Parámetro	Simbología	Valor	Unidad de medida	Descripción
1	Área	A	664,81	km ²	Valor obtenido del trazo de la cuenca en ArcGIS, y comprobado en AutoCAD.
2	Perímetro	P	133	km	Longitud de línea trazado por los límites de la cuenca, Valor obtenido mediante ArcGIS y comprobado en AutoCAD.
3	Longitud del cauce	L	56,48	km	Medida de escurrimiento principal de la cuenca,
4	Longitud axial	La	48,53	km	Longitud entre el punto de control hacia el punto más alejado de la cuenca.
5	Ancho promedio	Ap	13,7	km	
6	Coefficiente de Compacidad	Kc	1,46	S/U	Indica tendencia a una cuenca oval redonda a oval oblonga, confirmado por el gráfico obtenido de la cuenca
7	Factor de forma	If	0,28	S/U	Indica como se regula el escurrimiento superficial, dando como resultado una cuenca alargada
8	Densidad de drenaje	Dd	0,61	km/km ²	Baja capacidad de desalojar agua.
9	Pendiente del cauce	--	4,08	%	Parámetro que permite determinar la velocidad del flujo, y su comportamiento ante una crecida
10	Pendiente de la cuenca	--	18,79	%	Terreno ligeramente escarpado

Datos hidrológicos

Como parte del modelamiento de datos meteorológicos , será necesario recopilar datos de precipitación los cuales según la ubicación y la disponibilidad de datos en las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015) se obtuvieron en línea, y los faltantes se solicitaron por correo electrónico a la entidad. Bajo estos criterios se escogió la estación M003 Izobamba (Fig 33), la cual nos proporcionó datos hasta el 2012, por lo que se tuvo que solicitar directamente al INAMHI los datos más actuales de la estación.

Figura 35

Mapa de estaciones meteorológicas (INAMHI 2023)



El INAMHI establece, opera y mantiene la red de estaciones hidrometeorológicas de toda la zona continental e insular del país. Esta Institución proporciona información hidrometeorológica la cual es útil para realizar proyectos hidrológicos donde se requieran datos de las condiciones climatológicas del Ecuador (INAMHI, 2015)

Estación Izobamba:

- Código: M0003
- Provincia: Pichincha
- Latitud: -0.365833
- Longitud: -78.555000
- Altitud: 3058 msnm
- Tipo: Meteorológica
- Propietario: INAMHI

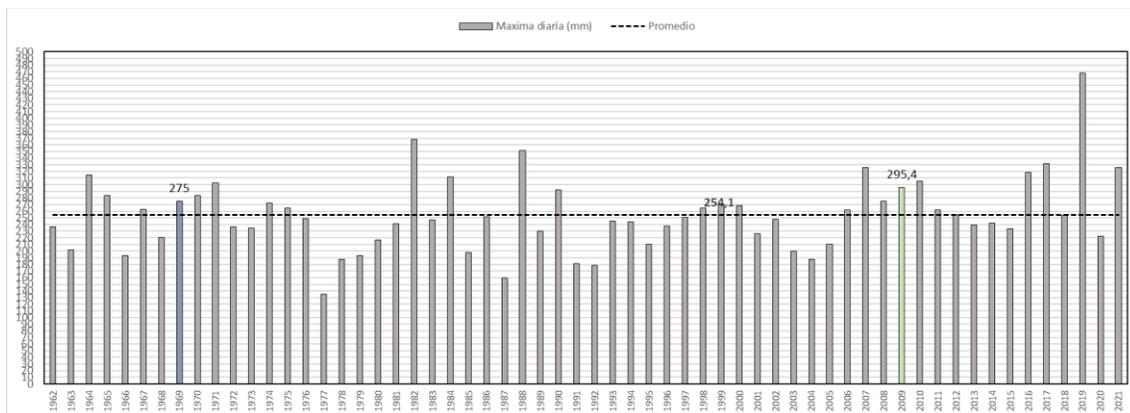
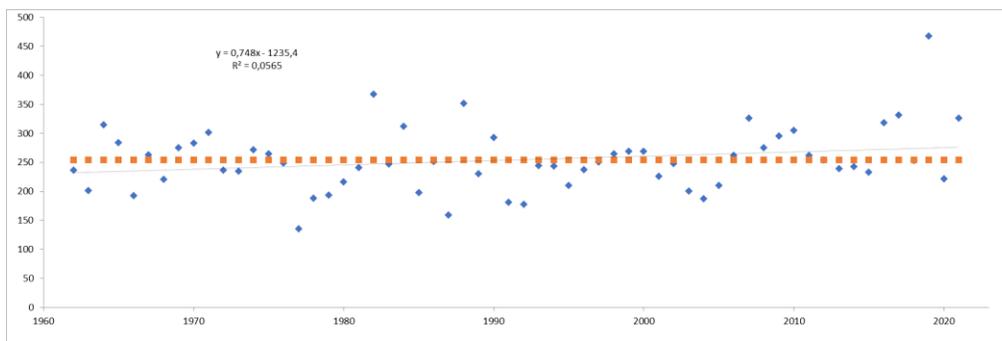
Tabla 20

Datos Estación Izobamba

codigo	año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	suma	media	Máximo
M0003	1962		176,2	236,4	134	121,3	94,8	6,1	13,1	39,5	74,3	162,3	52,4	1110,4	92,53	236,4
M0003	1963	199,5	185,3	201,6	176,8	97,6	59,2	60	29,7	41,5	102,3	107,3	176,9	1437,7	119,81	201,6
M0003	1964	57,9	59,2	86,1	314,8	83	84,7	43,2	71,7	32	93,1	169,4	112,5	1167,6	97,30	314,8
M0003	1965	159,9	67,3	198,6	294	157,5	2,5	5,3	10	143,5	209,5	236,8	129,8	1604,9	133,73	294
M0003	1966	91,3	123,3	112,4	159,3	193	84,7	30,7	24,5	65,6	154,6	107,9	95,2	1242,5	103,54	193
M0003	1967	147,8	262,8	176	72,8	118,4	61,9	21,9	14,2	39	195,2	72,5	38,9	1221,4	101,78	262,8
M0003	1968	80,6	159	220,5	143,3	28,7	69,2	28,6	56,7	103,8	155,1	133,9	77,2	1256,6	104,72	220,5
M0003	1969	269,8	222,5	275	158,6	106,6	0,7	16,5	153,4	174,2	146,2	217,6	174,1	1455,9	121,33	275
M0003	1970	160,5	283,5	119,6	154,3	211,4	52,2	8,3	27,3	78,5	104,9	236,8	159,1	1596,5	133,04	283,5
M0003	1971	222,6	302	286,8	111,7	107,7	154,2	4,3	56,9	107,9	203,9	130,6	106,9	1795,5	149,63	302
M0003	1972	218,4	155,1	236,2	177,6	134,4	98	7,1	41,1	28,4	77	227,9	119,2	1520,4	126,70	236,2
M0003	1973	91,1	79,1	186	234,4	188,7	91	60,9	45,4	113,5	132	75,5	114	1411,6	117,63	234,4
M0003	1974	81,8	214,9	196,5	173,2	126,5	97,3	24,2	39,7	108,7	272,1	195,6	175,9	1706,5	142,21	272,1
M0003	1975	105,3	264,4	191,7	166	155,4	25,7	126,1	47,9	76,8	174,1	190,5	131	1654,9	137,91	264,4
M0003	1976	129	155,8	248,7	234,2	134,1	47,6	7,5	20,2	40,1	83,8	128,3	112	1341,3	111,78	248,7
M0003	1977	135,2	101,6	133,7	130,4	57,9	111,2	28,5	64	123,1	97,9	41,4	134,4	1159,3	96,61	135,2
M0003	1978	77,7	77,5	172,5	188	169	8,7	68,3	55,8	103,2	37,4	66,5	129	1153,6	96,13	188
M0003	1979	71,2	49,9	193,4	154,1	165,9	47,2	28,3	76,6	175	62,6	59,7	31,8	1118,7	93,23	193,4
M0003	1980	76,2	152	119,6	153,4	64,4	31,1	14,3	36,7	63,4	216,4	172,7	77,6	1177,8	98,15	216,4
M0003	1981	95,4	168	223,8	240,9	93,6	76,8	49,1	81,2	40,9	190,6	161,7	142,3	1564,3	130,36	240,9
M0003	1982	211,5	125,8	157	176,3	228,6	31,9	34,4	1,2	99,2	161,4	184,8	367,9	1780	148,33	367,9
M0003	1983	133,2	87,1	205,4	230,6	215,6	60,9	19,2	40,7	58,5	121,2	137,2	247,1	1556,7	129,73	247,1
M0003	1984	69,7	311,8	213,3	261,4	174,5	68,9	28,2	54,8	145,2	163,5	200,3	116,5	1806,1	150,51	311,8
M0003	1985	126,3	32,1	69,4	104,7	197,7	54,3	23,3	48,5	90,7	68,1	62,3	106,2	983,6	81,97	197,7
M0003	1986	186,4	124,8	143,5	251,9	203,6	25,7	2	21,3	75,1	163,1	152,8	66,8	1417	118,08	251,9
M0003	1987	114	82,2	126,5	159,6	118,9	15,9	37,3	50,5	108,6	116	40,8	24,3	994,6	82,88	159,6
M0003	1988	156,6	219,5	32,9	351,5	187,2	101,8	42,1	68,6	134,6	164,1	215,7	96,9	1771,5	147,63	351,5
M0003	1989	230	188,7	200	156,5	100,1	112,2	40,6	24,5	118,6	186,4	39,2	20,4	1417,2	118,10	230
M0003	1990	76,7	157,4	62,4	292,5	85,7	15,2	65,4	25,1	43,5	190,6	48,6	74,1	1137,2	94,77	292,5
M0003	1991	125,4	104,7	180,8	95,4	147,7	90,9	43,9	14,4	116,7	133,5	138,8	142,3	1334,5	111,21	180,8
M0003	1992	53,9	80	98,6	178,1	121,8	37,4	24,7	17,4	114,9	118,8	88,5	92,7	1026,8	85,57	178,1
M0003	1993	141,9	227,3	237,4	234,1	130,5	9,5	21,7	17,1	91,4	88	102,3	244,9	1546,1	128,84	244,9
M0003	1994	180,6	211,7	244	220,6	224,7	11,5	24,5	7,6	86,8	75,2	197,4	159,5	1643,8	136,98	244
M0003	1995	53,9	61,4	208,4	168,8	107,9	84,8	53,2	100,5	50,7	137,1	209,9	124,9	1361,5	113,46	209,9
M0003	1996	160,9	220,7	223,7	237,4	212,5	75,2	30	39,8	45,6	163,6	74,2	83,6	1567,2	130,60	237,4
M0003	1997	233,4	102	194,9	168,1	104,1	112,8	4,6	17	71,1	150,5	250,3	195,3	1604,1	133,68	250,3
M0003	1998	83,1	143,2	205,9	264,7	224,9	49,6	37,6	72	97,4	192,5	181,4	44,7	1557	129,75	264,7
M0003	1999	93,4	251,3	269,5	152,3	201	134,5	7,9	43,6	157,2	104,2	160,3	192,5	1767,7	147,31	269,5
M0003	2000	161,2	184,6	268,8	231,4	250,5	137,7	42,6	28,8	167,7	49,9	57,9	73,7	1654,8	137,90	268,8
M0003	2001	144,8	168,2	226,3	133,6	102	38,2	36,1	12,4	91,4	7,9	119	192,6	1272,5	106,04	226,3
M0003	2002	94	93,4	201,4	248	132,7	69,7	26,5	11,8	22,9	129,6	185	243,6	1458,6	121,55	248
M0003	2003	144,7	104,4	111,5	183,7	118	117,8	7,9	32,2	101,3	153,2	200,1	110,5	1385,3	115,44	200,1
M0003	2004	59,8	66,1	74,8	150,4	147,8	24,3	28,6	31,1	88,7	136,3	193,7	187,1	1129,6	94,98	157,7
M0003	2005	33,3	201,4	210,2	115,7	100,1	66,8	50,6	53,9	84,1	83,7	105,8	159,4	1385	105,42	210,2
M0003	2006	93,3	188,8	167,5	262	76,3	92,2	13,1	23,6	51,6	76,5	245,9	174,6	1465,4	122,12	262
M0003	2007	171,3	55,1	229,9	264,3	243,6	59,7	62,6	34,8	16,4	201,9	326,2	117,8	1783,6	148,63	326,2
M0003	2008	246,6	275,5	263,5	257	216,4	111,5	28,5	96,7	103,1	199,5	108	126	2032,3	169,36	275,5
M0003	2009	295,4	186,6	262,4	189,9	102,8	48,2	7,1	29	9,7	86,4	88,8	209,9	1516,2	126,35	295,4
M0003	2010	45,6	103,7	114,2	289,2	149,2	196,2	52,5	79,5	89,7	249,4	304,8	177,4	1478,7	123,23	304,8
M0003	2011	138,3	193,3	143,7	262,4	92,8	61,4	69,4	76,7	56,9	197,6	30,4	164,9	1487,8	123,98	262,4
M0003	2012	254,3	227,3	197,4	219,3	64,9	10,6	19,8	20	20,5	167	169	30,5	1400,6	116,72	254,3
M0003	2013	43,7	230,5	128,1	101,9	239	9,8	8,3	43,5	38,9	191,5	45,9	79,6	1160,7	96,73	239
M0003	2014	177,9	135,4	242,3	141,6	186,9	43,3	12,5	49,9	78,5	132,1	112,8	79,8	1393	115,08	242,3
M0003	2015	94,9	78,9	233,3	152,2	102,4	10,6	30	6,6	21,4	118,2	193,4	49,7	1091,6	90,97	233,3
M0003	2016	166,6	103,7	185,2	318,7	131,4	44,3	18,4	10,6	82	110,9	28,9	193,3	1394	116,17	318,7
M0003	2017	171,3	170,6	331,1	161,5	227,7	149,7	5,1	42,1	53,8	113	124,4	170,4	1722,7	143,56	331,1
M0003	2018	84,9	181,3	217,4	176,1	191,5	30,2	12	23,9	45,4	89,1	253,1	44,7	1349,6	112,47	253,1
M0003	2019	105,5	212	235,1	155,4	103,6	62,5	24,9	0	84	468	194,8	132,3	1778,8	148,19	468
M0003	2020	175,2	148,1	158,6	222	197,9	51,2	67,1	62	26,8	74,9	69,7	199,8	1453,3	121,11	222
M0003	2021	161,8	152,3	299,1	325,8	165,6	230	14	49,4	85,1	229,1	235,8	288,5	2236,5	186,38	325,8

Análisis de datos

Luego de procesar los datos en una hoja de cálculo para obtener los valores máximos de precipitación, tendremos las siguientes gráficas en donde se establece los valores promedio y la desviación estándar para un análisis de homogeneidad y consistencia.

Figura 36*Precipitaciones máxima y promedio (1962-2021)***Figura 37***Precipitaciones máximas y desviación estándar (1962-2021)*

Según la fig 37 y la fig 38 los datos son consistentes y no presentan anomalías como datos muy alejados a la desviación estándar, además comprobamos este criterio con el test de Mann Kendall, La prueba consiste en calcular un índice de desviación S de la serie, y a partir de este valor calcular de V Mediante la relación

$$V = \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n(n - 1)(2n + 5)}{18}}}$$

$$V = -0.16$$

Donde:

S: es la diferencia entre T-I

I: es la suma del número de datos mayores al valor i

T es la suma de los números de datos menores al valor i

N: es el número de datos.

Y la hipótesis indica que el valor V debe estar entre el rango del 95% del V crítico, es decir el resultado debe entrar en un rango de 1.64

Figura 38

Valor V crítico en su rango de alfa

α	V_{crit}
0,50%	2,58
1,00%	2,33
2,50%	1,96
5,00%	1,64
10,00%	1,28



De acuerdo con lo encontrado, la hipótesis de que son datos homogéneos es correcta.

Distribución de probabilidad Gumbel.

Es conocida como una función de probabilidad de valor extremo tipo I, maneja la siguiente expresión (Aparicio Mijares, 2003).

$$x = u - \alpha(\ln(-\ln(F(x))))$$

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T(x)}$$

σ : desviación estándar de la serie de datos.

α : parámetro de escala.

u : parámetro de ubicación (moda).

$T(x)$: período de retorno en años.

\bar{x} : es la media de la serie de datos.

Se obtuvo los siguientes resultados para las precipitaciones máximas

Tabla 21

Valores cálculo distribución de Gumbal

Promedio	St.Dev	Alfa α	Moda u
254.1	55.0	42.9	229.4

Promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 254.13$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 54.96$$

Alfa α

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s = 42.85$$

Moda

$$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha = 229.40$$

Con los datos obtenidos podemos calcular las precipitaciones diarias máximas probables para cada periodo de retorno: la variable reducida Y_t . La precipitación X_t y la probabilidad de ocurrencia

Figura 39

Precipitación máxima corregida para cada periodo de retorno

Periodo Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0,3665	245,1031	0,5000	276,9664
5	1,4999	293,6740	0,8000	331,8516
10	2,2504	325,8322	0,9000	368,1904
25	3,1985	366,4642	0,9600	414,1046
50	3,9019	396,6073	0,9800	448,1663
100	4,6001	426,5279	0,9900	481,9765
500	6,2136	495,6697	0,9980	560,1068

Figura 40

Precipitación máxima P_d por tiempos de duración

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima P_d (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	276,9664	331,8516	368,1904	414,1046	448,1663	481,9765	560,1068
18 hr	X18 = 91%	252,0395	301,9850	335,0533	376,8352	407,8313	438,5986	509,6972
12 hr	X12 = 80%	221,5732	265,4813	294,5523	331,2837	358,5330	385,5812	448,0854
8 hr	X8 = 68%	188,3372	225,6591	250,3695	281,5911	304,7531	327,7440	380,8726
6 hr	X6 = 61%	168,9495	202,4295	224,5962	252,6038	273,3814	294,0057	341,6651
5 hr	X5 = 57%	157,8709	189,1554	209,8685	236,0396	255,4548	274,7266	319,2609
4 hr	X4 = 52%	144,0226	172,5629	191,4590	215,3344	233,0465	250,6278	291,2555
3 hr	X3 = 46%	127,4046	152,6518	169,3676	190,4881	206,1565	221,7092	257,6491
2 hr	X2 = 39%	108,0169	129,4221	143,5943	161,5008	174,7849	187,9708	218,4417
1 hr	X1 = 30%	83,0899	99,5555	110,4571	124,2314	134,4499	144,5930	168,0320

Figura 41

Intensidad de lluvia según el tiempo de retorno

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440	11,5403	13,8272	15,3413	17,2544	18,6736	20,0824	23,3378
18 hr	1080	14,0022	16,7769	18,6141	20,9353	22,6573	24,3666	28,3165
12 hr	720	18,4644	22,1234	24,5460	27,6070	29,8778	32,1318	37,3405
8 hr	480	23,5421	28,2074	31,2962	35,1989	38,0941	40,9680	47,6091
6 hr	360	28,1583	33,7383	37,4327	42,1006	45,5636	49,0009	56,9442
5 hr	300	31,5742	37,8311	41,9737	47,2079	51,0910	54,9453	63,8522
4 hr	240	36,0056	43,1407	47,8648	53,8336	58,2616	62,6569	72,8139
3 hr	180	42,4682	50,8839	56,4559	63,4960	68,7188	73,9031	85,8830
2 hr	120	54,0085	64,7111	71,7971	80,7504	87,3924	93,9854	109,2208
1 hr	60	83,0899	99,5555	110,4571	124,2314	134,4499	144,5930	168,0320

Regresión exponencial

I-D-T

Tiempo de retorno 100 Años

Figura 42 Regresión exponencial I-D-T para un periodo de retorno= 100 años

Periodo de retorno para T = 100 años								
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2		
1	1440	20,0824	7,2724	2,9998	21,8160	52,8878		
2	1080	24,3666	6,9847	3,1932	22,3037	48,7863		
3	720	32,1318	6,5793	3,4698	22,8290	43,2865		
4	480	40,9680	6,1738	3,7128	22,9220	38,1156		
5	360	49,0009	5,8861	3,8918	22,9078	34,6462		
6	300	54,9453	5,7038	4,0063	22,8513	32,5331		
7	240	62,6569	5,4806	4,1377	22,6771	30,0374		
8	180	73,9031	5,1930	4,3028	22,3440	26,9668		
9	120	93,9854	4,7875	4,5431	21,7502	22,9201		
10	60	144,5930	4,0943	4,9739	20,3650	16,7637		
10	4980	596,6334	58,1555	39,2314	222,7661	346,9435		
Ln (d) =		7,5078	d =		1822,1244	n =		-0,6164

Coeficientes de regresión

En base a los datos del periodo de retorno, realizamos otra regresión para obtener los valores de la ecuación:

$$d = K * T^m$$

Tabla 22

Constantes ecuación de intensidad

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	1047,0786	0,6931	6,9538	4,8200	0,4805
2	5	1254,5735	1,6094	7,1346	11,4826	2,5903
3	10	1391,9532	2,3026	7,2385	16,6672	5,3019
4	25	1565,5328	3,2189	7,3560	23,6780	10,3612
5	50	1694,3040	3,9120	7,4350	29,0860	15,3039
6	100	1822,1244	4,6052	7,5078	34,5745	21,2076
7	500	2117,4979	6,2146	7,6580	47,5914	38,6214
7	692	10893,0644	22,5558	51,2835	167,8997	93,8667
Ln (K) = 6,9231		K = 1015,4360		m = 0,1251		

Obteniendo los valores:

K=1015.4360

m=0.1251

Ecuación Intensidad

Finalmente podemos aplicar la ecuación de intensidad para calcular las curvas IDF

$$I = \frac{1015.4360 * T^{0.125112}}{t^{0.61639}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Figura 43

Curvas IDF obtenidas para diferentes tiempos de retorno

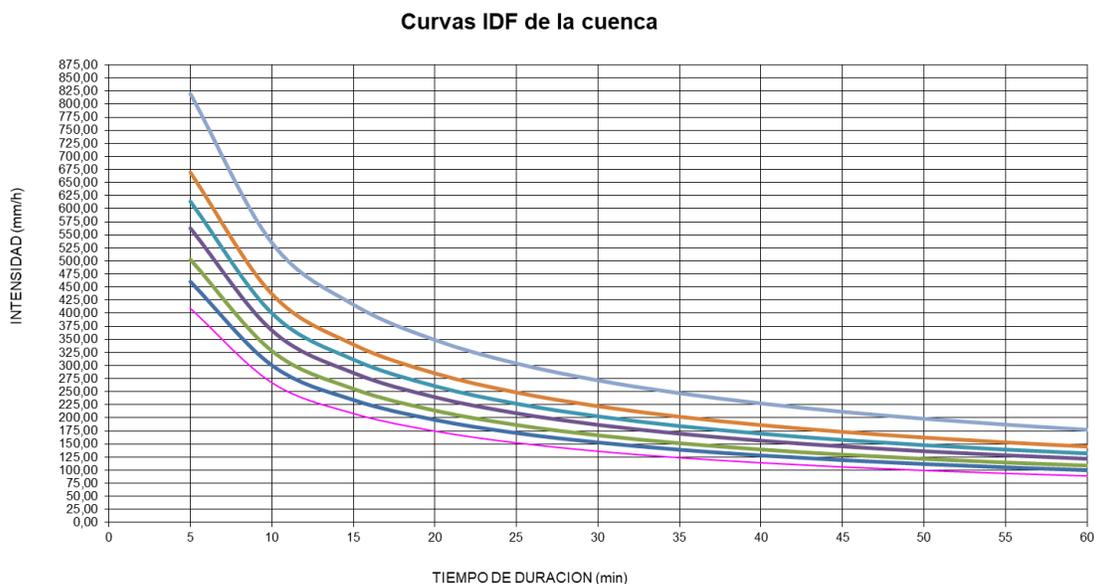


Figura 44

Intensidades – Duración -Frecuencia

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Periodo de retorno años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	410,66	267,87	208,64	174,73	152,28	136,09	123,76	113,98	106,00	99,33	93,67	88,77
5	460,54	300,41	233,98	195,96	170,78	152,62	138,79	127,82	118,87	111,40	105,04	99,56
10	502,26	327,63	255,18	213,71	186,25	166,45	151,36	139,40	129,64	121,49	114,56	108,58
25	563,27	367,42	286,17	239,67	208,87	186,67	169,75	156,34	145,39	136,25	128,47	121,77
50	614,30	400,71	312,10	261,38	227,79	203,58	185,13	170,50	158,56	148,59	140,11	132,80
100	669,95	437,01	340,37	285,06	248,43	222,02	201,90	185,95	172,93	162,05	152,81	144,83
500	819,39	534,49	416,29	348,65	303,85	271,55	246,94	227,43	211,50	198,20	186,89	177,13

Intensidad

Para el proyecto se consideró un periodo de retorno de 100 años según la AASTHO 1998, “El periodo de recurrencia con el que se debe diseñar un puente es de 100 años”. La intensidad está en función del tiempo de concentración, por lo tanto es importante conocer su valor en las unidades correctas

$T_c = 7.085$ horas ; 425.1 min

En un intervalo de 5 minutos se obtiene la siguiente tabla de intensidades

Tabla 23

Intensidad para tiempo de concentración y diferentes tiempos de retorno

Duración (min)	Tiempo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
425,1	26,56	29,78	32,48	36,42	39,72	43,32	52,99

Por lo tanto se tomará la intensidad de diseño

$I = 43.32$ mm/h

Caudal máximo

La formula del método racional permite encontrar el valor del caudal máximo instantáneo de descarga dentro de una cuenca, este método es usualmente usado cuando no existen registros de estaciones cercanas, y se relaciona el área con los parámetros de precipitación como la intensidad de lluvia (Naranjo, 2011).

$$Q = \frac{C * I * A}{360}$$

Donde:

Q= Caudal del crecienté pico

C=coeficiente de escorrentía = 0.63

I= Intensidad de la lluvia de diseño = 43.32 mm/hr

A=Area de la cuenca 66481 ha

Aplicando la fórmula

$$Q = \frac{0.63 * 44.11 * 664.81}{360}$$

$$Q = 5039.92 \text{ m}^3/\text{s}$$

De acuerdo con (Sandoval & Aguilera, 2014), para cuencas con area mayor a 45 km², se propone utilizar la siguiente ecuación para el cálculo de los caudales máximos

$$Q = a * \frac{P * \sqrt{A}}{(1 + \text{LOG}(A))} * (0.5 * \text{Ln}(T) - 0.7)$$

Donde:

Q=caudal máximo

P= precipitación media anual 1307.55 mm

A=Area de la cuenca 664.81 km²

T periodo de retorno 100 años

Para el coeficiente a se tiene las siguientes formulas en función de la precipitación

De 500 a 2500

$$a = 0.644 - 0.08 * \text{Ln}(P)$$

De 2500 a 4000

$$a = 0.1256 * \text{Ln}(P) - 0.965$$

Primero se obtiene el valor de a

$$A = 0.06992$$

Por lo tanto aplicamos la ecuación del Caudal máximo

$$Q = 0.06992 * \frac{1307.55 * \sqrt{664.81}}{(1 + \text{LOG}(664.81))} * (0.5 * \text{Ln}(100) - 0.7)$$

$$Q = 976.$$

Al comparar los valores del caudal máximo se decidió calcular usando otros autores para descartar un valor. Tal como establece (Sandoval & Aguilera, 2014) . El autor menciona que para cuencas mayores a 45 km² el tiempo de retorno siempre está en relación con la precipitación del lugar.

Tomaremos un método descrito por el mismo autor, en donde se compara un caudal conocido en una cuenca cercana, para encontrar el envolvente de Creaguer

Con la siguiente ecuación

$$Q_{max} = C \left(\frac{A}{2.59} \right)^{\frac{0.936}{A^{0.048}}}$$

Para encontrar los valores de una cuenca cercana nos basaremos en la cuenca del Río Pita que está cerca del área de estudio. Según (LORA CARRANCO, 2020), el caudal del Río Pita es de 1566.89 m³/s para un tiempo de retorno de 100 años. y su área es 592 km².

Así obtenemos una constante C= 37.13

Y con los datos de nuestra cuenca el caudal máximo será:

$$Q_{max} = 37.13 \left(\frac{644.81}{2.59} \right)^{\frac{0.936}{644.81^{0.048}}}$$

$$Q_{max} = 2544.10 \text{ m}^3/\text{S}$$

Formula de Temez

$$Q = 0.03 * F_s * P_{24} * A^{0.75} * \text{Log}(T)$$

Donde: P₂₄ es la precipitación máxima diaria en mm, F_s el factor de reducción por simultaneidad de la lluvia y es igual a :

$$F_s = 1 - \frac{\log A}{15} = 0.8127$$

Por lo tanto el caudal máximo con el método de Temez descrito por Sandoval (2014) será:

$$Q = 0.03 * 0.8127 * 351.5 * 644.81^{0.75} * \text{Log}(100)$$

$$Q = 2193.21 \text{ m}^3/\text{s}$$

La fórmula citada por la compañía (ENACON, 2012)

$$Q = C(T) * 0.00618 * P_{24}^{1.24} * A^{0.88}$$

establece un coeficiente $C(T)$ en función del periodo de retorno, que según Sandoval (2014) sería de $C(T) = 0.3 * T^{0.19}$

$$Q = 1894.23 \text{ M}^3/\text{S}$$

Tabla 24

Resumen Caudales Máximos

Autor	Caudal Máximo (m3/s)
Sandoval & Aguilera	976.7
Verni-King	1894.23
Témez	2193.21

Por lo tanto, descartamos la ecuación del método racional ya que se aleja de los valores obtenidos con otros métodos semi empíricos, además del resto de métodos que varían mucho a pesar que no teniendo así un caudal máximo de: 976.7 m³/s.

Se realizó un hidrograma que represente el cambio del caudal en función del tiempo, para este estudio se realizó un hidrograma unitario triangular que fue desarrollado por Mockus y es usado por el Soil Conservation Service. Esta información proporciona los parámetros fundamentales para realizar el hidrograma. (Villón, 2002).

Tiempo en punta

$$T_p = 0.5D + 0.6T_c$$

Donde:

T_p : tiempo en punta horas

Duración del evento: 7.08 horas

Tc: Tiempo de concentración 7.08 horas

Tp: 7.788 horas

Según Villón (2002), el tiempo base está en función del tiempo en punta

$$tb = 2.67 * Tp$$

Donde:

Tb= Tiempo base horas

Tp= Tiempo en punta 7.568 horas

Tb= 20.79 horas

Qp=976.7 m3/s

El área bajo el hidrograma, es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma, menciona (Guacho M, 2018)

En la siguiente tabla se muestra los valores que construyen el hidrograma para un periodo de retorno de 100 años

Tabla 25

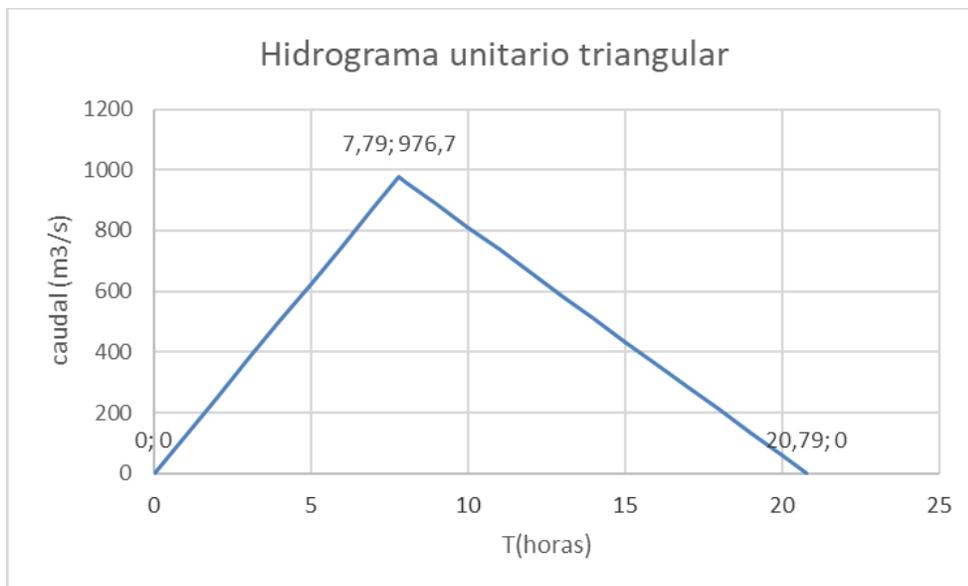
Valores hidrograma

T(horas)	Caudal (m3/s)
0	0
1	125,38
2	250,76
3	376,14
4	501,52
5	626,9
6	752,28
7	877,66
7,79	976,7
8	960,953846
9	885,823077
10	810,692308
11	735,561538
12	660,430769
13	585,3
14	510,169231

T(horas)	Caudal (m3/s)
15	435,038462
16	359,907692
17	284,776923
18	209,646154
19	134,515385
20	59,3846154
20,79	0

Figura 45

Hidrograma unitario triangular obtenido



Capítulo IV

Modelación HEC-RAS Y Diseño hidráulico

El sistema de modelado hidrológico está diseñado para realizar simulaciones de procesos hidrológicos de cuencas hidrográficas dendríticas a través de sistemas de información. El software además, incluye procedimientos tradicionales de análisis hidrológico-unitarios y enrutamiento hidrológico.

El software fue inventado por el centro de ingeniería hidrológica, el cual tiene una variedad de opciones para simular procesos de precipitación, escurrimiento y tránsito de avenidas hidrológicas.

La ejecución requiere 3 datos básicos

- Modelo de cuenca:

Basin model: parámetros para elementos hidrológicos y su interconexión

Subcuenca(subbasin)

Empalme (junction)

Fuente (source)

Distribución (distribución)

- Modelo meteorológico

Datos meteorológicos lluvia y evapotranspiración (históricas o hipotéticas)

- Especificaciones de control

Información de relación tiempo para simulación

Secciones transversales

Para el procesamiento en el programa una vez encontrado los datos hidrográficos con el caudal máximo que nos servirá de referencia para la calibración, se tomo medidas de la

sección transversal 500 metros aguas arriba del puente, y en el puente para llevar a cabo una interpolación de secciones en el programa HEC -RAS

Figura 46

Fotografía de la sección transversal del puente Avelina Lasso



En la sección del puente, se puede observar 2 muros de hormigón que limitan la sección del río por lo tanto no existen taludes naturales en esta sección. Además la profundidad del agua es mayor, como consecuencia, la velocidad es mayor en esta punto. Una característica del puente analizado es que los taludes laterales cerca de los muros son muros de gaviones que en su base están sumergidos por el agua, lo que sería resultado de una socavación debido a la velocidad del río.

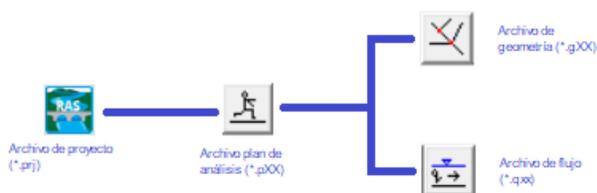
SegúnUna socavación local está relacionada inherentemente con su ubicación dentro de las secciones, es decir la relación con su estrechamiento, raíz de ellos se genera un aumento en la intensidad del flujo capaz de remover material del lecho. Además, como se observa en la sección del puente, se trata de un flujo no permanente o flujo no estacionario, debido a que no se mantiene constante con respecto al tiempo, varias características como el caudal, velocidad, tirante varían respecto al tiempo (Toapaxi Alvarez & Acero Quilumbaquin, 2021).

Creación del proyecto

Para la realización del modelo en HEC-RAS, se procede a la creación del archivo del proyecto con otros archivos como son archivos de geometría, archivo de flujo y archivo de plan de análisis de caudales (ver figura 42)

Figura 47

Esquema de archivos para creación de proyecto



Archivo de geometría

La geometría se elaboró in situ, un perfil en el punto de control, 7 perfiles aguas arriba del punto de control cada 40 m. de distancia y 2 perfiles aguas abajo del punto de control cada 40 m. de distancia, una vez que se creó el esquema del río, se ingresaron los diferentes secciones transversales obtenidas en campo con las siguientes características: Bombe coordenadas locales de la sección, distancia entre secciones, coeficiente de rugosidad de

Manning de 0.03 por tratarse de un cauce natural con poca vegetación y poco profundo, márgenes del cauce principal.

Figura 48

Sección modelada para el punto de control en el puente

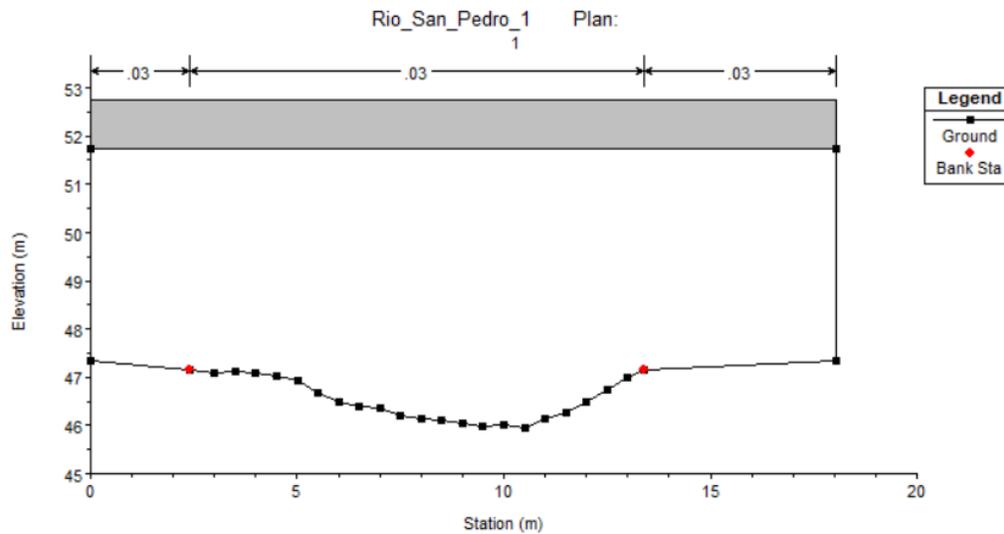


Figura 49

Geometría del Río San Pedro usada para el modelamiento

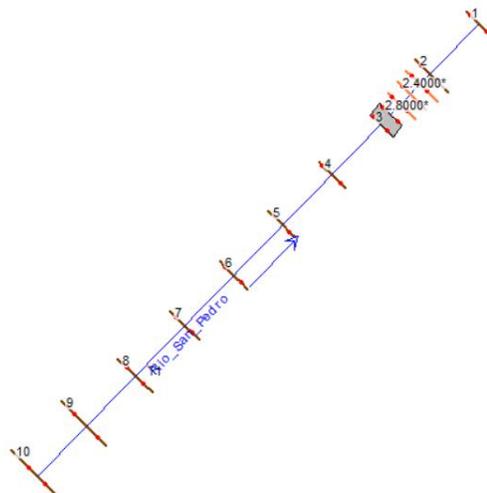
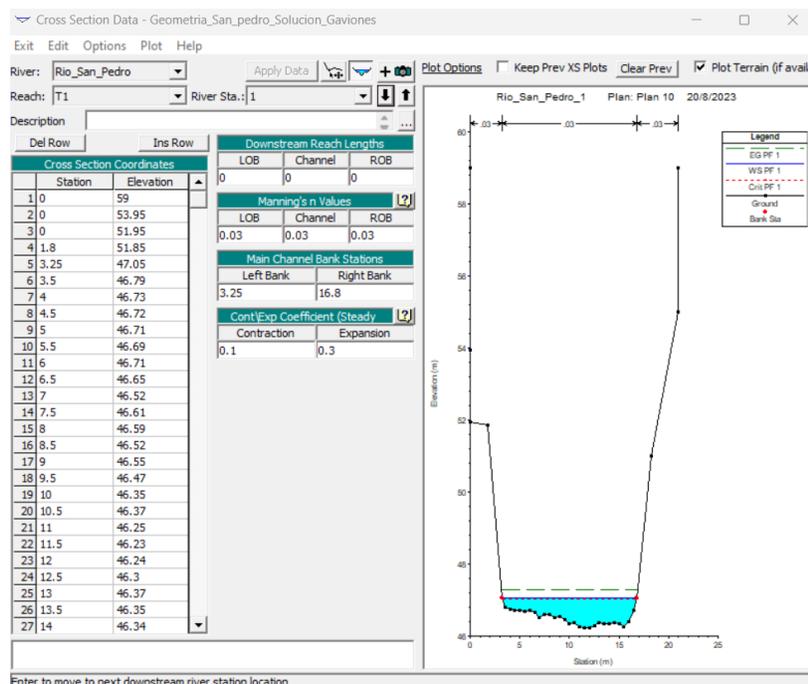


Figura 50**Sección 1 del proyecto****Archivo de flujo**

En este archivo se ingresaron los caudales obtenidos para los diferentes tiempos de retornos (ver tabla 25) que se obtuvieron con la ecuación de (Sandoval & Aguilera, 2014) Donde varía el tiempo de retorno y se mantiene los diferentes parámetros como la precipitación media anual. A continuación, se presenta los resultados de los caudales obtenidos y posteriormente su inclusión en la modelación.

Tabla 26 Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno

Periodo de retorno (años)	Qmax (m3/s)
10	275.1
20	486.3
50	765.5

Figura 51

Ventana de flujo

Steady Flow Data - Corrida_Prueb_4

File Options Help

Description : Apply Data

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates					
River	Reach	RS	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5	
1	Rio_San_Pedro	T1	10	13.5027	275.1	486.3	765.5	976.7
2	Rio_San_Pedro	T1	9	13.4939	275.1	486.3	765.5	976.7
3	Rio_San_Pedro	T1	8	15.5028	275.1	486.3	765.5	976.7
4	Rio_San_Pedro	T1	7	13.5455	275.1	486.3	765.5	976.7
5	Rio_San_Pedro	T1	6	16.602	275.1	486.3	765.5	976.7
6	Rio_San_Pedro	T1	5	16.6079	275.1	486.3	765.5	976.7
7	Rio_San_Pedro	T1	4	16.6123	275.1	486.3	765.5	976.7
8	Rio_San_Pedro	T1	3	16.6098	275.1	486.3	765.5	976.7
9	Rio_San_Pedro	T1	2,8000*	16.6098	275.1	486.3	765.5	976.7
10	Rio_San_Pedro	T1	2,6000*	16.6098	275.1	486.3	765.5	976.7
11	Rio_San_Pedro	T1	2,4000*	16.6098	275.1	486.3	765.5	976.7
12	Rio_San_Pedro	T1	2,2000*	16.6098	275.1	486.3	765.5	976.7
13	Rio_San_Pedro	T1	2	16.61	275.1	486.3	765.5	976.7
14	Rio_San_Pedro	T1	1	16.60734	275.1	486.3	765.5	976.7

Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)

Resultados

Figura 52

Tramo a) sección: 10-7 b) sección: 1-6

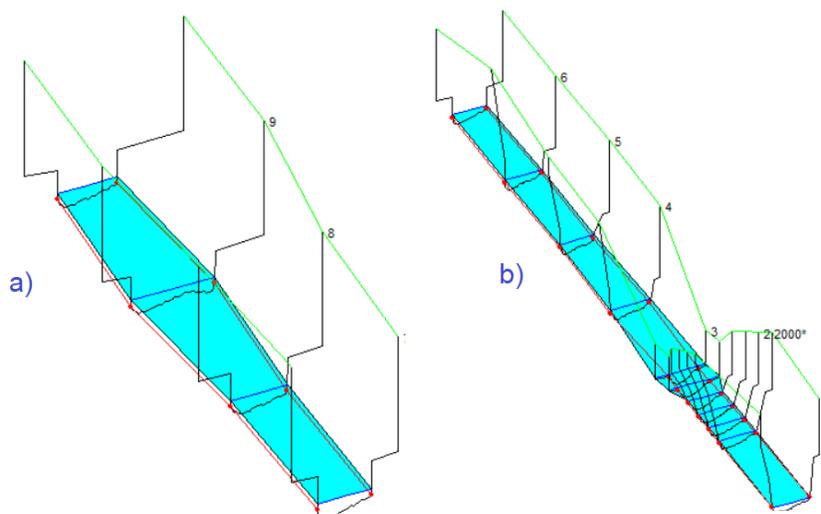


Figura 53

Modelación de avenidas en el puente Avelida Lasso

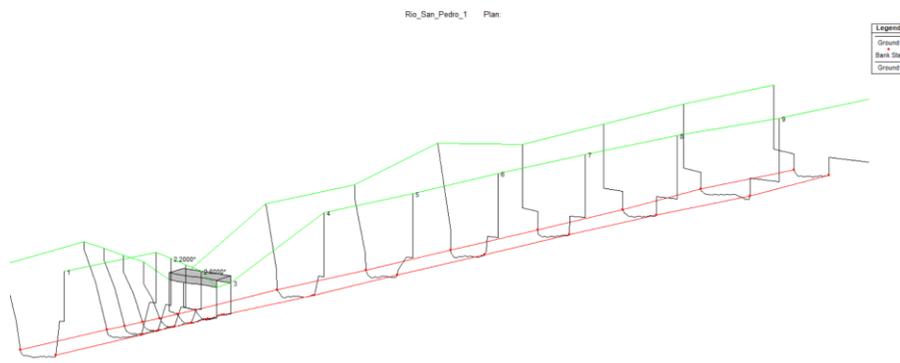


Figura 54

Modelación Río San Pedro Caudal actual

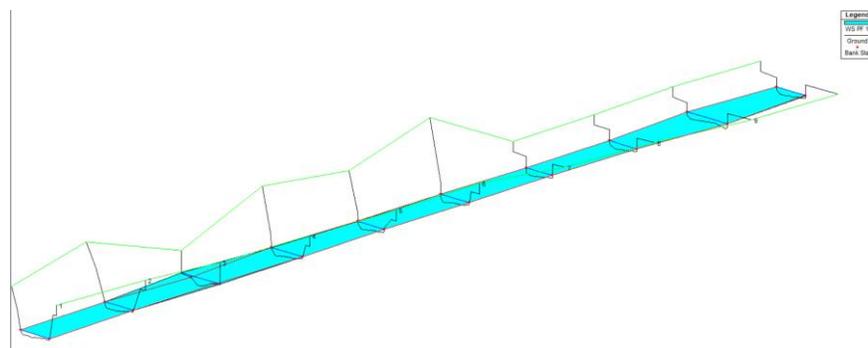


Figura 55

Modelación punto de control Tiempo de retorno=10 años

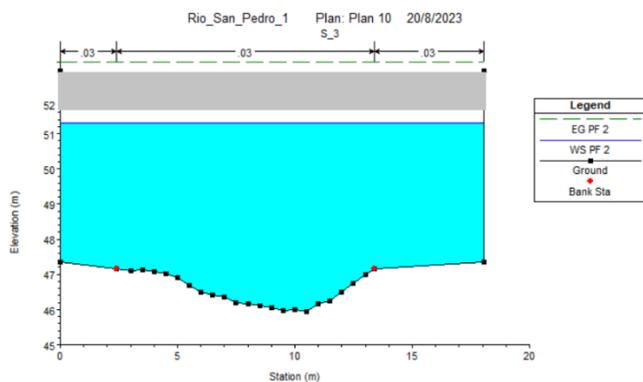
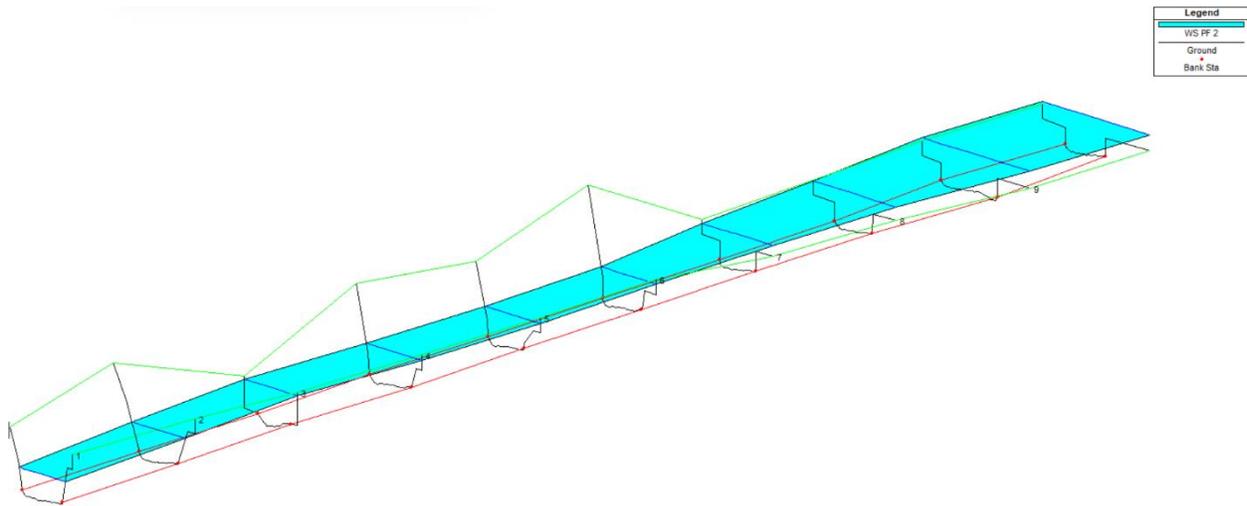
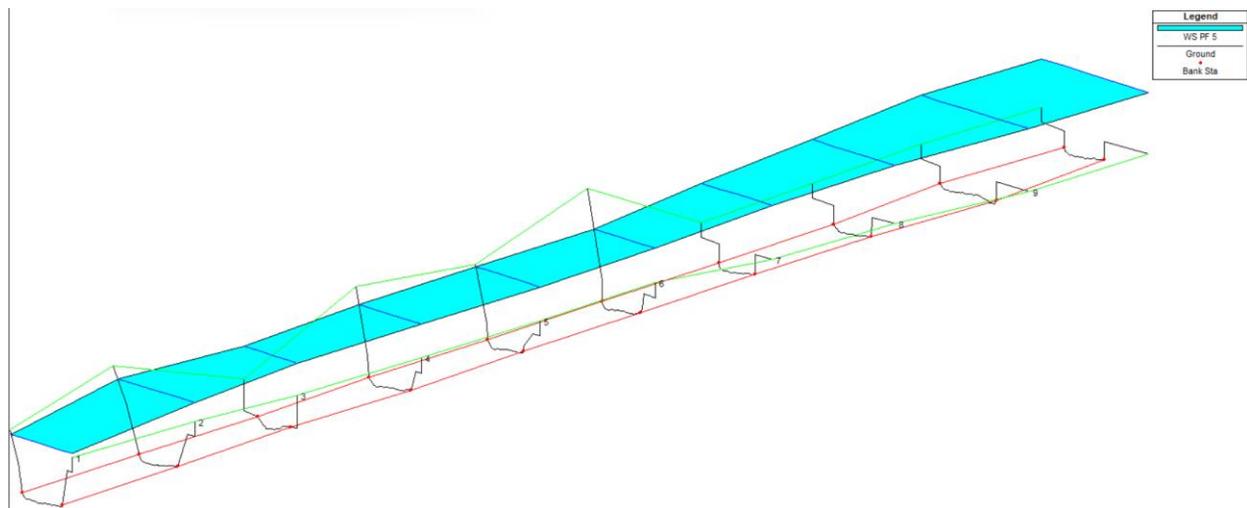


Figura 56

Modelación Río San Pedro Tiempo de Retorno 10 años

**Figura 57**

Modelación Río san Pedro Tiempo de retorno 100 años



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La cuenca hidrográfica en la zona de estudio abarca un área total de 644.81 km² y se caracteriza por una forma que oscila entre el óval redondeado y el óval oblongo. La topografía que la delinea es predominantemente montañosa, conformando un paisaje diverso y desafiante en términos hidrológicos. Esta cuenca no solo refleja su propia singularidad, sino que también alberga un intrincado sistema de afluentes procedentes de prominentes elevaciones montañosas, entre las que se incluyen nombres como: Illinizas, Corazón, Rumiñahui y Atacazo. Estos afluentes contribuyen a la complejidad de la cuenca, influyendo en sus flujos y en la interacción dinámica entre el agua y la geografía circundante.
- En el marco de esta investigación hidrológica centrada en la cuenca del Río San Pedro, se logró obtener una comprensión profunda de los aspectos morfológicos y morfométricos que caracterizan esta cuenca. Se determinó que la cuenca exhibe una forma alargada y se identificaron amenazas de crecidas relativamente bajas. El análisis reveló una pendiente de cauce del 4.08%, mientras que el tiempo de concentración estimado para diversos escenarios se estableció en 6.88 horas. Este último dato cobra relevancia debido a la ubicación geográfica de la cuenca, enclavada en una zona montañosa.
- En cuanto a la determinación de caudales máximos, se evaluaron diversas ecuaciones propuestas por distintos autores, todas las cuales tomaban como parámetro clave el área de influencia de la cuenca. Sin embargo, se optó por utilizar la ecuación desarrollada por Sandoval, que incorpora tanto la precipitación media anual como el tiempo de retorno, fijado en este caso en 100 años. El resultado de esta evaluación arrojó un caudal de máxima crecida de 967.67 m³/s para esta cuenca en particular.

- La modelación de avenidas para diferentes intervalos de tiempo de retorno permitió identificar una preocupante realidad con relación al Puente Avelina Lasso. Quedó patente que este puente sería incapaz de resistir una crecida con un período de retorno de 100 años, ya que el caudal máximo calculado superaría su capacidad estructural y provocaría daños considerables tanto al puente como a su entorno inmediato. En observaciones realizadas en el lugar, se evidenció que los enrocados y gaviones que conforman la estructura están socavados en su base y han perdido su capacidad de mantener la integridad de los taludes fluviales.
- Este análisis hidráulico pone de manifiesto que el diseño del puente resulta adecuado únicamente para enfrentar crecidas de hasta 10 años de período de retorno. Esto se respalda con las observaciones in situ, donde se constató la erosión de los elementos de protección y contención a lo largo del río. Dada esta situación, se torna imprescindible un enfoque colaborativo que involucre a las autoridades del Gobierno Autónomo Descentralizado de Rumiñahui. Este estudio conjunto es crucial para anticipar y prevenir futuros desastres en el área, especialmente considerando las instalaciones sociales presentes, como el gimnasio, el parque y las viviendas, las cuales se encuentran vulnerables ante posibles inundaciones.
- Es necesario un estudio exhaustivo en conjunto con autoridades del GAD de Rumiñahui para prevenir futuros desastres en el sector, ya que existen varias construcciones sociales, como un gimnasio y un Parque, además de viviendas que fácilmente pueden ser inundadas.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio exhaustivo de todos los afluentes que contribuyen al caudal ya que Al comprender cómo cada afluente interactúa con el sistema fluvial principal, se puede anticipar y modelar con mayor precisión el comportamiento

hidrológico. Emplear herramientas de geoprocésamiento como ARCGIS permitirá una visualización clara de la red hidrológica, facilitando la identificación de áreas críticas y mejorando la planificación de medidas preventivas.

- La adquisición de información topográfica actualizada y un levantamiento de campo minucioso son fundamentales para asegurar la precisión de los análisis hidrológicos. La obtención de datos detallados de las secciones transversales permitirá alimentar de manera confiable el modelamiento con HEC-RAS. Esto resultará en modelos hidráulicos más fiables, lo que a su vez conducirá a una toma de decisiones más sólida en términos de diseño de infraestructura y prevención de riesgos.
- Incorporar los resultados del estudio en las decisiones de planificación es esencial para prevenir desastres hidrológicos. Realizar estudios adicionales basados en las conclusiones permitirá evaluar con precisión las amenazas existentes y potenciales. La implementación de medidas preventivas, como la construcción de muros de gaviones en áreas vulnerables, reducirá significativamente el riesgo de inundaciones y socavaciones, salvaguardando tanto a las comunidades como a las infraestructuras cercanas.
- La incorporación de tecnología avanzada, como el uso de drones para el levantamiento topográfico en la zona de estudio, aporta ventajas sustanciales. Esta información visual y espacial detallada permitirá un entendimiento más profundo del terreno y de la dinámica fluvial. Combinada con datos de estudios de suelos, esta información respaldará una evaluación más precisa de la capacidad de socavación y la selección de soluciones adecuadas, como geotextiles, muros de contención o canales de desfogue.

Referencias

- Aparicio Mijares, F. J. (2003). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa Noriega Editores.
- Araque Arellano, M., Vásquez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*. McGraw-Hill.
- Bitrán, D. (1998). *El fenómeno del Niño: su naturaleza y los riesgos asociados a su presencia recurrente*. Médica panamericana.
- Bravo. (2019). *Propuesta de manejo integral para la microcuenca hidrográfica del río Burgay bajo, provincia del Cañar*. Hans Allende.
- Campos, A. D. F., & Daniel, F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, tercera reimpresión. Editorial Universitaria Potosina.
- Castillo Sarmiento, H. F. (2019). *Validación y calibración del modelo HEC–HMS para la simulación del tránsito de avenidas en una cuenca hidrográfica con antecedentes asociados a fenómenos de inundación*.
- Cely R., O. A. (2013). Utilización de modelos hidrológicos para la determinación de cuencas en ecosistemas de páramo. . *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 4 (2). 56 - 65.
- CEPAL, N. U. (2013). *Economía digital para el cambio estructural y la igualdad*.
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Clarke, K. C. (1968). The use of histograms in the analysis of spatial data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2(4), 331-340.
- CVC y POMCA, C. Q. (2017). *Caracterización de la cuenca del río la vieja plan de ordenación y manejo de la cuenca del río la vieja*. Scielo, 2(1), 1-12.

De Tancítaro, p. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional.

Instituto de Cultura

Delgadillo & Moreno A., A. (2013). *Morfometria de Cuencas*. McGraw-Hill.

ENACON, S. A. (2012). Estudio de crecida en bocatoma del Río Triful. *Santiago de Chile, Chile*.

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. McGraw-Hill.

Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). *Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos*.

González, N., & Mirabetty, J. (2015). *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca. Caso quebrada Chacaíto del Municipio Chacao estado Miranda*. Universidad Católica Andrés Bello.

Guacho M, . Morales J. (2018). *Diseño hidrológico e hidráulico del puente sobre el río jama*. Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350–361.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370.

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011a). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía*.

- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011b). *Morfología de las cuencas hidrológicas*.
- INAMHI, I. N. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. *Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología, Determinación De Ecuaciones Para El Cálculo De Intensidades Máximas De Precipitación*, 283.
- Iroume, A. (1997). Estudio de los procesos hidrológicos en una cuenca experimental forestal andina de la IX Región, Chile. *Bosque*, 18(1), 73–81.
- Izurieta, R., Campaña, A., Calles, J., Estévez, E., & Ochoa, T. (2019). Calidad del agua en Ecuador. *Calidad Del Agua En Las Américas*, 284.
- Jiménez, F., & Benegas, F. J. (2008). *Elementos conceptuales de manejo, gestión y cogestión de cuencas hidrográficas*. Grupo Temático Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas-catie, Costa Rica.
- Kingue, A. S. (2021). *Río San Pedro Ecuador*.
- Lora Carranco, C. F. (2020). *Estudio de flujo de sedimentos de la cuenca baja del río pita desde el sector de Cochapamba hasta la sección de control de la espe*. Repositorio ESPE
- Maldonado Albuja, D. J. (2017). *Análisis de la geomorfología fluvial en el Río Coca en el periodo 1969-2016: influencia de eventos geodinámicos y antrópicos*.
- Metternicht, G. (2000). The hypsometric curve: a tool for drainage basin characterization. *Journay of Hifrology*.
- Moreira Braz, A., Mirándola García, P. H., Luiz Pinto, A., Salinas Chávez, E., & Oliveira, I. J. de. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69–85.

- MORENO ZEPEDA, M. R. (1987). *Tránsito de avenidas en causes: utilizando el método de muskingum.*
- Naranjo, M. (2011). Estimación de Caudales Máximos en Cuencas sin Información. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.*
- Ordoñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2013). Las potenciales zonas de inundación por lahares en el volcán Cotopaxi. *Publicación Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional.*
- Osorio, W. C. C. (2016). Modelación hidrológico-hidráulica de eventos de inundación en el Río Bogotá (sector tocanzipa-chia) usando HEC-RAS. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 7(2), 1-12,
- Paterson, P. (2017). Calentamiento global y cambio climático en Sudamérica. *Revista Política y Estrategia*, 130 (1), 153–188.
- Paulet, M. , E. R. , F. C. , C. M. , & F. M. (1982). *Intensidad Máxima y Erosividad de las Lluvias en la República Dominicana. .*
- Rivas Ramírez, D. C., & Moreno Rivas, M. A. (2019). *Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrico de la cuenca del río Metica.*
- Robert, A. (2003). *River processes-An introduction to fluvial dynamics: London, Arnold, 214 p.*
- Rosero Villamar, R. I. , & G. M. . (2003). *Incidencia del fenómeno el niño en la actividad económica del Ecuador: un análisis de series de tiempo .*
- Ruiz, R., & Torres, H. (2008). Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas. *Caso América Del Sur.*

- Rumiñahui, G. A. D. M. de. (2012). *Plan de Desarrollo Ordenamiento Territorial del Municipio de Rumiñahui 2012 – 2025*.
- Sandoval, W. (2013). Principios de la Hidráulica 2. *EDIESPE: Quito, Ecuador*.
- Sandoval, W., & Aguilera, E. (2014). Determination of flow in basins with little information. *UNAMI Science, 7(1), 100-10*.
- Smith, J. L. (1997). *Principios de hidrología*. McGraw-Hill.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Geological Society of America Bulletin, 68(3), 637-654*.
- Te Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Terry Cerdeña, M. A. (2019). *Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Runichinchay para el diseño del puente Runichinchay, provincia de Huari, Ancash*.
- Tibanlombo, J., & Villacís, A. (2013a). Aplicación y sistematización de la propuesta metodológica para el análisis de vulnerabilidad de la parroquia Sangolquí, del cantón Rumiñahui. *Sangolquí: Universidad de Las Fuerzas Armadas-ESPE, Carrera de Ingeniería Geográfica y Del Medio Ambiente*.
- Tibanlombo, J., & Villacís, A. (2013b). Aplicación y sistematización de la propuesta metodológica para el análisis de vulnerabilidad de la parroquia Sangolquí, del cantón Rumiñahui. *Sangolquí: Universidad de Las Fuerzas Armadas-ESPE, Carrera de Ingeniería Geográfica y Del Medio Ambiente*.
- Toapaxi Alvarez, J., & Acero Quilumbaquin, A. (2021). Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorral, Provincia de Tungurahua, Ecuador. *Revista Politécnica, 48(1), 51–64*.

USDA United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.

(1999). *Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*.

Uvillus Ayala, E. D. (2020). *Elaboración de una guía de seguimiento y control ambiental de las plantas de tratamiento de agua residual del cantón mejía provincia de pichincha* .

Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC).

Vélez, G. A. P., Vélez, N. B. P., Zhingre, V. M. P., Moreira, V. N. P., Uzhca, W. H. P., Merino, P. P.

P., Robles, C. E. R., & Páez, F. D. A. (2015). Fenómeno del niño historia y perspectivas. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de La Universidad de Cuenca*, 33(3), 100–109.

Villón, M. (2002). Hidrología: la cuenca hidrológica. *Lima. Taller de Publicaciones Del Instituto*

Tecnologico de Costa Rica, 1(2), 22–64.

Apéndices