

Propuesta del dimensionamiento hidráulico de la estructura transversal sobre la Quebrada El Molino



**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sebastián Arias Chacón, Ing. Maikel Méndez Morales, Ing. Braulio Umaña Quiró, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



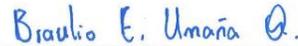
Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Sebastián Arias Chacón.
Profesor Guía



Ing. Maikel Méndez Morales.
Profesor Lector



Ing. Braulio Umaña Quirós.
Profesor Observador

Abstract

The damage caused by Hurricane Nate in October of 2017 in Costa Rica left a great amount of economic, human and material losses, being considered the worst natural catastrophe in the last decades in the country. The problem lies in the fact that several roads were disabled, one of these cases was presented in the Manuel de Jesús Jiménez project in the canton of Cartago. Reason for which the work has as purpose to realize the hydraulic dimensioning and rethinking of the slope of a possible new transversal structure of passage on the El Molino creek.

For the determination of the design flow, the precipitation-runoff method of the SCS (Soil Conservation Service) is used, which requires the creation of design storms, since there is no record of the flow of the stream. The program that is used for the development of the method is the HEC-HMS 4.0 created by the United States Army Corps of Engineers.

For the calculation of flood levels, one-dimensional hydraulic modeling is carried out through the HEC-RAS 5.0.5 program of the United States engineers. The one-dimensional modeling is based on the calculation of Gradually Varied Flow (FGV) by solving the energy equation in one dimension. For cases of Rapidly Varied Flow (FRV), such as hydraulic jumps, confluences and bridge flow, the model incorporates the solution of the flow momentum equation.

The results obtained from the project have a flow of 20 m³ / s for a return period of 100 years which is the expected period for avenues in bridge or culvert structures whose flow is considerable. In addition, a flood level value of 1.37 m is obtained for the proposed structure and a ground level of 1355 m, which means an elevation of 75 cm compared to the current structure.

Key Words: Hydrology, Hydraulics, Analysis, Flow, Strain

Resumen

La afectación causada por el huracán Nate ocurrido el mes de octubre del 2017 en Costa Rica dejó gran cantidad de pérdidas económicas, humanas y materiales, siendo considerado como la peor catástrofe natural en las últimas décadas en el país. La problemática recae en que varios caminos quedaron inhabilitados, uno de estos casos se presentó en el proyecto Manuel de Jesús Jiménez en el cantón de Cartago. Razón por la cual el trabajo tiene como fin realizar el dimensionamiento hidráulico y replanteo de la rasante de una posible nueva estructura transversal de paso sobre la quebrada El Molino.

Para la determinación del caudal de diseño se hace uso del método precipitación – escorrentía del SCS (Soil Conservation Service), el cual requiere de la creación de tormentas de diseño, ya que no se tiene un registro de los caudales de la quebrada. El programa que se utiliza para el desarrollo del método es el HEC-HMS 4.0.

Para el cálculo de los niveles de crecida se realizan modelaciones hidráulicas en una dimensión por medio del programa HEC-RAS 5.0.5. La modelación unidimensional se basa en el cálculo de Flujo Gradualmente Variado (FGV) mediante la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Para casos de Flujo Rápidamente Variado (FRV), como saltos hidráulicos, confluencias y flujo en estructuras el modelo incorpora la solución de la ecuación de momentum del flujo.

De los resultados obtenidos del proyecto se tiene un caudal de 20 m³/s para un periodo de retorno de 100 años el cual es el periodo esperado para avenidas en estructuras tipo puente o alcantarillas cuyo caudal es considerable. Además se obtiene un valor de nivel de crecida de 1,37 m para la estructura propuesta y una altura de rasante de 1355 msnm lo que significa una elevación de 0,75 metros respecto a la actual estructura.

Palabras Claves: Hidrología, Hidráulica, Análisis, Caudal, Tirante

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción

Propuesta del Dimensionamiento Hidráulico de la Estructura Transversal Sobre la
Quebrada El Molino

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Jorge Andrés Núñez Morales

Cartago, Marzo 2019.

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Limitaciones	5
Estado del arte	6
Metodología	17
Resultados	43
Análisis de resultados	69
Conclusiones y Recomendaciones	77
Referencias.....	79
Apéndice	81
Anexos	136

Prefacio

Las obras de infraestructura vial en Costa Rica sufrieron el impacto generado por la tormenta Nate, causando que caminos quedaran inhabilitados, siendo necesaria la atención a las estructuras que sufrieron un daño considerable y debido a su importancia se requería de una pronta solución, razón por la cual se determinaron las estructuras que serían intervenidas, pero al contar con un fondo nacional de emergencias limitado, algunas estructuras quedaron por fuera, debido a que en el momento del análisis se consideró que la construcción o reparación de estas no era prioritaria como fue el caso del Puente Pinares.

Actualmente no existe paso vehicular por la vía ya que la quebrada socavó uno de los bastiones lo que provocó que éste además se fracturara; otra de las afectaciones se dio en la carpeta de rueda en donde hubo pérdida de esta; por lo que es necesaria la construcción de un nuevo paso que cumpla con los lineamientos municipales y los que establece el M.O.P.T.

Todo lo anterior generó la necesidad de realizar los estudios preliminares de hidrología e hidráulica en el área del puente Pinares ubicado en el proyecto Manuel de Jesús Jiménez.

Por lo anterior surge el objetivo principal, el cual es el dimensionamiento hidráulico de la estructura transversal sobre la Quebrada El Molino.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por todo lo que me ha permitido realizar en mi vida y todo lo que me da día con día. A mis padres Leda Morales Vega Y Gerardo Núñez Nájera que son el motor de mi vida y que sin ellos nada de esto sería posible; que a pesar de las adversidades en todo este trayecto nunca me sentí sólo, ya que siempre conté con todo su amor, apoyo y consejos.

Otro agradecimiento a mis hermanos y sobrinos que son parte importante para mí. Además un agradecimiento especial a mi profesor guía el ingeniero Sebastián Arias Chacón, quien durante todo el desarrollo del proyecto me orientó

y proporcionó de su conocimiento y consejos para culminar con éxito el trabajo realizado.

Al profesor Maikel Méndez quien aportó en gran medida en el proyecto con sus observaciones y recomendaciones.

Otro agradecimiento a mis compañeros y amigos que hice a lo largo de esta etapa universitaria los cuales espero sigan formando parte de mi vida.

Por último un agradecimiento profundo a todos los profesores, técnicos y funcionarios del Tecnológico que proporcionaron de su tiempo para enriquecer mi conocimiento.

Resumen ejecutivo

El trabajo realizado surgió como solución para la realización de los estudios preliminares para la realización de la obra transversal sobre la quebrada El Molino en el “Puente Pinares”, los estudios que abarca este trabajo corresponden al estudio hidrológico, hidráulico y además de la propuesta altimétrica mediante la realización del replanteo de la rasante de la nueva estructura transversal que conecta a la calle La Zopilota.

El estudio es un aporte del Tecnológico de Costa Rica en específico la escuela de Ingeniería en construcción a la municipalidad de Cartago y a la comunidad del proyecto Manuel de Jesús Jiménez para iniciar con la realización de la obra sobre la quebrada El Molino la cual va a permitir el paso de vehículos por la estructura permitiendo a la comunidad reducir el tiempo de traslado a ciertos lugares, lo cual implica en cierta manera más comodidad a las personas que habitan por la zona.

El objetivo principal fue dimensionar la estructura transversal sobre la quebrada El Molino a partir de la capacidad hidráulica establecida por medio de los correspondientes estudios hidrológicos e hidráulicos.

Para la determinación del caudal de diseño se utilizó el método precipitación – escorrentía del SCS (Soil Conservation system), el cual requiere de la creación de tormentas de diseño, ya que no se tiene un registro de los caudales de la quebrada.

Para la creación de los hietogramas se utilizaron dos métodos uno fue el método de bloques alternos y el otro el método de Huff, cuyos resultados fueron comparados dando resultados más satisfactorios el método de Huff. Además se confeccionaron las curvas IDF (Intensidad-Precipitación-Escorrentía) haciendo uso de la fórmula correspondiente a la precipitaciones que forman parte de los registros de la estación meteorológica que se encuentra en el tecnológico de Costa Rica.

Por otra parte se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la variación de los

resultados obtenidos para el pico de caudal en donde las variables a modificar fueron el tiempo de retardo, número de curva y porcentaje de impermeabilidad, cuyos resultados indican que los parámetros que más tuvieron influencia en la variabilidad de los resultados fueron el porcentaje de impermeabilidad (%imp) y número de curva (NC).

De este análisis se tuvo un comportamiento según lo esperado en la teoría, en donde a medida que se incrementaba el periodo de retorno los caudales aumentaban.

El cálculo de los niveles de crecida se realizó por medio del programa HEC-RAS del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, este modelo unidimensional se basa en el cálculo de Flujo Gradualmente Variado (FGV) mediante la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Para casos de Flujo Rápidamente Variado (FRV), como saltos hidráulicos, confluencias y flujo en puentes el modelo incorpora la solución de la ecuación de momentum del flujo.

Para la modelación era necesario de topografía tener los puntos de las secciones transversales del cauce, esto porque forman parte de los datos de entrada del programa HEC-RAS. La topografía fue gracias al aporte de la municipalidad de Cartago, se realizó por medio de dron; para un tramo de 170 metros aguas arriba, así como 110 metros aguas abajo para secciones transversales cada 5 metros.

Para el análisis hidráulico se analizaron dos tipos de estructuras, la que actualmente se encuentra en el sitio y presentó los problemas de rebalse del río, y la otra estructura fue una propuesta de mejoramiento al problema de estrangulamiento o disminución de la sección del cauce, en la que se aumentó en 3 metros la distancia entre estribos, provocando la disminución de la altura de los tirantes de creciente.

Para el cálculo del nivel de crecida se realizó un análisis de sensibilidad, en donde el valor variable es el coeficiente de rugosidad debido a que este parámetro es el que el modelo HEC-RAS

5.0.5 utiliza para medir la resistencia al flujo. Las variaciones del coeficiente de rugosidad se dieron tanto a los lados, así como en el cauce. De este análisis los valores no presentaron mayor variación para los cambios en el coeficiente a los lados del cauce; siendo la variación del coeficiente en el centro del canal el que más dispersión de los resultados se obtuvo por lo tanto el valor que más influía.

De los resultados obtenidos del proyecto se tiene un caudal de 20 m³/s para un periodo de retorno de 100 años, el cual es el periodo esperado para avenidas en estructuras tipo puente o alcantarillas cuyo caudal es considerable. Además se obtiene un valor de nivel de crecida de 1,37 m para la estructura propuesta y una altura de rasante de 1355 MSNM lo que significa una elevación de 0,75 metros respecto a la actual estructura. Todos estos resultados representan el valor del tercer cuartil del conjunto de datos del análisis de sensibilidad.

Del estudio se concluye que la estructura fue sobrepasa por el flujo de agua por la presencia de materiales a la entrada de la estructura, ya que de los resultados se tuvieron tirantes menores al establecido para la capacidad hidráulica de la estructura, todo lo anterior para el caso de la estructura actual y la estructura propuesta.

Introducción

Consecuencia de la afectación causada por el huracán Nate ocurrido el mes de octubre del 2017 en Costa Rica el cual dejó gran cantidad de pérdidas económicas, humanas y materiales siendo considerado como la peor catástrofe natural en las últimas décadas en el país. Las estructuras civiles más expuestas a daños fueron las carreteras y puentes, sobre esta última recae una problemática en cuanto a que varios caminos o rutas quedaron inhabilitados imposibilitando el paso de comunidades a sus distintos destinos por los caminos que usualmente transitaban como es el caso de la comunidad de Manuel de Jesús Jiménez en Cartago.

Para desarrollar el trabajo se debe de cumplir con una serie de actividades como la visita del sitio para darse una idea de las condiciones del proyecto, y así evaluar los estudios a realizar para la caracterización de las condiciones del lugar. Y además obtener las particularidades del sitio cercano a la estructura para poder caracterizarla.

Además se pretende realizar el modelo y cálculo del caudal máximo que fluye por la quebrada el Molino en el lugar donde se va a construir la estructura transversal para llegar al dato anterior se debe de hacer uso de varios software entre ellos ARGIS 10.5 el cual es un programa para el análisis de sistemas de información geográfica como cuencas, el cual requiere de los datos obtenidos del mapa digital de Costa Rica 2014. Una vez se tenga esa información se realiza la delimitación del área de la cuenca y a la vez se obtienen características de interés de la misma como área total, longitud del punto de inicio de la cuenca hasta el punto de desfogue y pendiente de la cuenca. Estas características son interés ya que mediante estas se obtiene las variables propias de la cuenca como tiempo de concentración, coeficiente de escorrentía, coeficiente de rugosidad, periodo de retorno, etc.

Para la determinación del caudal de diseño se hace uso de la metodología precipitación-escorrentía del SCS (soil consevation system) esto debido a que no se tiene un control de los caudales de la quebrada el Molino, razón por la cual se recurre a realizar tormentas de diseño. Para tal fin destaca el programa de modelación hidrológica HEC-HMS 4.0, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos para la determinación del caudal de diseño para los distintos periodos de retorno.

Para la obtención de los niveles de creciente en la quebrada el molino se utiliza el software HEC-RAS 5.0.5 el cual es un software libre desarrollado por el cuerpo de ingeniero del ejército de Estados Unidos; al igual que el HEC-HMS 4.0 es considerado uno de los programas computacionales que generan mayor confianza para la aplicación en proyectos hidráulicos.

Objetivo General

- Dimensionamiento hidráulico de la estructura transversal sobre la Quebrada El Molino.

Objetivos específicos

- Realizar la determinación de las características de importancia de la cuenca con el fin de describirla.
- Determinar los caudales de la quebrada El Molino, mediante el método de precipitación-escorrentía del SCS (Soil Conservation System) por medio del programa HEC-HMS 4.0 y el método Racional.
- Determinar el nivel de creciente de la quebrada El Molino, a través del uso del programa computacional HEC-RAS 5.0.5 (Modelación en 1D).
- Determinar el nivel de rasante de la estructura transversal.

Limitaciones

Como parte del estudio se plantea describir y cuantificar el fenómeno de socavación causado por el efecto del flujo de agua, sin embargo el resultado obtenido está sujeto a ciertas deficiencias encontradas durante su determinación.

Por una parte en el estudio de la socavación se debe de describir el material del lecho de la quebrada a partir de un análisis granulométrico para así obtener los diversos diámetros de partícula, utilizados en las ecuaciones y programas computacionales. Sin embargo se obtuvo una cantidad de material no tan significativo para poder representar las condiciones del lecho de la quebrada El Molino, esto por el difícil acceso al lugar y además pocos puntos para obtener material ya que vecinos de la zona vierten sus desechos líquidos en las cercanías de la estructura por lo que la muestra que se podía obtener de esos puntos saldría muy contaminada. Sin embargo se tomó muestra del lecho en los pocos puntos donde se podía extraer muestra; esto por lo menos para darse una idea somera del tamaño de partícula.

El análisis de socavación se calculó mediante el uso de fórmulas de diversos autores, y no mediante programas computacionales ya que no se contaba con la cantidad de datos de entrada que se solicitaban en dichos programas, por ejemplo entre los datos necesarios se encontraban la resistencia al cizallamiento la cual se obtiene de la prueba ASTM D211-66-76, otro valor es el de la velocidad de la partícula del lecho, además el índice de plasticidad mediante la prueba no. ASTM D423-36, entre otros datos que no se pudieron obtener en el presente estudio al no tener los medios para realizar las pruebas. Los programas utilizados fueron el HY- 8 y el programa HEC-RAS.

En cuanto a lo que respecta a términos estructurales; para la estructura propuesta se tienen sólo valoraciones de altura, ancho y pendientes, no se toman otras consideraciones estructurales, como por ejemplo dimensionar las cimentaciones porque para esto se tendrían que

realizar estudios geotécnicos, y esto no es el fin del proyecto.

Estado del arte

Parámetros Morfométricos

A la hora de realizar un estudio hidrológico surgen ciertas incógnitas o características que se requieren para completar los modelos de análisis que permiten describir una cuenca; por lo que en la actualidad es común encontrarse con diversos autores que con sus estudios permiten establecer los parámetros que se requieren a la hora de estimar dichos valores.

Entre los aspectos importantes en esta temática se encuentra el darle un mejor significado y utilidad a cada una de las variables morfométricas, para así tener pistas sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca (Yardí, 2017).

Además sea tratado de dar un significado más simple y entendible a estas variables, ya que en muchos textos antiguos dichos conceptos suelen generar duda o malas interpretaciones al tener un lenguaje muy técnico (Enciso, 2015).

Por otra parte el artículo de investigación sobre la caracterización de las condiciones hidroclimáticas y morfométricas elaborado por varios investigadores venezolanos de la universidad de Pedagógica; y publicado en el 2015 indica que este tipo de estudios proporcionan indicios sobre posibles crecidas y procesos de remoción de masa, según los resultados que obtuvieron en las laderas de la cuenca del río San Julián (Méndez, Cartaya, & León, 2015).

Parámetros Generales

Se refiere a los parámetros propios de la cuenca que permiten describir la condición o características geométricas de la superficie de la cuenca.

Estos son de gran utilidad a la hora de determinar otros índices morfológicos, ya que influyen en el comportamiento y descripción del cauce.

Área (A)

Corresponde a la porción de terreno delimitada por la divisoria de aguas de la cuenca, además a la superficie de drenaje que escurre directa o indirectamente hacia un mismo cauce natural. Esta característica de la cuenca se expresa en km^2 (Villón, 2004).

Perímetro (P)

Es la longitud sobre un plano horizontal que representa la distancia sobre el recorrido de la divisoria de aguas. Presenta unidades de metros o kilómetros normalmente. Este valor se expresa generalmente en km (Chow, 2004).

Del estudio de Jardí (1985) se obtuvo que el perímetro está relacionado a la litología y edad de la cuenca. Se tiene que las cuencas con materiales blandos dan formas de cuenca redondeadas, mientras que materiales más duros generan formas más alargadas o quebradas. El paso del tiempo lo que genera son cuencas de forma redondeada, lo que implica que entre más redondeada sea una cuenca más vieja es considerada (Jardí, 1985).

Longitud de la cuenca (L)

La longitud de la cuenca se define como la longitud topográfica más extensa desde su inicio aguas arriba hasta el punto de desfogue aguas abajo (Villón, 2004).

Este parámetro tiene gran relevancia en cuanto a la determinación de la mayoría de índices morfométricos.

Parámetros asociados a la forma

La forma de la cuenca afecta en las características de descarga de la corriente principalmente en los eventos en donde se alcance el flujo máximo. En general, los escurrimientos de una cuenca de forma casi circular serán diferentes a los de otra cuya forma sea por ejemplo estrecha y alargada, aunque tengan la misma área.

Lo anterior queda demostrado en el trabajo realizado Jimenez, Paroush & Ish-Horowicz (1997) en su investigación sobre morfometría de cuencas en donde se compararon cuencas con distinta forma cuyos resultados arrojaron una fuerte relación entre la formas de la cuenca y aspectos como la velocidad de escorrentía y la generación de distintos hietogramas.

Coeficiente de compacidad o de Gravelius (Kc)

Este coeficiente corresponde a la razón que existe entre el perímetro propio de la cuenca y el perímetro de un círculo imaginario que posee la misma área de la cuenca en análisis.

Define la forma y superficie de la cuenca teniendo influencia sobre la escorrentia y la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (Corbelle-rico, 2016).

En el documento elaborado por Cardona y Benjamín Lux (2014) se determinó que cuencas con coeficientes de compacidad altos representan cuencas con formas redondeadas con tendencia a generar crecientes debido a una mayor rapidez para la concentración de flujo de aguas de escorrentia superficial, esto en comparación a cuencas alargadas; en otras palabras las cuencas con formas anchas presentan un tiempo de concentración menor.

Rectángulo equivalente

La idea de este parámetro se basa es convertir la cuenca en una superficie rectangular de lados L y l con el mismo perímetro de la cuenca original; de tal manera que las curvas de nivel se encuentren posicionadas paralelas a los lados menores (l) del rectángulo. El lado l es paralelo a las curvas de nivel de la superficie (Lux & Cardona, 2014).

Factor de forma de Horton (Kf)

Este parámetro relaciona el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. Y expresa cual cuadrada puede ser la cuenca por lo que un factor de forma bajo indica que la cuenca es menos propensa a sufrir de crecidas en comparación con una cuenca con misma área pero con un número mayor forma

Lo anterior se afirma en el estudio realizado por Askoa Gonzales en 2004 sobre el análisis morfométrico de la cuenca del río Zadorra y sus afluentes, en donde se comparó las subcuencas, teniendo como resultado que las subcuencas con un índice menor presentaron menor crecidas durante el periodo de estudio (Gonzales, 2004).

Relación de elongación (Re)

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posee la misma área de la cuenca y la longitud de la cuenca. Entre más se acerque a la unidad la cuenca va a presentar una condición más plana y circular (Chow, 2004).

Del estudio de Askoa Gonzales se menciona que entre más circular sea la cuenca más retardo habrá entre el momento de precipitación y el momento de crecida en el desfogue de la cuenca, pero esto provoca crecidas repentinas, por lo tanto más riesgo a que se presenten inundaciones (Gonzales, 2004).

Parámetros de relieve

Para describir el relieve de una cuenca existen numerosos parámetros que han sido desarrollados por varios autores; entre los más utilizados están la pendiente de la cuenca, índice de pendiente, curvas Hipsométricas, histograma de frecuencias altimétricas y relación de relieve (Yardí, 2017).

Coeficiente de masividad (Km)

Este coeficiente permite describir el comportamiento de la superficie de la cuenca en cuanto a cuál montañoso o plano puede ser el relieve de su superficie.

Desnivel altitudinal (DA)

Este parámetro se refiere a la diferencia existente entre la máxima altura y el punto más bajo de la cuenca.

Se suele relacionar con el número de ecosistemas y la variabilidad climática, ya que entre mayor sea la diferencia se dice que tanto la precipitación y la temperatura varían.

Pendiente media del cauce (so)

Es una de las principales características cuando se requiere hacer comparaciones para determinar los niveles de erosión que se generan en una cuenca, y la velocidad con la que escurre el cauce en la cuenca.

Se estima como la razón entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud.

$$SO = \frac{DA}{L} \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

DA= desnivel altitudinal en km

L=Longitud del cauce en km

Pendiente media de la cuenca (S)

Corresponde a la media ponderada de las pendientes de las superficies principales de la cuenca en donde la línea de máxima pendiente no varía.

Influye en el comportamiento hidrológico, en específico sobre la velocidad media de la escorrentía y por consiguiente de su poder de arrastre o poder erosivo como consecuencia de su energía erosiva.

$$S = 100 * \frac{\sum Li * E}{A} \quad \text{Ec (2)}$$

Donde:

J= Es la pendiente media de la cuenca

A= Es el área de la cuenca en km²

E= Equidistancia de las curvas de nivel en km

Li= Longitud de cada una de las curvas de nivel en km

Curva Hipsométrica

Esta corresponde a una gráfica que relaciona la variación del área drenada con respecto a la altura de la superficie de la cuenca.

Para su elaboración se toma en el eje de las abscisas los valores correspondientes de las áreas en km² o en porcentaje y en el eje de las ordenadas se coloca los valores de las alturas en metros.

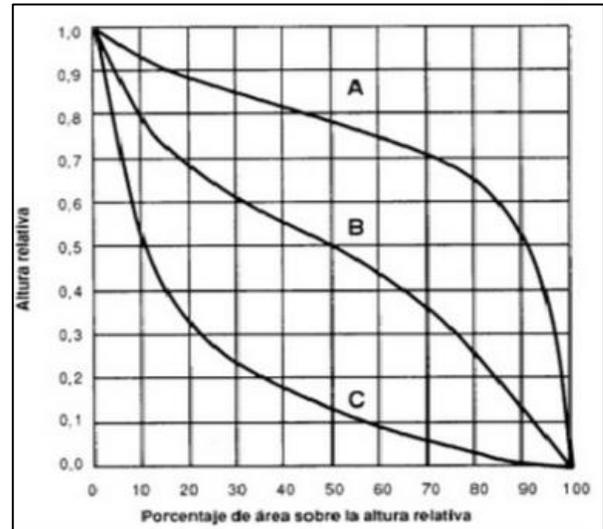


Figura 1. Curva Hipsométrica

Fuente: Obtenido de <https://www.ingeciv.com/wp-content/uploads/2015/02/curva-hipsometrica.png>

Histogramas de frecuencias altimétricas

Es una representación gráfica que permite ver como varía la altura a lo largo de su superficie.

En el eje de las abscisas se colocan los rangos de altura y en el eje de las ordenadas se sitúa la superficie ya sea en km² o en porcentaje.

Parámetros de red hidrográfica

Una red hidrográfica es un sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca; específicamente una cuenca hidrográfica (SIATL, 2014).

Para G3nzales (2004) en su estudio se tiene que para subcuencas con un n3mero de orden mayor, se tiene un desarrollo hidrol3gico mayor en comparaci3n con subcuencas cuyo orden eran menores.

El sistema de Horton

Se basa en que los canales tienen su respectiva numeraci3n dependiendo la cantidad de afluentes que intervengan en su flujo.

Los siguientes son los planteamientos para este sistema de red.

- Los cauces de primer orden (1) son aquellos que no poseen tributarios,
- Los cauces de segundo orden (2) tienen afluentes de primer orden,
- Los cauces de tercer orden (3) reciben influencia de cauces de segundo orden, pudiendo recibir directamente cauces de primer orden.
- Un canal de orden n puede recibir tributarios de orden $n-1$ hasta 1. Esto implica atribuir mayor orden al r3o principal, considerando esta designaci3n en toda su longitud, desde la salida de la cuenca hasta sus nacientes.

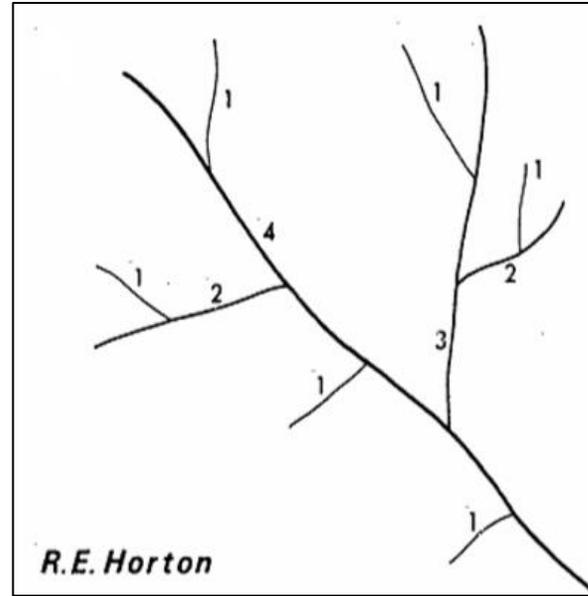


Figura 2. M3todos de orden de r3os
Fuente: Gregory y Walling, 1973.

El sistema de Strahler

Este m3todo es muy similar al m3todo de Horton solamente que la designaci3n del orden var1a en que a lo largo de su curso un canal puede tener varios elementos con orden distinto.

Los siguientes son criterios del m3todo.

- Todos los cauces ser1n tributarios, a3n cuando las nacientes sean r3os principales.
- El r3o en este sistema no mantiene el mismo orden en toda su extensi3n.
- El orden de una cuenca hidrogr1fica est1 dado por el mayor n3mero de orden del cauce principal.

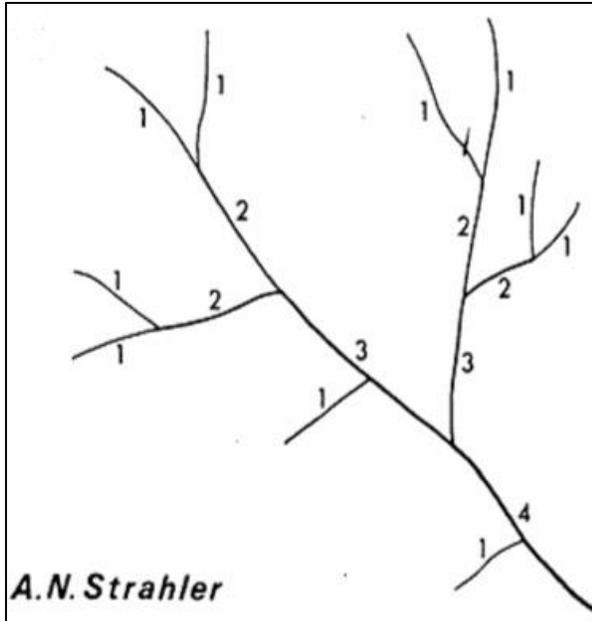


Figura 3. Métodos de orden de ríos
Fuente: Gregory y Walling, 1973.

Densidad de drenaje (Dd)

Para obtener este parámetro se realiza la razón entre la longitud total de las corrientes y el área de la cuenca.

El objetivo de este parámetro es poder tener una idea de la complejidad del sistema de drenaje de la cuenca, ya que para una mayor densidad se tiene una mayor estructuración de la red fluvial o que haya un mayor potencial de erosión.

Otra utilidad es caracterizar cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde:

L= Es la sumatoria de las longitudes de todas las corrientes en Km

A= Área de la cuenca en km²

Relación de bifurcación (Rb)

Este parámetro se basa en la relación existente entre el número de elementos de un orden establecido y el número de segmentos de un orden seguidamente mayor.

Esta relación permite entender las variaciones geológicas que se presentan en la cuenca referidas al sustrato rocoso, a los grupos de suelo predominantes y a la vegetación; y esto porque son variables que modifican el entallamiento de los cursos fluviales.

Mediante el estudio de Gonzales, 2004 se tiene que subcuencas con mayor número de bifurcación presentan una torrencialidad mayor; pero esta comparación solo puede hacerse para cuencas con el mismo número de orden (Gonzales, 2004).

Coeficiente de circularidad de Miller (Cc)

Este coeficiente tiene como objetivo describir cuál es más ancha o alargada una cuenca lo cual da una idea del nivel de escurrimiento en la cuenca, ya que entre más alargada sea una cuenca indica que el escurrimiento va a ser menor y las crecidas van a ser menos violentas en comparación con una cuenca de forma más circular.

Estimación de Caudales de diseño

Determinación de las tormentas de diseño

Para determinar precipitaciones de avenidas a lo largo del tiempo se debe de tener registros de varios años obtenidos de mediciones realizadas por pluviómetros para establecer las precipitaciones en la zona de estudio, pero en gran cantidad de casos estos estudios no están disponibles.

Por lo anterior Soldevila (2018) indica que la tormenta de diseño es una herramienta muy utilizada en estudios hidrológicos, en especial los relacionados con las crecidas, ya que permiten obtener una lluvia sintética que reduzca la incertidumbre al expresar un valor de precipitación para una determinada zona. El principal objetivo es determinar el desarrollo de caudales a lo largo del tiempo o el caudal pico a partir de ella.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Rojas en su estudio del 2011 define las curvas IDF como una representación gráfica de la relación existente entre la intensidad de precipitación, en donde se expresa la intensidad en mm/hr y la duración expresada en minutos u horas esta relación para un determinado período de retorno o frecuencia en años.

Son de gran utilidad ya que permiten establecer las precipitaciones para zonas específicas para distintos periodos de retorno.

Estas curvas pueden ser calculadas mediante fórmulas que representan las precipitaciones de la zona de estudio lo cual es esencial si en esa zona no se tiene los registros históricos de precipitación necesarios para poder realizar un estudio hidrológico. Es en otras palabras una herramienta estadística y de probabilidad en la que sus fórmulas permiten establecer el comportamiento de la precipitación en la zona (Pizarro & Tapia, 2007).

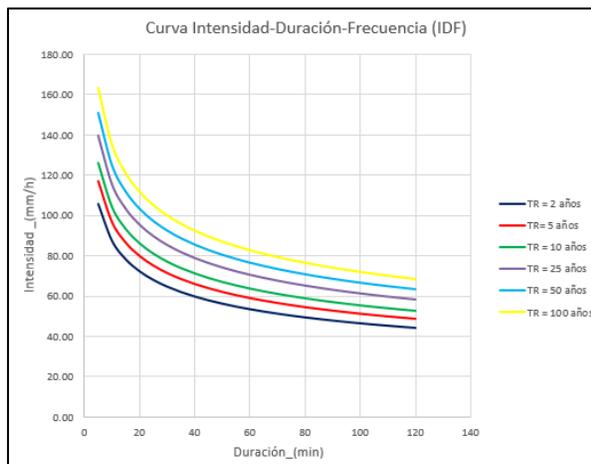


Figura 4. Diagrama de las curvas IDF para la estación del Tecnológico de Costa Rica
Fuente: Creación Propia

La investigación realizada por Nazareth Rojas en el 2011 incluye una de las limitantes que surgen en la actualidad respecto al uso de las CIDF, ya que estas están diseñadas en base a supuestos del clima estacionario de condiciones climáticas del pasado, por lo que la proyección de las precipitaciones en algunos casos no son un buen indicador para precipitaciones a futuro, debido al

efecto del cambio climático que está sufriendo el planeta hoy en día. Esto podría provocar un sobre diseño o en el peor de los casos un diseño insuficiente para eventos extremos de precipitación.

Otra limitante es detectada por Trenberth, y otros (2003) expresan que climas más cálidos, donde lo esperado es que la cantidad de humedad atmosférica aumente más rápido que la cantidad total de precipitación, se debe disminuir la frecuencia de precipitación para compensar la intensidad de ésta. Pero esta característica ha sido un análisis muy limitado mediante observaciones y modelos.

Hietogramas

A veces cuando se estima la precipitación para una zona se establece un valor máximo para un tiempo determinado; por ejemplo, para determinada porción de territorio se tiene una precipitación máxima de 90 mm para un tiempo de 80 minutos, sin embargo, para un estudio hidrológico se debe ir más allá con lo que surge la necesidad de conocer cómo evoluciona esa precipitación durante el periodo de los 80 minutos.

Es parecido a un histograma al ser un gráfico en forma escalonada pero utilizado para expresar la intensidad de la precipitación en mm y la duración de la tormenta en unidades de minutos u horas.

Villón en el 2004 plantea que la utilidad de este tipo de gráfico es permitir observar cuál es la hora o momento durante la precipitación en el que la tormenta alcanza su pico de precipitación. En otras palabras es medir la evolución de la precipitación durante un lapso determinado.

Eduardo Varas (2008) en su estudio de la influencia de los hietogramas en las crecidas resultantes, sugiere que es usual que los ingenieros conozcan el valor total de la lluvia de diseño y su duración, pero no cuentan con antecedentes para distribuir la precipitación en intervalos de tiempo más cortos, por lo que es indispensable que se tomen en consideración la elaboración de los distintos hietogramas, realizándose un análisis de sensibilidad de sus resultados.

Método bloques alternos

Este método consiste en formar histogramas en donde la máxima precipitación se localiza en el centro, para luego ir colocando alternamente de manera descendiente y de derecha a izquierda el resto de valores.

En la práctica es usual que se utilice este método por la simplicidad de su elaboración, este define un hietograma de diseño a partir de la discretización de una curva de masa acumulada de precipitación, relacionada a un área de análisis y a un periodo de retorno determinado (García, 2009).

Del estudio de García (2009) se plantea que este tipo de método de fabricación de hietogramas proporciona buenos resultados para cuencas pequeñas cuyas áreas no exceden los 25 km² siempre que se tengan precipitaciones de corta duración.

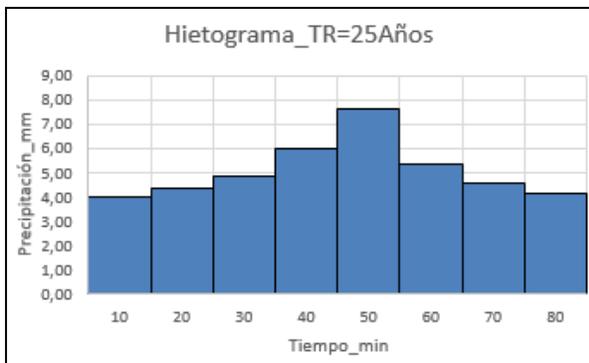


Figura 5. Hietograma mediante el método de bloque alternativo para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Creación Propia

Método de Huff (1967)

El estudio de Huff (1967) realiza una clasificación de cuatro grupos con duraciones divididas en cuatro partes llamadas cuartiles.

Huff desarrolló un análisis estadístico para los datos de lluvia de cada cuartil en el cual clasificó las precipitaciones en el cuartil donde se dio la lluvia más intensa.

Para cada cuartil se hizo un análisis de los datos de lluvia para obtener las curvas adimensionales de distribución temporal

asociadas a una probabilidad. Esta probabilidad es que la lluvia supera la curva adimensional de distribución temporal en su cuartil.

A cada lluvia de cada grupo le corresponde un porcentaje de duración de la precipitación, asignándosele por consiguiente, un porcentaje de la precipitación acumulada.

Del estudio realizado por Huff se tiene que las gráficas del primer y segundo cuartil representan, tormentas cuya duración es menor a las 12 horas, además se tiene que para el tercer cuartil las curvas ejemplifican mejor las tormentas entre 12 a 24 horas y el cuarto cuartil las tormentas con duraciones mayores a las 24 horas.

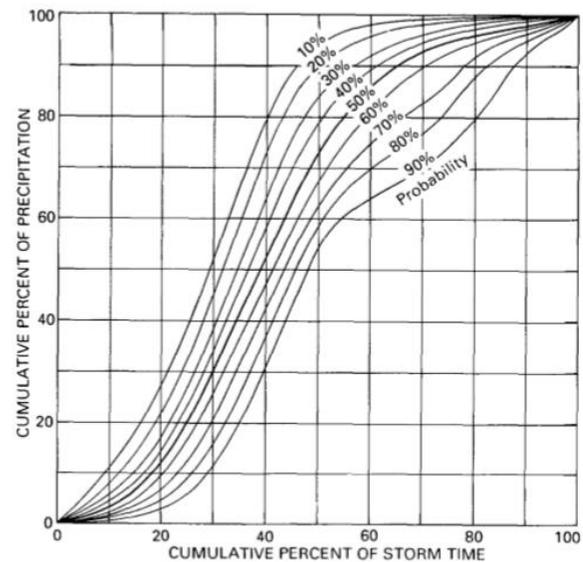


Figura 6. Curvas de precipitación vs porcentaje de duración de tormenta de Huff

Fuente: Obtenida de Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois, Huff 1967

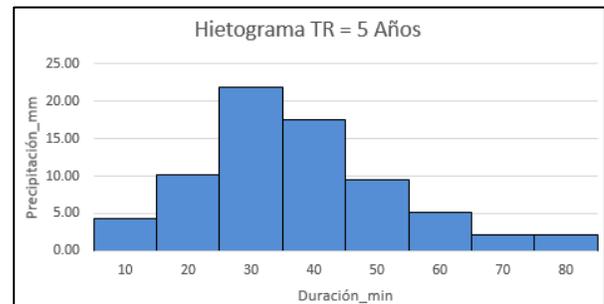


Figura 7. Hietograma mediante el método de Huff

Fuente: Creación Propia

Uno de los contra que plantea Eduardo Varas (2008) es que no queda claro para el investigador si la utilización del método genera los mismos resultados satisfactorios obtenidos por Huff en la zona de Illinois, ya que se debe de realizar los mismos estudios preliminares con el fin de contar con los mismos datos para la zona de estudio, y así poder determinar si los datos obtenidos pueden ser comparables.

Modelo Precipitación-Escorrentia

Para las cuencas en las cuales no se tiene información sobre los caudales de las avenidas del cauce que contienen, se requiere del uso de modelos que puedan generar tormentas ficticias de diseño que permitan describir el comportamiento de la cuenca para un determinado lapso de tiempo. Razón por la cual surge el modelo de precipitación-esorrentia como modelo indirecto para el cálculo de caudales.

El programa HEC-HMS 4.0 es una herramienta computacional muy utilizada para llevar a cabo el cálculo del caudal a partir de la metodología de precipitación-esorrentia mediante el modelo del SCS. En este programa se realiza la caracterización de la cuenca así como la determinación de los hidrogramas de las precipitaciones para los distintos periodos de retorno.

Los modelos de precipitación-esorrentia son herramientas de fácil uso, pero varios autores indican que son métodos con fallas, pero como lo expone Jorge Guevara (2012) esto se debe al uso indiscriminado de los métodos sin saber o determinar cual se adecua mejor a las condiciones del sitio de estudio, por lo que recalca que las buenas prácticas de aplicación están condicionadas con una adecuada elección de los parámetros y esto puede ser posible con una excelente caracterización del suelo y las coberturas del mismo.

Además concluye que los métodos de precipitación-esorrentia son aplicables en Costa Rica para cuencas pequeñas de 10 km², siempre y cuando se tenga una buena selección del modelo y de sus parámetros.

Abstracciones de Precipitación

Los modelos precipitación-esorrentia necesitan de la precipitación neta, la cual se define como la precipitación que llega a escurrir por la superficie de la cuenca por lo que para obtener esta precipitación es necesario determinar la cantidad de precipitación total y a la vez los procesos hidrológicos que llegan a disminuir dicha precipitación total. Estos factores corresponden a la infiltración del subsuelo, a la intercepción producto de la vegetación y la superficie, y a la evapotranspiración.

Para las abstracciones existe la metodología del número de curva (CN) del Soil conservation Service (SCS), este método es aplicable a áreas menores a 50 km², y supone que el suelo absorbe una cierta cantidad inicial de la precipitación (Ia) equivalente a un 0,2 del almacenamiento, este valor surge después de 112 casos que tienden a generar ese valor. Sin embargo Hawkins y Khojeini (2000) y Jiang (2001) demostraron que en el 90% de los casos el valor de "Ia" es menor que 0,2 S, el valor de S corresponde al máxima abstracción posible. Posteriormente las abstracciones van disminuyendo.

Modelo Transformación esorrentia

Cuando se emplea el modelo de precipitación-esorrentia es necesario que la precipitación causada por las lluvias se transforme en esorrentia que llega a formar parte del flujo del cauce y con esto se puede determinar el caudal.

Para realizar esta transformación existe el modelo del hidrograma unitario que es un modelo hidrológico lineal, el cual representa la función de respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico.

Para realizar el estudio mediante el modelo de precipitación esorrentia es necesario la determinación de parámetros propios de la cuenca entre los que destacan el tiempo de concentración, tiempo de retardo, número de curva, etc

Período de retorno

El período de retorno corresponde al intervalo en el cual se espera ocurra un fenómeno de precipitación máximo para la zona de estudio. Este

período se determina teniendo varias consideraciones importantes en cuanto a la importancia de la obra, así como a aspectos económicos, afectación a personas, tipo de obra, vida útil de la estructura, complejidad de la obra, entre otros.

Así por ejemplo, para una estructura de puente se tiene que el período de retorno va de entre 50 a 100 años debido a que es una estructura en la que intervienen muchos de los aspectos que se mencionaron anteriormente.

En una investigación realizada por Allen Bateman en el 2009 se establece por empirismo y experiencia que la intensidad de una lluvia es mayor a mayor periodo de retorno, es decir cuando el intervalo determinado es cada vez mayor, razón por la cual se emplean periodos de retorno prolongados dependiendo de la importancia de la estructura.

Tiempo de concentración

Máximo Villón (2004) denomina el tiempo de concentración como el tiempo que le toma a una gota de lluvia que cae en la cuenca en la parte hidrológicamente más alejada hasta llegar al desfogue de la cuenca.

Este parámetro se le asocia a la duración de la tormenta de diseño pero suele ser cuestionable ya que no es del todo cierto que la duración máxima se da en el punto más apartado de la cuenca ya que puede existir zonas más cercanas en las que las condiciones de pendiente, escurrimiento y demás factores hagan que el tiempo sea mayor.

Tiempo de Retardo

El tiempo de retardo se define como el tiempo que transcurre desde el punto del centro de gravedad del hidrograma de precipitaciones hasta el punto donde se sitúa el centro de gravedad del hidrograma de caudales. (Villón, 2004)

Coefficiente de Escorrentía

La escorrentía se define como el agua de lluvia que llega al cauce de evacuación, por otro lado, el coeficiente de escorrentía se conoce como la razón que existe entre el agua de lluvia que

escurre y que llega a la cuenca y la precipitación total. (Villón, 2004)

Este coeficiente depende de distintos factores que lo modifican, entre ellos el tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de la intensidad y distribución del tiempo, la humedad inicial del suelo, tipo de terreno, tipo de cobertura vegetal, lapso de tiempo, entre otros. Todos estos factores provocan que el coeficiente de escorrentía sea constante, por lo que es usual utilizar valores medios de este para evitar el exceso o falta de este valor al aplicarlo en una fórmula.

Allen Bateman (2009) define el coeficiente de escorrentía como la relación promedio entre el volumen de agua que escurre superficialmente en una cuenca durante un periodo de tiempo, dividido por el volumen total caído. Se usa para saber la producción media anual de una cuenca.

Número de curva

El número de curva es un parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica, en donde se consideran algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas, así como por el grupo hidrológico de suelo.

La metodología del número curva (CN), es la más utilizada para convertir la precipitación total en precipitación efectiva, surgió tras años de estudio del fenómeno hidrológico para diferentes tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad. La representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe), generó una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN (de ahí el nombre del método), que varía de 1 a 100, según sea el grado del escurrimiento directo. Así un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra (Lavao, 2014).

Hidrogramas

Para Villón (2004) los hidrogramas son una representación gráfica que detalla la variación de los caudales con respecto al tiempo de una

manera cronológica para la zona específica que se requiere analizar.

El área bajo la curva representa el volumen de agua que pasa por el desfogue de la cuenca el cual puede ser obtenido al multiplicar el caudal ubicado en las ordenadas por el tiempo correspondiente a ese caudal.

Entre los aspectos que se pueden observar al obtener un histograma se tendría que mencionar que se evidencia el aporte que genera la precipitación neta así como el aporte realizado por las abstracciones o agua superficial que escurre hacia el cauce. Otro aporte de los hidrogramas es el poder determinar el caudal máximo o volumen máximo de determinada precipitación lo cual es esencial al determinar las crecidas producto de las precipitaciones.

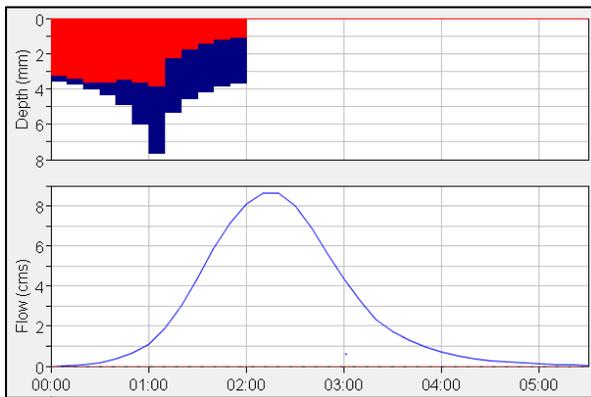


Figura 8. Hidrogramas de diseño
Fuente: Obtenido del programa HEC-HMS 4.0

Método racional

Método creado en 1889 pero por su sencillez todavía se sigue utilizando para el cálculo de caudales de avenidas máximas para las fases de diseño de estructuras de drenajes en proyectos viales y de aguas de lluvia. La fórmula es aplicable a cuencas pequeñas con una superficie menor a 200 km². (K, Vergara, & Mery, 2004)

La hipótesis del método se basa en que una cuenca, producirá su valor máximo de descarga en el mismo momento en que todos los puntos de la cuenca hayan contribuido al punto de diseño. (Angel & Rospigliossi, 2010)

En el estudio de Jorge Guevara (2012) se realizó una comparación entre los resultados

obtenidos por el método de SCS y el método Racional en donde el método racional obtuvo valores de caudal mayores, por lo que expone una de las contras del método racional la cual es el sobre estimar los resultados de caudal al ser un método conservador y simplista que no requiere de muchos parámetros.

Estimación de Niveles de creciente

Ecuación de Manning

Esta ecuación fue formulada a partir de siete ecuaciones diferenciales basadas en los datos experimentales de Basin y además verificadas a través de 170 observaciones.

Por tener una forma simple y al generar resultados satisfactorios para aplicaciones prácticas, ha provocado que sea la fórmula más utilizada para el cálculo de flujos en canales abiertos. (Chow, 2004)

La ecuación que describe Manning es la siguiente:

$$v = \frac{1}{n} * \sqrt{s} * Rh^{2/3} \quad \text{Ec (4)}$$

Donde:

V: Es la velocidad media en la sección transversal

n: El coeficiente de rugosidad de Manning

s: Es la pendiente de la línea de energía del flujo

Rh: Es el radio hidráulico de la sección transversal del flujo

Modelación hidráulica en HEC-RAS 5.0.5

El modelo seleccionado para la simulación hidráulica fue el programa HEC-RAS 5.0.5 (River Analysis System del Hydrologic Engineering Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos). Este modelo en una dirección se basa en el cálculo de flujo gradualmente variado a través de la solución de la ecuación de energía

unidimensional. Considera las pérdidas de energía producto del contacto que se da en todo el cauce y de procesos de expansión y contracción del flujo.

Para casos de flujo rápidamente variado, como saltos hidráulicos, confluencias y flujo en puentes el modelo incorpora la solución de la ecuación de momentum del flujo. (Alvarez, 1997)

Coeficiente de Rugosidad

El coeficiente de Rugosidad se considera como la medida de la resistencia al flujo en un determinado canal.

Este es uno de los parámetros que suele ser complicado de estimar ya que no existe un método que sugiera un valor exacto por lo que varios autores han expresado tablas a partir de fórmulas empíricas o por medio de la experiencia para facilitar dicho cálculo. Para los ingenieros con experiencia este proceso de determinación sugiere el criterio ingenieril y la experiencia obtenida durante años en la práctica pero para los ingenieros principiantes se convierte en una búsqueda de información de distintos autores.(Chow, 2004)

Metodología

Caracterización de la quebrada el Molino

Ubicación

El presente trabajo se realizó en el puente Pinares ubicado 1 km al sur de la esquina Suroeste del Plantel Municipal, sobre la ruta cantonal N° 3-01-214.



Figura 9. Ubicación puente Pinares
Fuente: Obtenido de Google Earth Pro

Descripción de la estructura actual

La estructura existente sobre la quebrada El Molino no se encuentra registrada en el inventario de puentes ya que está catalogada como alcantarilla. Esta es una obra antigua construida por los mismos vecinos del sitio, por lo que presenta una estructura sencilla constituida por una superestructura de concreto la cual es una losa de concreto de 30 cm de espesor soportada por una estructura compuesta por partes del chasis de un tren de ferrocarril y tablonces de madera que descansan sobre bastiones cuya estructura se compone de dos muros, uno a cada lado de los márgenes del río, el espesor de estos muros es de 30 cm; además cuenta con una luz libre de 9 metros de longitud con un ancho de 3,5 m. Por otra parte la distancia entre el espejo de agua y la parte inferior de la superestructura del puente es de 2,25 metros. Con la revisión visual no se pudo ver una estructura de cimiento en el muro socavado.

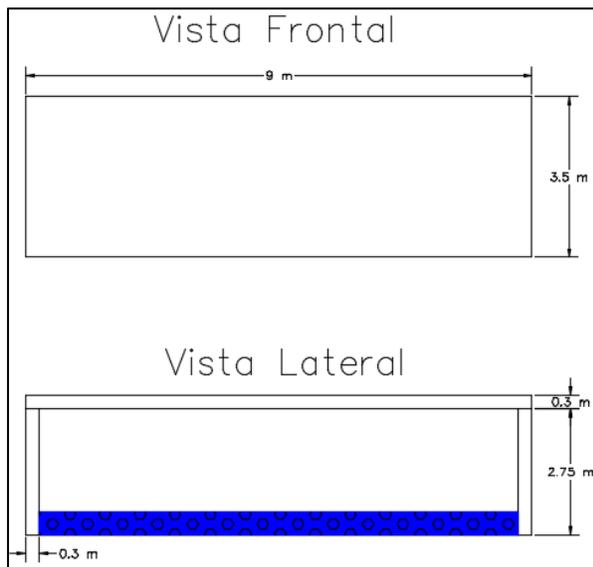


Figura 10. Dimensiones de la estructura actual Puente Pinares.

Fuente. Creación Propia

Condición del puente Pinares

Para establecer las posibles causas que provocaron el fallo de la estructura en el puente Pinares se debe primero realizar una inspección para verificar la condición en que se encuentra la obra; lo cual es de suma relevancia a la hora de realizar cálculos, por ejemplo la socavación, ya que se puede apreciar la existencia de remoción o no de material tanto en la estructura como en el terreno alrededor de esta.

Por otra parte esta revisión permite establecer distintas medidas de prevención o mitigación de daños a la estructura, ya que se pueden detectar factores, como por ejemplo objetos desechados por vecinos del sitio que indiquen una potencial amenaza de daño al obstruir el flujo libre de la quebrada.



Figura 11. Afectación puente Pinares

Fuente: Obtenido de <http://www.laprensalibre.cr/Noticias/detalle/121997/increible-lo-que-se-llevo-furia-de-lluvia-en-cartago>

Entre los daños encontrados en la estructura está la socavación de uno de los bastiones en donde se puede apreciar que la estructura está soportada solamente por varias rocas, además se presenta la fractura del muro socavado y un desplazamiento de su posición. Por último se tiene la pérdida de parte de su estructura de ruedo, por lo tanto todo lo anterior hace que el paso de vehículos por la estructura sea negado.



Figura 12. Estado del puente Pinares. Socavación del bastión.
Fuente. Creación Propia

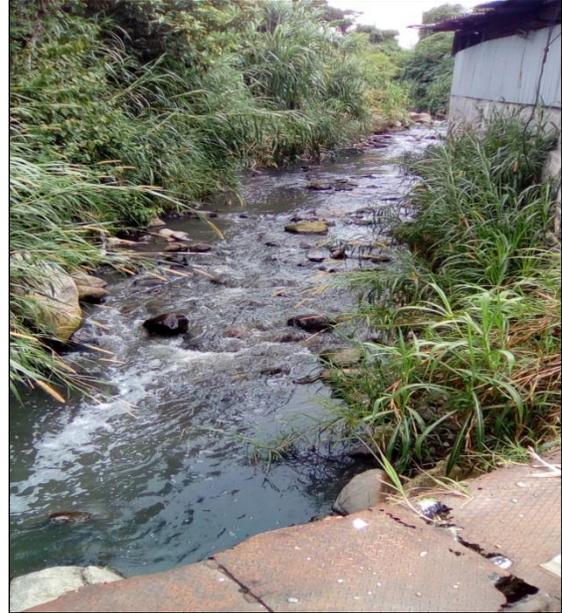


Figura 14. Condición puente Pinares.
Fuente: Propia



Figura 13. Estado del puente Pinares. Pérdida de capa de rueda.
Fuente. Creación Propia

Según vecinos cercanos al sitio la estructura se ve sobrepasada cuando ocurren precipitaciones muy altas por la acumulación de materiales que impiden el paso del agua.

Respecto al cauce es muy sinuoso y presenta vegetación abundante, lo cual genera una alta resistencia al flujo.

Propuesta de estructura transversal de paso

Como parte del estudio se propone una estructura tipo box culvert, esto para poder realizar una comparación con la estructura actual, y así evaluar el comportamiento de ambas estructuras ante el caudal que transcurre por ellas.

La idea de esta propuesta es reducir el efecto de estrangulamiento o reducción de sección del cauce, que se presenta en la actual estructura, lo cual en teoría sugiere que se presenten tirantes de menor elevación y velocidades de salida de la estructura menores.

La estructura presenta la misma elevación de la actual estructura de 2,75 metros desde el lecho de río hasta la parte inferior de la losa superior; así como una longitud total de 12 metros y un ancho de 14 metros, debido a que se considera que sea a doble carril y con pasos peatonales a ambos lados.

Para la propuesta se tomaron diseños y dimensiones de las especificaciones técnicas de Superestructura Estándar de 12 metros que se encuentran en la página del ministerio de obras públicas y transportes (M.O.P.T).

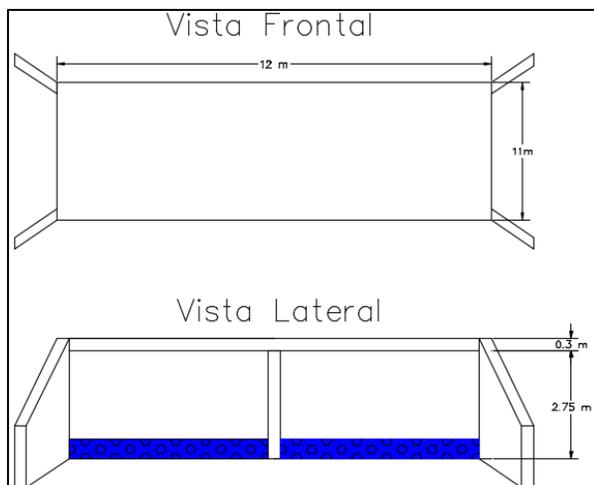


Figura 15. Dimensiones de la estructura propuesta para la estructura transversal.
Fuente. Creación Propia

Obtención de la información hidrológica

Como punto de partida se debe de recopilar la información suficiente que permita determinar los parámetros necesarios para la determinación de los distintos métodos hidrológicos y con ello discernir las características específicas de la cuenca en estudio. Esta información debe de ser obtenida tanto en campo como por fuentes bibliográficas y registros de la quebrada.

Entre los datos recopilados en campo se tiene la toma de fotografías en el sitio de la obra para poder establecer características importantes de la cuenca como la presencia y tipo de vegetación en la zona, la clase de material que compone el cauce, posibles causas de afectación, etc.

Además se realiza el uso de topografía para establecer las características geométricas del cauce realizando perfiles transversales a cada 5 metros a lo largo de un trayecto de 280 metros, de los cuales 170 metros corresponden a un tramo situado aguas arriba y los restantes 110 metros hacia aguas abajo.

La topografía esta referenciada a los parámetros de georreferenciación que rigen en Costa Rica esto quiere decir que cuenta con la proyección CRTM05 así como de la elipse WGS84 por lo que a la hora de montar los datos topográficos a los distintos programas de cálculo esencialmente el software HEC-RAS 4.0 estos

cumplan con lo que se establece en materia de georreferenciación en el país.

Para el caso del presente estudio el levantamiento se llevó a cabo por medio de un dron modelo GPS potensic drone T25 con cámara de alta calidad 1080P, además cuenta con vuelo asistido por GPS; y mediante la toma de fotografías aéreas se establece las alturas que se presentan en la superficie de la cuenca. El vuelo se realizó una altura de 20 m, esto para cubrir un tramo de 300 metros de longitud. La ventaja de este tipo de técnica es que se pueden tomar una gran cantidad de puntos en una sola imagen y en un tiempo muchísimo menor en comparación a un levantamiento con estación total; pero la desventaja es que al ser una fotografía lo cual es un plano en 2D a la hora de pasarlo a autocad se genera una superficie en ciertos tramos con muchas diferencias de alturas, esto porque objetos como árboles, postes o casas son incluidos en los puntos del levantamiento razón por la cual se debe de trabajar la superficie para poder establecer el nivel de terreno.



Figura 16. Ortofoto de alta resolución tomada por medio del dron.

Fuente. Tomado del levantamiento topográfico



Figura 17. Puntos generados durante el levantamiento por medio de dron.

Fuente. Obtenido del levantamiento topográfico y por medio de Civil 3D

Otro aspecto importante a considerar en la obtención de información para el análisis de la cuenca se refiere al plan regulador que posee la municipalidad de Cartago, esto para conocer el uso que pueden tener los terrenos cercanos a la quebrada lo cual es importante para ver el comportamiento de la permeabilidad y la escorrentía en un futuro sea este próximo o lejano esto porque puede afectar el cauce ya que el omitirlo no representaría el comportamiento real y sería incurrir en un error.

Determinación de parámetros morfométricos

Parámetros Generales

Una vez que se tenga la información necesaria se hace uso del programa ARGIS 10.5 del departamento de ingeniería de la armada de los Estados Unidos y haciendo uso de la información tipo ráster presente en el Atlas digital de Costa Rica 2014 desarrollado por el ingeniero Edgar Ortiz Malavasi. ARGIS 10.5 permite delimitar la cuenca mediante la divisoria de aguas para así establecer la superficie de la cuenca. Para esto se debe de establecer el punto de desfogue que en este caso es la ubicación del puente ya que lo que se requiere conocer es el comportamiento del

cauce tanto aguas arriba así como en el punto cercano a la estructura.

Posterior se establece un perímetro en la cuenca y otras características como la dirección del flujo del agua y su respectiva acumulación, para así poder al final tener las propiedades que son de importancia en el estudio, entre las que se puede mencionar el área de cobertura, el perímetro, longitud, pendiente, etc.

Área (A)

Para la determinación del área se hace uso del programa Argis y mediante la utilización de las capas del mapa digital de Costa Rica 2014.

Perímetro (P)

Para la determinación del perímetro se hace uso del programa Argis y mediante la utilización de las capas del mapa digital de Costa Rica 2014.

Longitud de la cuenca (L)

Para la determinación de la longitud de la cuenca se hace uso del programa Argis mediante la utilización de las capas del mapa digital de Costa Rica 2014.

Parámetros asociados a la forma

Coefficiente de compacidad o de Gravelius (Kc)

Para determinar este parámetro se debe establecer la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo con área igual a la de la cuenca de análisis.

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad \text{Ec (5)}$$

Donde:

Cg = Coeficiente de Gravelius

P = Perímetro de la cuenca, km

A = Área de la superficie de la cuenca, km²

Este coeficiente nos da indicaciones sobre la escorrentia y de la forma del hidrograma de precipitaciones. Entre mas cercano a uno la cuenca es mas susceptible a inundaciones.

Cuadro 1. Valores de coeficiente de Gravelius	
Cg	Forma
1	Redonda
1 - 1,25	Redonda a ovalo redonda
1,25 - 1,50	Ovala redonda a Ovalo oblonga
1,50 - 1,75	Ovalo oblonga a rectangular oblonga

Fuente: (Corbelle-rico, 2016)

Rectángulo equivalente

Lo que se busca es transformar la superficie de la cuenca en una superficie rectangular de lados L y l mediante las ecuaciones 6 y 7

$$L = \frac{Cg\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Cg}\right)^2} \right] \quad \text{Ec (6)}$$

$$l = \frac{Cg\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Cg}\right)^2} \right] \quad \text{Ec (7)}$$

Donde:

L= altura del rectángulo en km

l= base del rectángulo en km

Cg=Coeficiente de Gravelius

A=superficie de la cuenca en km²

Factor de forma de Horton (Kf)

El factor de forma de Horton permite establecer cual cuadrada puede ser la cuenca, razón por la cual se establece la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de la cuenca. A mayor factor de Horton es más probable que la cuenca sea propensa a presentar crecidas en su caudal.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec (8)}$$

Donde:

A= Área de la cuenca en km²

L² = Cuadrado de la longitud de la cuenca en km²

El cuadro 2 expresa los rangos para la determinación de los valores obtenidos para el factor de forma Horton.

Cuadro 2 Valores interpretativos del factor de forma (Kf)	
Valores Aproximados	Forma de la cuenca
< 0,220	Muy Alargada
0,220-0,300	Alargada
0,300-0,370	Ligeramente Alargada
0,370-0,475	Ni alargada Ni ensanchada
0,450-0,600	Ligeramente Ensanchada
0,600-0,800	Ensanchada
0,800-1,200	Muy ensanchada
> 1,200	Rodeando el desagüe

Fuente: (Horton,1932)

Relación de elongación (Re)

La relación de elongación trata sobre la razón que existe entre el diámetro de un círculo imaginario cuya área igual al área de la superficie de la cuenca y la longitud de la cuenca. La ecuación que dicta el cálculo de este parámetro es la que se muestra a continuación.

$$Re = \frac{D}{L} \quad \text{Ec (9)}$$

Donde:

D= Diámetro Área Circular Equivalente en Km

L= Longitud de la cuenca en km

Cuando el valor de la relación de elongación se acerca a la unidad indica que la cuenca es muy plana y circular; y para cuencas en donde el valor de la razón de elongación se encuentra en el rango de 0.5 a 0.8 implica que la cuenca es plana pero con porciones accidentadas. (Jimenez et al., 1997)

Parámetros de relieve

Índice de alargamiento (La)

Para determinar el índice de alargamiento se hace uso de la siguiente fórmula.

$$La = \frac{Lm}{l} \quad \text{Ec (10)}$$

Donde:

La= índice de alargamiento

Lm= Longitud máxima de la cuenca en km

l= Ancho máximo de la cuenca en km

Cuadro 3. Rangos Índice de Alargamiento	
Índice de Alargamiento	Clase de alargamiento
0 a 1,4	Poco alargada
1,5 a 2,8	Moderadamente Alargada
2,9 a 4,2	Muy Alargada

Fuente: (Corbelle-rico, 2016)

Coefficiente de masividad (Km)

Para determinar el coeficiente de masividad se procede a realizar el cálculo de la altura media de la cuenca y el área para luego realizar la relación entre estas; como se muestra en la siguiente fórmula.

$$Km = \frac{Hmedia}{A} \quad \text{Ec (11)}$$

Donde:

Km= Coeficiente de masividad

A= Área de la cuenca en km²

Hmedia= Altura media de la cuenca en km

Cuadro 4. Clases de valores de masividad	
Rangos	Clases de masividad
0 a 35	Muy montañosa
35 a 70	Montañosa
70 a 105	Moderadamente montañosa

Fuente: (Hernández et al., 2016)

Desnivel altitudinal (DA)

Se determina mediante el programa ArcGIS 10.5 los niveles de cota de altura más alta y baja de la cuenca para así realizar una simple diferencia entre ambas.

$$DA = HM - Hm \quad \text{Ec (12)}$$

Donde:

Da=Desnivel Altitudinal en km

HM=Altura maxima de la cuenca en Km

Hm= Altura menor de la cuenca en Km

Pendiente media del cauce (so)

Se obtiene al tomar el desnivel altitudinal del cauce y dividirlo por su longitud.

Cuadro 5. Rangos aproximados del cauce principal	
Pendiente Media del cauce principal	Clases
1 a 5	Suave
6 a 11	Moderado
12 a 17	Fuerte

Fuente: IBAL , 2009

Pendiente media de la cuenca (S)

Haciendo uso del programa ArcGIS 10.5 mediante las capas tipo DEM se realiza la determinación de las pendientes del área hidrologica de la quebrada el Molino.

Cuadro 6 Rangos Aproximados pendiente media de la cuenca	
Pendiente media (%)	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 30	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente Pérez, 1979

Curva Hipsométrica

Para realizar esta curva se requiere del uso del programa ArcGIS 10.5 de donde se obtienen los porcentajes de pendiente, áreas y alturas, para luego graficar en el eje de las abscisas los valores correspondientes al área acumulada de la cuenca en porcentaje y en el eje de las ordenadas las altitudes en metros.

De este tipo de gráfica se puede obtener la altura media la cual corresponde al 50% del área acumulada.

Histogramas de frecuencias altimétricas

Para crear el histograma de frecuencias altimétricas se debe de graficar en el eje de las abscisas los rangos de alturas de la cuenca y en el eje de las ordenadas el porcentaje del área pero a diferencia de la curva hipsométrica el área no es acumulada sino que es la correspondiente para el rango de las alturas.

De esta gráfica se obtiene la altura más frecuente de la cuenca correspondiente a la columna mayor en el eje de los porcentajes.

Parámetros de red hidrográfica

Rango de Orden	Clase de Orden
1 a 2	Bajo
2 a 4	Medio
4 a 6	Alto

Fuente: (Corbelle-rico, 2016)

El sistema de Horton

Para determinar el nivel de orden de la cuenca de la quebrada el Molino se debe de revisar como se ramifican los distintos afluentes al cauce principal para luego asignar el orden, el cual va a ser un orden mayor al afluente que le tributa.

Por ejemplo, si en un cauce existe un sólo afluente que tributa al cauce principal entonces el valor del orden según Horton será de dos.

El sistema de Strahler

Para este sistema de clasificación de orden se analiza la cantidad de afluentes que aportan al cauce principal, sin embargo la quebrada no posee un orden definitivo, sino que puede variar a lo largo de su trayectoria.

Densidad de drenaje (Dd)

Una mayor densidad de drenaje indica mayor estructuración de la red hidrográfica y mayor efecto erosivo. (Corbelle-rico, 2016)

< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente: (Corbelle-rico, 2016)

Relación de bifurcación (Rb)

Para el cálculo de este parámetro se debe establecer la cantidad de ordenes existentes en la cuenca y para cada uno de estos la cantidad de cauces, para posteriormente realizar la razón entre el número de cauces de determinado orden y la cantidad de cauces del orden inmediatamente superior a este.

Permite predecir potenciales crecidas en la cuenca. Valores bajos de esta relación indican cuencas bien drenadas que a su vez podrían provocar crecidas más violentas (Strahler, 1957; Horton, 1945)

La fórmula para el cálculo de este parámetro es la siguiente.

$$Rb = \frac{Nu}{Nu+1} \quad Ec (13)$$

Donde:

Rb = Relación de bifurcación

Nu = Número de elementos de un Orden

Nu+1 = Número de elementos de un orden mayor

Valores altos indican que el terreno es escarpado y los suelos son muy erosionables. Por otra parte

que la cuenca presenta una amplia red hidrográfica con muchos cauces tributarios con rápida respuesta a la precipitación (Aparicio, 1996)

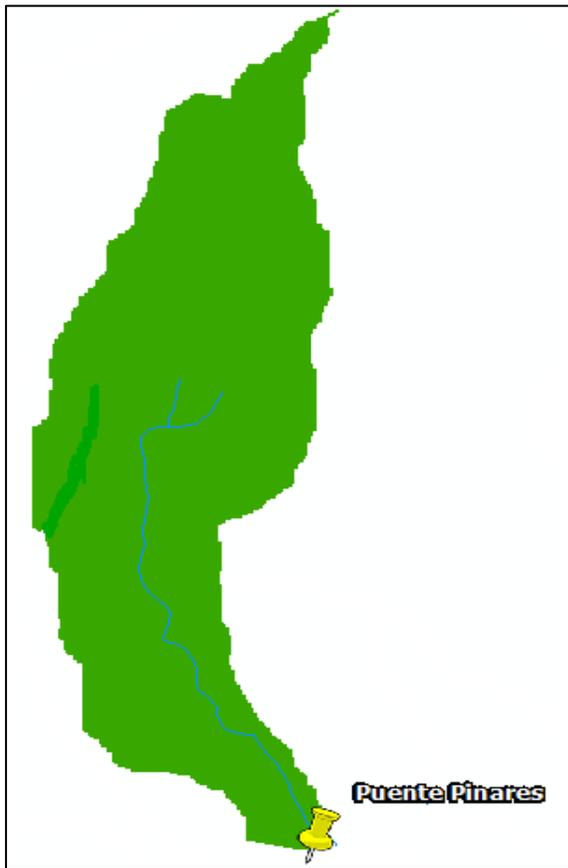


Figura 18. Cauce quebrada el Molino
Fuente: ArcGIS 10.5

Coeficiente de circularidad de Miller (Cc)

Para obtener este parámetro se hace uso de la ecuación 14, y cuyo resultado indica que tan redonda puede ser la cuenca.

Se tiene que entre más cercano a la unidad la cuenca va a presentar una forma más redondeada.

$$Cc = 4\pi \frac{A}{p^2} \quad \text{Ec (14)}$$

Donde:

A= Área de la cuenca en km²

P= Perímetro de la cuenca en km

Estimación de Caudales de diseño

Para la determinación del caudal se utiliza el método de precipitación-escorrentía mediante el programa HEC-HMS 4.2.1, el cual requiere de la creación de tormentas de diseño como se indicara más adelante en el presente trabajo.

Por otra parte también se calculará el caudal a partir de la fórmula planteada en el método racional para establecer una comparación con los resultados obtenidos que se obtengan con el programa HEC-HMS 4.2.1.

Método racional

Para el desarrollo del método racional se debe de hacer uso de la fórmula que se muestra a continuación.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad \text{Ec (15)}$$

Donde:

Q = Caudal, m³/s

C = Coeficiente de escorrentía, Adimensional

I = Intensidad de precipitación para el tiempo de duración de la tormenta, mm/h

A = Área de la cuenca, km²

Para determinar los distintos factores de los que depende la fórmula, se debe de establecer la duración de la tormenta, la cual se toma como el valor del tiempo de concentración, además se requiere el área; y el coeficiente de escorrentía correspondiente para la cuenca de la quebrada El Molino utilizando la tabla recomendada para el método racional (Ven te chow,1994).

Coeficientes de escorrentía usados en el método racional							
Características de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
(Zonas urbanas)							
- Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
- Concretos/Techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
- Zonas Verdes (jardines, parques, etc...)							
<i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
- Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
- Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
- Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Figura 19. Obtenido de Hidrología aplicada, Ven te Chow. (1994)

Periodo de retorno

Para determinar el periodo de retorno se toma en cuenta el tipo de estructura, ya que los periodos de retorno son distintos según la estructura debido a que se consideran varios criterios de selección, por ejemplo cantidad de vehículos que pasan por la estructura, clase de estructura sea esta puente, alcantarilla u otra; y demás criterios de selección que clasifican las estructuras según el periodo para el cual diseñaran sus tormentas.

En el **cuadro 9** muestran varios criterios de selección.

Cuadro 9. Periodos de retorno para distintos criterios de selección de puentes		
Fuente	Tipo de estructura	Periodo de retorno (Años)
INVIAS,2009 (Instituto Nacional de Vías de Perú)	Puente con luz entre 10 a 50 m	50
USAT	Puente sobre carretera menos importante o alcantarilla sobre carretera importante	25
www.engineeringenotes.com	Todo tipo de estructura	50
Víctor M. Ponce,2008	drenaje urbano mayor a 100 hectáreas	100
1987 HBDB return period	Puente donde transitan menos de 250 vehículos por día	50

Determinación de las tormentas de diseño

Para obtener la precipitación para las tormentas de diseño se hace uso de la **ecuación 16**, la cual corresponde a la estación meteorológica ubicada en el tecnológico de Costa Rica, suministrado por el IMN (Instituto meteorológico Nacional).

$$I = 152,08 * \left(\frac{T^{0,111}}{D^{0,274}}\right) \quad \text{Ec (16)}$$

Donde:

I = Intensidad (mm/h)

T = Período de Retorno (Años)

D = Duración (min)

Debido a la cercanía con la quebrada El Molino se elige como la que podría describir mejor la intensidad de la lluvia en la zona.

La intensidad se toma para periodos de retorno de 2, 5,10, 25, 50 y 100 años; se realiza hasta 100 años debido a que el periodo de retorno se relaciona a la importancia del tipo de obra a considerar, ya que existe una afectación distinta entre unas estructuras a otras. La elección del periodo de retorno está en función de la economía, daño a la vida humana y a la necesidad de que este en uso la estructura, por lo que al tratarse de una obra de drenaje importante, requiere considerar un periodo prolongado en que ocurra un suceso climático de mayor magnitud, ya que entre mayor sea el periodo de retorno mayor es la precipitación que ocurre, porque existe mayor

probabilidad que ocurra una o varias tormentas en un periodo de tiempo más prolongado en comparación a un lapso de tiempo más corto.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Una vez se tiene la precipitación para los distintos periodos de diseño y tiempos de duración de la precipitación se procede a realizar las gráficas en donde el eje de las ordenadas corresponden a los valores de las intensidades en mm/h y para el eje de las abscisas se les asignara el valor de la duración correspondiente en unidades de minutos.

Con esto lo que se va a obtener es una gráfica con las curvas que representan la intensidad, duración y frecuencia de la tormenta.

Hietogramas

Ya teniendo el valor de las precipitaciones para los distintos periodos de retorno con sus correspondientes curvas IDF se debe de determinar cómo varía la precipitación a lo largo de la duración de la tormenta por lo que la confección de los hietogramas es muy importante.

Para esto existen varios métodos, para el caso de la quebrada El Molino se utilizaran dos métodos los cuales son el método de bloque alterno y el método de Huff esto para determinar cuál de los

dos métodos representa mejor el caudal de la cuenca.

Antes de realizar cualquiera de los dos métodos se realiza un procedimiento previo en el que se hace uso de las curvas IDF, cuya precipitación está en unidades de mm/h, por lo que se debe de pasar a unidades de mm, por lo tanto las distintas duraciones de tormenta que están en unidades de minutos se dividen por 60 para tener la duración en unidades de horas, y posterior a esto se multiplica por la intensidad para así cancelar las horas de la precipitación y con ello dejar dicha intensidad en mm.

Método bloques alternos

El hietograma asume que la intensidad media del conjunto de bloques debe ser igual a la intensidad que se obtiene de la curva IDF para cualquier intervalo de tiempo. Luego se procede a seleccionar el período de retorno de diseño, y se utiliza la curva IDF para leer la intensidad de precipitación correspondiente a la región en análisis para cada una de las duraciones. Los incrementos o bloques obtenidos se deben reordenar de una forma en que el bloque de intensidad máxima quede en el centro de la duración definida y el resto de bloques se colocan en orden decreciente alternativamente a derecha e izquierda del bloque central (Chow, et al., 1988).

Método de distribución acumulada (Huff, 1967)

Este método consiste en describir la precipitación pero no haciendo un reajuste de los datos de precipitación tal como se realiza en el método de bloque alterno sino expresando el comportamiento de la precipitación a lo largo de su duración.

Para su confección se realiza una tabla en Excel en la cual la primer columna va a ser el valor de la precipitación de manera similar al método de bloque alterno; para realizar la segunda columna se debe realizar primero un procedimiento en el cual se toma la duración de la tormenta y los intervalos de tiempo en minutos sean estos por ejemplo 10, 20, 30, ..., 120 min; posteriormente se realiza una división entre las duraciones y la duración total teniendo un porcentaje de duración para cada intervalo de tiempo.

Para la tercera columna ya teniendo los valores de porcentaje de duración se hace uso de la gráfica correspondiente para el segundo cuartil del estudio "Time Distributions of Heavy Rain storms in Illinois" de Huff que se encuentra en la sección de anexos, para así obtener el valor de precipitación de tormenta acumulada.

La manera de utilizar estas graficas consiste en entrar a través de los porcentajes de duración anteriormente obtenidos e intersectar la curva del 50% correspondiente a la mediana de los datos establecidos para realizar las curvas a partir de ese punto se traza una línea horizontal para obtener la precipitación acumulada.

Para la cuarta columna una vez se tenga el porcentaje de precipitación para cada intervalo de tiempo se multiplica por la precipitación máxima para el tiempo de concentración establecido. Para terminar con la tabla se realiza una quinta columna en donde se realizara un delta de la precipitación de la cuarta columna en donde para la primer celda de arriba hacia abajo se colocara la precipitación obtenida en la primer celda de la cuarta columna ubicada en la misma fila; para la siguiente celda de la quinta columna se realiza una resta entre las celdas del primer cálculo y la siguiente más abajo, realizándose el mismo procedimiento para las siguientes celdas ubicadas hacia abajo.

Después de esto se procede a realizar el grafico de precipitación en mm respecto a la duración en minutos.

Uso del programa HEC-HMS 4.0

Cuando se requiere obtener el caudal en zonas donde no se tiene un control de las precipitaciones o caudales en la zona surge como solución el uso del modelo de precipitación-escorrentía para este trabajo se utiliza el modelo HEC-HMS 4.0, el cual es el método indirecto más ampliamente utilizado alrededor del mundo.

Para su utilización se debe de tener claro cuál es el método a emplear para el desarrollo tanto de las abstracciones de precipitación así como para la formación de dicha precipitación. Para el presente trabajo se utiliza el método de número de curva del SCS para el cálculo de las abstracciones y el método del hidrograma unitario del SCS para

la determinación de la transformación de la precipitación.

Modelo Precipitación-Escorrentia

Para los modelos de precipitación-escorrentia es necesario determinar la precipitación neta que llega hacia el cauce de la quebrada. Para realizar este procedimiento se hace uso de la herramienta computacional HEC-HMS 4.2.1 el cual realiza una serie de configuraciones matemáticas y dentro de estas se incluyen métodos que permiten considerar los efectos que modifican la precipitación neta que llega al cauce de la quebrada; así como la transformación que se debe hacer a esa precipitación la cual va a formar parte del flujo del río.

Parámetros para la aplicación del modelo de precipitación-escorrentia

Tiempo de concentración (Tc)

Para determinar el periodo de concentración de la cuenca se debe hacer uso de fórmulas empíricas lo cual requiere conocer la procedencia de dichas fórmulas para así poder hacer uso de las ecuaciones que se desarrollaron para lugares o cuencas con las condiciones similares para cada una. Entre las fórmulas utilizadas se encuentran California Culver Practice que es esencialmente la ecuación de Kirpich para pequeñas cuencas montañosas en California. La fórmula de Kirpich se estimó originalmente para cuencas de Tennessee y Pensilvania en los Estados Unidos.

La fórmula de Bransby-Williams se recomienda para cuencas menores a 75 km². Este tiempo de concentración es útil para establecer la duración de la tormenta de diseño.

Las siguientes son las fórmulas empleadas para el cálculo de los diferentes resultados del tiempo de concentración.

Giandotti

$$t_c = \frac{4\sqrt{S}+1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad \text{Ec (17)}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración en horas.

A = Superficie de la cuenca en Km².

L = Longitud del cauce principal en Km.

H = Altura media de la cuenca sobre el punto estudiado en km.

Bransby-Williams

$$t_c = 14,6 * L * A^{-0,1} * S^{-0,2} \quad \text{Ec (18)}$$

Donde:

t_c = Es el tiempo de concentración en minutos

L = Es la longitud del curso de agua más largo en km

A = Es el área de la cuenca en km²

S = Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m

Clark

$$T_c = 0,355 * \left[\frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,583} \quad \text{Ec (19)}$$

Donde:

T_c = Es el tiempo de concentración en horas

A = Es el área de la cuenca en km²

S = Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m

Passini

$$T_c = \frac{[0,108 (A*L)^{0,5}]}{S^{0,5}} \quad \text{Ec (20)}$$

Donde:

T_c = Es el tiempo de concentración en horas

A = Es el área de la cuenca en km²

L = Es la longitud del curso de agua más largo en km

S = Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m

Pilgrim y McDermott

$$T_c = 0,76 * A^{0,38} \quad \text{Ec (21)}$$

Donde:

T_c = Es el tiempo de concentración en horas

A = Es el área de la cuenca en km²

Témez

$$T_c = 0,3 \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76} \quad \text{Ec (22)}$$

Donde:

Tc= Es el tiempo de concentración en horas

L= Es la longitud del curso de agua más largo en km

S= Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m

Valencia y Zuluaga

$$T_c = 1,7694 * A^{0,325} * L^{-0,096} * S_0^{-0,290} \quad \text{Ec (23)}$$

Donde:

Tc= Es el tiempo de concentración en horas

A = Es el área de la cuenca en km²

L= Es la longitud del curso de agua más largo en km

So = Es la pendiente en porcentaje

Método Racional Modificado

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad \text{Ec (24)}$$

Donde:

Tc= Es el tiempo de concentración en horas

S= Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m

L= Es la longitud del curso de agua más largo en km

Federal Aviation Administration (1970)

$$t_c = 0,7035 \frac{(1,1-C)*L^{0,5}}{S^{0,333}} \quad \text{Ec (25)}$$

Donde:

tc= Es el tiempo de concentración en minutos.

L=Es la longitud del curso de agua más largo en km.

C= Es coeficiente de escorrentía del método racional.

S= Es la pendiente promedio del cauce principal en m/m.

Método Racional Generalizado

$$t_c = \frac{60*n*L}{H^{0,3}} \quad \text{Ec (26)}$$

Donde:

tc= Es el tiempo de concentración en minutos.

L=Es la longitud del curso de agua más largo en km.

H= Es la diferencia de nivel de la divisoria de aguas y la salida en metros.

Ecuación del SCS

$$T_c = \frac{100*Lp^{0,8} * \left[\left(\frac{1000}{NC} \right) - 9 \right]^{0,7}}{1900*(S*100)^{0,5}} \quad \text{Ec (27)}$$

Donde:

Tc= Es el tiempo de concentración en horas

Lp= Longitud del cauce en pies

NC= Numero de curva

S= pendiente promedio del cauce principal en m/m

Tiempo de Retardo (Tr)

El tiempo de retardo se calcula mediante el método del SCS considera un factor de retención o almacenamiento calculado mediante la utilización del número de curva CN haciendo uso de la siguiente formula:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec (28)}$$

s = Factor de retención máxima

CN = Número de Curva (adimensional)

Posteriormente el SCS indica que el tiempo de retardo es un porcentaje del tiempo de concentración de la cuenca (60%).

$$Tr = 0,6 * Tc \quad Ec (29)$$

Donde:

Tr = Tiempo de retardo en min

Tc = Tiempo de concentración en min

Coeficiente de Escorrentia (C)

Para determinar este valor la metodología a seguir es la búsqueda de tablas de distintos autores para zonas con características similares a las de la quebrada El Molino. El coeficiente de escorrentía de la cuenca es un valor que es característico para el tipo de suelo, clima y precipitación en la zona; las tablas poseen distintas características como por su periodo de retorno, tipo de uso del suelo, pendientes, entre demás parámetros.

Número de curva (NC)

El número de curva se determina haciendo uso de la tabla del SCS la cual toma en cuenta las condiciones de humedad del suelo a partir de la precipitación de los 5 días previos, además del tipo y uso de suelo de la zona de interés.

Se tiene que un valor de CN de 0 indica un tramo donde no hay escorrentía, y a medida que se va acercando a cien la impermeabilidad aumenta.

Modelo de Abstracciones de Precipitación

En los modelos de precipitación-escorrentía se requiere el cálculo de la precipitación neta ó sea la precipitación que realmente escurre por la superficie de la cuenca.

La diferencia entre la precipitación neta y la precipitación total reside en las abstracciones de precipitación que se dan por condiciones de la cuenca las cuales son la infiltración entre el subsuelo y la intercepción de la vegetación y las superficies.

Para el cálculo de las abstracciones se hace uso de la metodología del número de curva elaborado por el soil conservation service (SCS) de Estados Unidos. El número de curva permite establecer las condiciones de la cuenca de estudio.

Modelo Transformación escorrentia

Una vez se hayan determinado las abstracciones de precipitación se procede a realizar el cálculo de las transformaciones de la precipitación efectiva de la cuenca para así realizar el cálculo de los caudales que provienen de la escorrentía.

Para realizar esta transformación existe el modelo del hidrograma unitario del SCS; el uso de este método permite obtener el hidrograma de cualquier exceso de precipitación.

Antes de realizar este método mediante el programa HEC-HMS 4.0 es necesario realizar el cálculo del tiempo de concentración y tiempo de retardo como se indicó anteriormente en esta sección. Con esto se va a obtener un hidrograma unitario sintético en el cual el caudal se expresa como la razón del caudal unitario U al caudal unitario pico U_p y el tiempo como la razón del tiempo al tiempo al pico t/T_p .

Analisis de sensibilidad

Para determinar los parámetros que modifican en mayor medida los resultados que se obtienen del modelo precipitación escorrentía se realiza un análisis de sensibilidad en el que se varían el periodo de retardo (tg), número de curva (NC) y el porcentaje de impermeabilidad (%imp) en el cauce, mediante varias combinaciones. Todo lo anterior para establecer los rangos en los que se pueden encontrar los caudales de la cuenca. Importante resaltar que el análisis se realiza para los caudales obtenidos por el método de Huff y el método de bloque alterno con la finalidad de ver que método de adecua más a la cuenca de la quebrada El Molino.

Las combinaciones son las que se muestran a continuación.

Cuadro 10. Variación del valor tg

tg(min)	NC	% imp.
43	74	5
44	74	5
45	74	5
46	74	5
47	74	5
48	74	5
49	74	5
50	74	5
51	74	5
52	74	5
53	74	5

Fuente: Creación propia

Cuadro 12. Variación del valor %imp

% imp.	tg(min)	NC
0	48	74
1	48	74
2	48	74
3	48	74
4	48	74
5	48	74
6	48	74
7	48	74
8	48	74
9	48	74
10	48	74

Fuente: Creación propia

Cuadro 11. Variación del valor NC

NC	% imp.	tg(min)
69	5	48
70	5	48
71	5	48
72	5	48
73	5	48
74	5	48
75	5	48
76	5	48
77	5	48
78	5	48
79	5	48

Fuente: Creación propia

Cuadro 13. Variación de los valores tg, NC y %imp

tg(min)	NC	% imp.
43	69	0
44	70	1
45	71	2
46	72	3
47	73	4
48	74	5
49	75	6
50	76	7
51	77	8
52	78	9
53	79	10

Fuente: Creación propia

Cuadro 14. Variación de los valores tg y NC		
tg(min)	NC	% imp.
43	69	5
44	70	5
45	71	5
46	72	5
47	73	5
48	74	5
49	75	5
50	76	5
51	77	5
52	78	5
53	79	5

Fuente: Creación propia

Cuadro 15. Variación de los valores tg y %imp		
tg(min)	% imp.	NC
43	0	74
44	1	74
45	2	74
46	3	74
47	4	74
48	5	74
49	6	74
50	7	74
51	8	74
52	9	74
53	10	74

Fuente: Creación propia

Cuadro 16. Variación de los valores %imp y NC		
% imp.	NC	tg(min)
0	69	48
1	70	48
2	71	48
3	72	48
4	73	48
5	74	48
6	75	48
7	76	48
8	77	48
9	78	48
10	79	48

Fuente: Creación propia

Estimación de Niveles de creciente

Para la estimación del nivel de creciente se crearon dos escenarios uno en el que se conservan las condiciones y medidas de la actual estructura, y un segundo escenario en el que se toma una nueva estructura con una amplitud de la luz libre entre estribos y un ancho de vía mayor pero conservándose la misma altura. Además para cada uno de estos se toman los caudales obtenidos mediante el análisis de sensibilidad realizado al programa HEC-HMS.

Metodología de análisis Hidráulico

Los modelos hidráulicos en general, incluido el HEC-RAS 5.0.5, incluyen dentro de sus formulaciones numéricas un término que representa la resistencia al flujo en canales. Este término incluye a su vez un coeficiente de rugosidad, el cual representa el efecto de resistencia al flujo de las superficies del fondo y de las paredes del canal. Una de las ecuaciones de

resistencia más utilizadas en la hidráulica fluvial es la ecuación de Manning.

Estimación del Coeficiente de Rugosidad

Ecuación de Manning

Los modelos hidráulicos en general, incluido el HEC-RAS, incluyen dentro de sus formulaciones numéricas un término que representa la resistencia al flujo en canales. Este término incluye a su vez un coeficiente de rugosidad, el cual representa el efecto de resistencia al flujo de las superficies del fondo y de las paredes del canal. Una de las ecuaciones de resistencia más utilizadas en la hidráulica fluvial es la ecuación de Manning.

La ecuación se puede escribir como:

$$v = \frac{1}{n} * \sqrt{s} * Rh^{2/3} \quad \text{Ec (30)}$$

Donde:

V: Es la velocidad media en la sección transversal

n: El coeficiente de rugosidad de Manning

s: Es la pendiente de la línea de energía del flujo

Rh: Es el radio hidráulico de la sección transversal del flujo

Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad es uno de los parámetros que pueden tomar mayor incertidumbre a la hora de calcularlo, razón por la cual se hace uso de tablas y formulas empíricas que proporcionen seguridad a la hora de establecer un valor; para esto se debe de tomar valores de estudios realizados a quebradas o ríos con características similares al río de estudio. Para este trabajo se toman las tablas realizadas por distintos autores como Cowan, Horton, Manning, etc.

Estas tablas presentan características como la pendiente, el uso de suelo, vegetación y características de los materiales que componen la

quebrada esto para acoplarlas a la quebrada en estudio.

Además se utilizan valores de las tablas que emplea el programa HEC-RAS 4.0 y se hace uso de imágenes con valores de Manning predeterminados mediante estudios realizados por el servicio geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés; el empleo de estas tablas proporcionan una rápida visualización lo cual permite determinar cuál de las imágenes presenta las condiciones similares a la quebrada el Molino.

Ya al tener varios valores del coeficiente de rugosidad se procede a realizar la media de los valores para así poder establecer cuál es el valor a utilizar.

Cuadro 17. Valores de Coeficiente de Rugosidad						
AUTOR	FUENTE	COBERTURA	VALOR MÍN	VALOR MÁX	PROM.	SELECCIÓN
V.t.Chow et al.	(Uniforme, En, & Abiertos, 2003)	Cauce curvado, algunos pozos y bancos, pastos y piedras	0,035	0,045	0,04	0,04
HEC-RAS	www.hidrojing.com	Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,05	0,08	0,065	0,07
USGS	wwwrcamnl.wr.usgs.gov	Rio Provo, Utah	0,045	0,073	0,059	0,06
USGS	wwwrcamnl.wr.usgs.gov	Rio Mission Creek; Washington	0,057	0,057	0,057	0,06
Manning (1889)	elisabetguill.blogspot.com	Canales naturales con abundante vegetación	0,035	0,035	0,035	0,035
Horton	www.cepes.org.pe	Rio sinuoso, algunos charcos, escollos limpios y secciones pedregosas. Condición Regular	0,055	0,055	0,055	0,055
Morales et al, 1995	ctha.atalca.cl	Con lecho pedregoso Y bordes de tierra enhebrados, Condición de paredes regular	0,035	0,035	0,035	0,035
U.S Department of Agriculture (1955)	(Juan, & Sandoval, 2010) Obtenido de biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0398_MT.pdf	Canales con corriente natural sinuosos, bajos	0,033	0,04	0,036	0,04
Metodo de Chow	(Uniforme, En, & Abiertos, 2003)					
Método de Manning	Universidad de Sevilla	Canales en tierra con maleza	0,035	0,035	0,035	0,035
Método de Manning	http://mecanicafluidos7mo.blogspot.com	ríos	0,035	0,035	0,035	0,035
Mediana					0,038	
Promedio					-	0,048
Desv. Estandar					0,012	

Fuente: Creación Propia

Modelación hidráulica en HEC-RAS 5.0.5

El modelo seleccionado para la simulación hidráulica es el programa HEC-RAS 5.0.5 (River Analysis System del Hydrologic Engineering Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos). Este modelo unidimensional se basa en el cálculo de Flujo Gradualmente Variado (FGV) mediante la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Considera las pérdidas de energía producto de la fricción a lo largo del cauce y de procesos de expansión y contracción del flujo mediante el desarrollo de la ecuación de energía

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ec (31)}$$

Donde:

Z1, Z2 = Elevación en el canal principal en m

Y1, Y2 = Profundidad del flujo de agua en m

V1, V2 = Velocidad promedio en m/s

α_1, α_2 = Coeficiente de ponderación de la velocidad en m/s

g = Aceleración de la gravedad en m/s²

he = Pérdida de energía en m

Para casos de Flujo Rápidamente Variado (FRV), como saltos hidráulicos, confluencias y flujo en puentes el modelo incorpora la solución de la ecuación de momentum de flujo.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad \text{Ec (32)}$$

Donde:

$\partial Q/\partial t$ = Variación de la derivada del caudal en función del tiempo

$\partial QV/\partial x$ = Variación de la derivada del producto del caudal y el volumen en función de la derivada de la distancia x

g = Aceleración de la gravedad en m/s²

A = Área de la sección de flujo m²

$\partial z/\partial x$ = pendiente de la superficie de agua en m/m

Sf = Pendiente de fricción en m/m

El modelo HEC-RAS requiere la inclusión de la geometría de las secciones transversales, a partir de las cuales se obtienen los parámetros hidráulicos de las secciones para el cálculo de las

condiciones de flujo analizadas. Para lograr una correcta aplicación del modelo unidimensional, se utilizaron secciones transversales detalladas y se definieron tramos de análisis y separación de secciones a cada 5 metros mediante los datos obtenidos en el levantamiento topográfico, estas secciones son adecuadas para la variación esperada del gradiente de energía en condición de crecientes.

La resistencia al flujo se modela mediante el coeficiente n de Manning, el cual puede ser variado a lo ancho de la sección transversal y a lo largo del tramo analizado. El modelo también requiere de la fijación de condiciones de frontera, las cuales se pueden especificar como condiciones de profundidad crítica o profundidad normal, como un nivel de agua conocido o como una curva de descarga, tanto aguas arriba como aguas abajo del tramo correspondiente. En el caso del presente estudio, se realizó el modelado en régimen permanente, es decir, sin considerar la variación del flujo en el tiempo.

El modelo supone que las secciones de la quebrada (tanto transversal como longitudinalmente) son fronteras rígidas y de esta forma distribuye la totalidad del caudal llenando horizontalmente la sección de la quebrada hasta alcanzar la capacidad hidráulica necesaria para la avenida que se está simulando. Estos cálculos los puede realizar en régimen supercrítico, régimen subcrítico o en un régimen mixto que evalúa las condiciones hidráulicas sección por sección. Para el proyecto se usara el régimen mixto ya que no se posee mucha información sobre el comportamiento del cauce.

HEC-RAS permite incluir puentes o alcantarillas dentro de su modelo geométrico. Un módulo específico para tal fin permite incluir el puente o alcantarilla como una sección transversal especial, permitiendo introducir la geometría del cauce justo bajo el puente, de la superestructura y de los bastiones y pilas de la estructura. Junto con la geometría se puede especificar la rugosidad de este tramo y se pueden manejar una serie de variables sobre el método de resolución del flujo bajo el puente.

Para el proyecto se realizará la modelación para dos condiciones estructurales una en donde se mantienen las condiciones de la actual estructura (ancho 3,5 metros y luz libre entre estribos de 9 metros) y otra en el que se propone una estructura en la que se amplía el ancho vía de los 3,5 metros de la actual estructura a 11 metros

ya que se considera el paso por la obra a doble vía, también se aumenta la luz libre entre estribos a 12 metros y se mantiene la misma altura de 2,75 metros desde el lecho de río.

Los datos de entrada que utiliza el modelo HEC-RAS son la geometría del cauce y del puente (perfiles y secciones transversales obtenidos de los levantamientos topográficos; los coeficientes de rugosidad estimados para cada tramo de cauce según las observaciones en sitio; las condiciones de frontera, aguas arriba y aguas abajo del tramo, específicas para cada caso; y los caudales de diseño para los diferentes períodos de retorno a analizar. Los resultados del modelo hidráulico se obtienen tubularmente como un resumen completo de las condiciones hidráulicas de cada sección transversal (niveles de agua y energía, caudal, velocidad, profundidad, área, radio hidráulico, número de Froude, entre otros) y también gráficamente en cada sección transversal y en el perfil de la quebrada.

Análisis de sensibilidad

Para el análisis del comportamiento de los factores que más alteran los resultados obtenidos para el nivel de creciente, se realiza el análisis de sensibilidad en el cual se varía el número de Manning tanto en los costados izquierdo (nl) y derecho (nr) como en el centro del canal (nc) ya que este es el parámetro que más modifica el valor final de la altura de la creciente del caudal. Las combinaciones son las siguientes.

nl	nc	nr
0,010	0,035	0,010
0,020	0,035	0,020
0,030	0,035	0,030
0,040	0,035	0,040
0,050	0,035	0,050
0,060	0,035	0,060
0,070	0,035	0,070
0,080	0,035	0,080
0,090	0,035	0,090

Fuente: Creación Propia

nl	nc	nr
0,050	0,015	0,050
0,050	0,02	0,050
0,050	0,025	0,050
0,050	0,03	0,050
0,050	0,035	0,050
0,050	0,04	0,050
0,050	0,045	0,050
0,050	0,05	0,050
0,050	0,055	0,050

Fuente: Creación Propia

nl	nc	nr
0,010	0,015	0,010
0,020	0,02	0,020
0,030	0,025	0,030
0,040	0,03	0,040
0,050	0,035	0,050
0,060	0,04	0,060
0,070	0,045	0,070
0,080	0,05	0,080
0,090	0,055	0,090

Fuente: Creación Propia

Criterios constructivos de estructuras transversales

Para los criterios de diseño se toma en cuenta los lineamientos que se encuentran en el manual de diseño de puentes y carreteras del SIECA, lineamientos del ministerio de obras públicas y transportes, y varios criterios encontrados en la bibliografía internacional.

Se debe tener en cuenta la velocidad de flujo en la salida del elemento de paso transversal, esto para respetar las velocidades máximas admisibles para canales no revestidos como se indica en los **cuadros 21 y 22** el cual depende de las condiciones del terreno y tipo de flujo para evitar

procesos de erosión aguas abajo del sitio de la obra.

Cuadro 21. Velocidades máximas admisibles (m/s) en canales no revestidos		
Tipo de terreno	Flujo Intermitente (m/s)	Flujo permanente (m/s)
Arena Fina (No coloidal)	0,75	0,75
Arcilla arenosa (No coloidal)	0,75	0,75
Arcilla limosa (No coloidal)	0,90	0,90
Arcilla Fina	1,00	1,00
Ceniza Volcánica	1,20	1,00
Grava Fina	1,50	1,20
Arcilla Dura	1,80	1,40
Material Graduado (No coloidal)		
Desde arcilla a grava	2,00	1,50
Desde limo a grava	2,10	1,70
Grava Fina	2,30	1,80
Grava Gruesa	2,40	2,00
Desde grava a piedras (< 15 cm)	2,70	2,10
Desde grava a piedras (> 20 cm)	3,00	2,40

Fuente: Manual de Carreteras de California, 2009

Cuadro 22. Velocidades máximas admisibles (m/s)	
Tipo de superficie	Máxima velocidad Admisible (m/s)
Arena fina o limo (Poca o ninguna arcilla)	0,20-0,60
Arena arcillosa dura, margas duras	0,60-0,90
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,60-1,20
Hierba	1,20-1,80
conglomerado, pizarras duras, rocas blandas	1,40-2,40
Mampostería, rocas duras	3,00-4,50
Concreto	4,50-6,00

Fuente: Manual para la Revisión de Estudios Hidrotécnicos de Drenaje Menor de Nicaragua, 2013

Clasificación del tipo de estructura

Para clasificar el tipo de estructura se debe de revisar los criterios que distinguen una estructura de otra, ya sea por dimensiones de la obra o por la cantidad de caudal que pasa debajo la misma. En cuanto a esto se toma información de varias fuentes.

Uno de los criterios corresponde a la distancia total del puente como se puede ver en el **cuadro 23**.

Cuadro 23. Clasificación estructuras de drenaje según la longitud total	
Tipo de estructura	Longitud total
Alcantarillas	1 m - 15 m
Puentes pequeños y medianos	16 m - 40 m
Puentes Grandes	41 m - 100 m
Puentes Mayores	> 101 m

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones

Además el manual para inspecciones rutinarias de puentes y alcantarillas para el servicio de la dirección de vialidad de la provincia de Buenos Aires, Argentina establece que un puente se cataloga como tal cuando su longitud total es mayor a los 17 metros. En Venezuela se establece que para considerarse una estructura como puente la longitud total debe ser mayor a los 10 metros y el caudal para una avenida con periodo de retorno de 100 años debe ser mayor a los 50 m³/s.

Selección de frecuencias

En cuanto al diseño de selección de frecuencia se hace uso del **cuadro 24** correspondiente al manual de revisión de diseño de drenaje menor del ministerio de transporte e infraestructura de Nicaragua, en donde se especifican los periodos de retorno según su clasificación funcional. Se toma esta tabla ya que no fue posible encontrar alguna referencia respecto a este tema en Costa Rica.

Cuadro 24. Frecuencias de diseño y revisión de flujo para distintos estructuras de drenaje.						
Frecuencias de diseño recomendadas (Años)						
Clasificación funcional de carreteras	Diseño					Revisión de Flujo
	2	5	10	25	50	100
Tronca Principal						
Alcantarillas de paso				x	x	x
Alcantarillas de alivio			x			x
Puentes Grandes					x	x
Puente - Vado						
Troncal secundaria						
Alcantarillas de paso				x		x
Alcantarillas de alivio			x			x
Puentes Grandes				x	x	x
Puente - Vado						
Colectora principal						
Alcantarillas de paso				x		x
Alcantarillas de alivio			x			x
Puentes Pequeños				x	x	x
Puente - Vado						
Colectora Secundaria						
Alcantarillas de paso				x		x
Alcantarillas de alivio			x			x
Puentes Pequeños			x	x		x
Puente - Vado						
Caminos vecinales						
Alcantarillas de paso			x	x		x
Alcantarillas de alivio			x			x
Puentes Pequeños				x	x	x
Puente - Vado	x	x				x

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje, Ministerio de obras y transportes de Perú

Se establece un periodo de diseño de 50 a 100 años según las fuentes consultadas, por lo que se utiliza el de 100 años como prevención a futuras avenidas que causen daño a la estructura. Para el periodo de revisión de flujo también se utiliza el periodo de 100 años este periodo es empleado para determinar el comportamiento del cauce en un periodo de tiempo prolongado.

cuadro 25; y haciendo uso de la **ecuación 33** para un periodo de retorno de 100 años y un riego admisible del 25% según el **cuadro 26**.

Vida útil

La vida útil para una estructura transversal de paso de flujo como la alcantarilla se estima mediante el

Cuadro 25. Vida útil para estructuras transversales de drenaje	
Estructura	Vida Útil (Años)
Puentes y defensas riverañas	40
Alcantarillas de quebradas importantes	25
Alcantarillas de quebradas menores	15
Drenaje de plataforma y sub-drenes	15

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje, Ministerio de obras y transportes de Perú

Cuadro 26. Valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje.	
Tipo de Obra	Riesgo Admisible (%)
Puente	25
Alcantarilla de paso de quebrada importante y badenes	30
Alcantarilla de paso de quebradas menores y descarga de cunetas	35
Drenaje de la plataforma (a nivel longitudinal)	40
Subdrenes	40
Defensas ribereñas	25

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje, Ministerio de obras y transportes de Perú

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad \text{Ec. (33)}$$

Donde:

R = Riesgo admisible en %

T= Periodo de retorno en años

n = Vida útil en años

Elevación de la estructura

El criterio del departamento de Puentes del MOPT indica que estructuras tipo puente deben contar con una altura libre de 1,0 m entre el nivel del agua para un periodo de retorno de 100 años y el nivel

de fondo de viga. Para el caso de las obras tipo alcantarilla el tirante hidráulico no puede exceder más de 0,75 del diámetro o altura interna disponible de la alcantarilla.

Estructuras de disipación de la energía

Para el cálculo de la socavación en el vertedero se debe de realizar la comparación entre la velocidad de salida del flujo de agua de la estructura y la velocidad del cauce natural aguas abajo, para establecer la necesidad o no de una estructura disipadora de energía, así como la ubicación de la obra de protección. Para esto se establece que si la velocidad de salida es parecida a la velocidad del flujo del cauce, el diseño de la obra se considera aceptable y no es necesario el diseño de sistemas de reducción de velocidad; para considerarse parecida la diferencia del exceso de la velocidad de salida de la estructura transversal debe de ser menor al 10%; si el exceso de velocidad está entre el 10% y 30% se debe de realizar el diseño de un sistema disipador dentro de la estructura o cambios en el diseño estructural de la misma; y si el exceso supera 30% es necesario la confección de disipadores de energía aguas abajo.

Elevación de la rasante

Para determinar la rasante se debe de considerar la altura de la estructura, que en este caso es de 2,75 metros; además se debe de tener en cuenta las condiciones que se presentan en la vía, esto porque existe una depresión en la entrada norte del puente, debido a que en las cercanías de ese punto el camino presenta una pendiente pronunciada debido a la diferencia de alturas por lo que el elevar la estructura podría aliviar el efecto de la diferencia de altura.

Por otra parte se debe de seguir los lineamientos que establece el MOPT para caminos cantonales; en cuanto a lo que se refiere a pendientes verticales máximas en donde se plantea que el perfil de la rasante podrá variarse un máximo de 1,50 m hacia arriba o hacia abajo de la elevación de la explanación de la calzada existente y la nueva pendiente en tangente no

podrá variar más del 2% de la pendiente existente.
(CR2010)

Para realizar el trazado de la rasante se hace uso del programa Civil 3d de AUTODESK. Este programa presenta comandos como los alignment o alineamientos, para establecer las líneas de centro del camino en donde se incluyen las alturas de sus respectivos puntos. Posterior a tener el alineamiento del camino se utiliza el comando create profile view el cual genera una figura que presenta el perfil longitudinal. Ya por último se usa el comando Vertical curve settings para trazar la rasante.

Resultados

Caracterización de la zona

Delimitación de la cuenca

Para trazar la divisoria de aguas de la cuenca hidrográfica de la quebrada el Molino definida en el sitio del puente, se hizo uso del programa ARGIS 10.5 este software utiliza capas tipo shape obtenidas del mapa digital de costa rica 2014 desarrollado por el tecnológico de costa rica. Se aplicó el modelo «Hydrologic Modeling» (HM) de ArcGis, el cual determina las direcciones de las corrientes. Este modelo trabaja con la topografía de la cuenca, simulando escurrimientos superficiales. Consiste en determinar todas las celdas que drenan a una en particular. Se evalúa el recorrido del flujo para cada celda a partir de la malla de direcciones de flujo. De esta manera, aquellas celdas que tengan mayor acumulación del flujo serán las que forman los canales de drenaje.

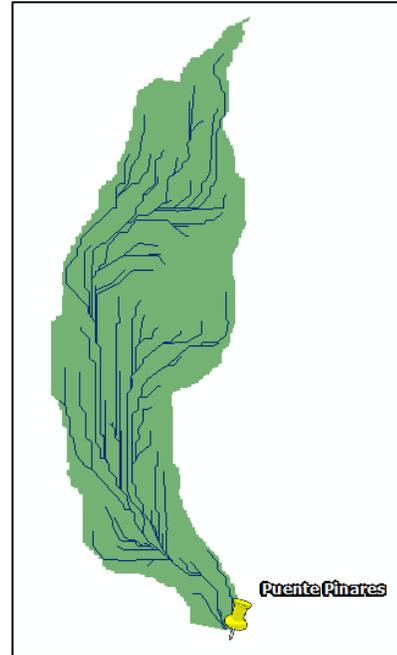


Figura 20. Patrones de flujo de la cuenca correspondiente a la quebrada el Molino
Fuente: Elaborado a través de ARGIS

De esta divisoria de área se obtuvieron parámetros importantes para el proyecto los cuales son el área de la cuenca cuya cobertura abarca los 2,23 km². Además se tiene un perímetro de 10355 metros: también se tuvo una longitud 3450 metros desde el punto más alejado de la cuenca al punto de desfogue del cauce, Por otro lado se tiene una pendiente de 4 por ciento estos parámetros son de importancia para la determinación de las características propios de la cuenca.

Cuadro 27. Características morfométricas de la cuenca correspondiente a la quebrada el molino	
Característica	Valor
Área (m ²)	2,23
Perímetro (m)	10355
Longitud (m)	3450
Pendiente (%)	4

Fuente: Creación Propia

Determinación de parámetros morfométricos

A continuación se presentan los valores obtenidos para varios de los parámetros morfológicos de la cuenca.

Orden de la cuenca

El orden de la cuenca se determinó mediante dos métodos el método Horton y el strahler

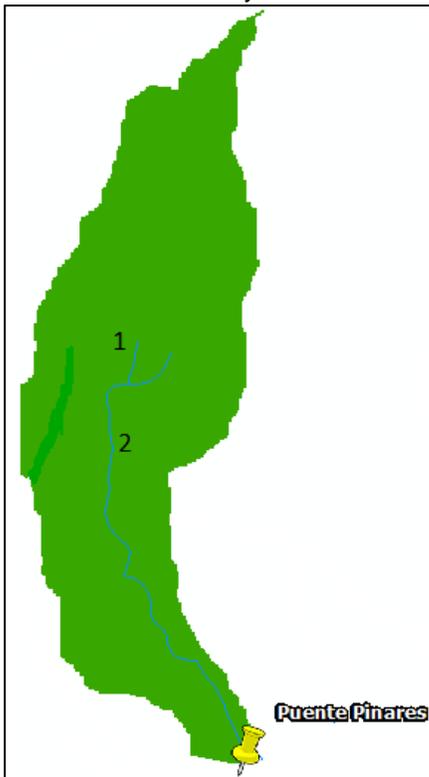


Figura 21. Orden de cuenca sistema Horton
Fuente: Obtenido mediante ArcGIS 10.5

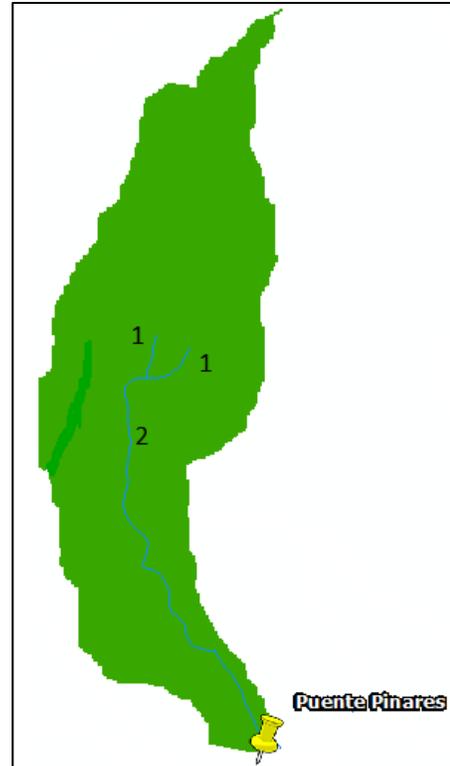


Figura 22. Orden de cuenca sistema Strahler
Fuente: Obtenido mediante ArcGIS 10.5

En el **cuadro 28** se muestran los resultados obtenidos para los parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada El Molino.

Cuadro 28. Resumen parametros morfometricos	
Area (km ²)	2,23
Perimetro (km)	10,36
Long. Cuenca (km)	3,45
Ancho de la cuenca (km)	0,65
Altura media de la cuenca (km)	1420
Altura Max. Cuenca (km)	1509
	134
Altura Min. Cuenca (km)	
Desnivel Altitudinal (km)	0,159
Pendiente Media Cauce (m/m)	0,05
Pendiente Media Cuenca (%)	4%
Número de cauces de un Orden	2
Número de cauces de un Orden Mayor	1
Parametros de Forma	
Coeficiente de Gravelius (Kc)	1,31
Rectangulo Equivalente	
L (Lado mayor)	2,65
l (Lado menor)	0,84
Factor de Forma de Horton (Kf)	0,19
Alejamiento medio (Lm)	2,31
Relación de Elongación (Re)	0,49
Parametros de Relieve	
Indice de Alargamiento (La)	5,34
Coeficiente de Masividad (Km)	0,64
Parametros de Red Hidrografica	
Sistema de Horton	2
Sistema de strahler	2
Densidad de Drenaje (Dd)	1,55
Relación de Bifurcación (Rb)	2
Coeficiente de Circularidad de Miller (Cc)	0,26

Fuente: Creación Propia

Vida útil

La vida útil para la estructura transversal de paso se estima 25 años mediante el **cuadro 25**; y de 28 años haciendo uso de la **ecuación 33** para un periodo de retorno de 100 años y un riesgo

admisible del 25% según el **cuadro 26**. Por lo que se toma como valor de vida útil de la estructura de 30 años.

Caudal de diseño

Para establecer el caudal correspondiente para la quebrada el Molino se hace uso del programa HEC-HMS 4.2.1 el cual requiere de parámetros como el tiempo de concentración, tiempo de retardo, número de curva y porcentaje de impermeabilidad. Además se requiere de la construcción de los hietogramas de diseño para establecer la precipitación. Por otro lado se plantea la metodología de Manning para establecer una comparación con los resultados que se obtenga del modelo de precipitación-escorrentía.

Determinación de las tormentas de diseño

Para la determinación de las tormentas de diseño se hace uso de la **ecuación 34** que corresponde a la estación ubicada en el Tecnológico de Costa Rica y cuya utilidad consiste en obtener las precipitaciones que serán representadas en las curvas IDF para los distintos periodos de retorno.

Periodo de retorno

Los periodos de retorno elegidos son 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años estos corresponden al tiempo en que se pueden presentar las avenidas y van a representar la frecuencia en las curvas IDF.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Para la obtención de la precipitación de diseño se hizo uso de la formula determina para la zona de Cartago esta fórmula es la siguiente:

$$I = 152,08 * \left(\frac{T^{0,111}}{D^{0,274}}\right) \quad \text{Ec (34)}$$

Donde:

I = Intensidad (mm/h)

T = Periodo de Retorno (Años)

D = Duración (min)

Se obtuvieron las precipitaciones para las tormentas de diseño para los distintos periodos de retorno para una tormenta de 80 minutos ya que como se verá más adelante es la duración que se obtiene del tiempo de concentración. Las precipitaciones son las siguientes.

Cuadro 29. Precipitaciones para los distintos periodos de diseño.

Tiempo de retorno (Años)	Precipitación (mm/h)
2	49,44
5	54,73
10	59,11
25	65,43
50	70,67
100	76,32

Fuente: Creación Propia

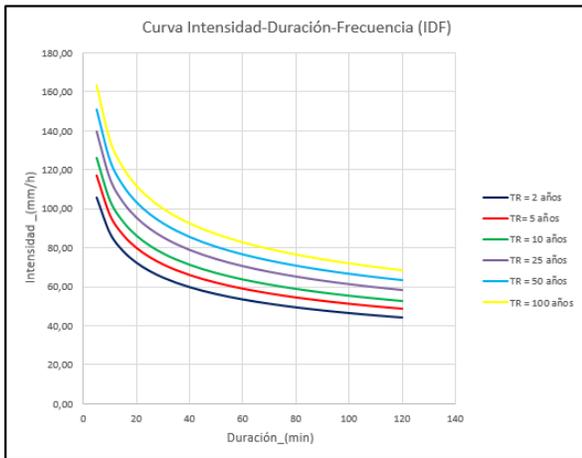


Figura 23. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Fuente: Creación Propia

Hietogramas de diseño

Los hietogramas se realizan utilizando el método de bloque alterno y el método de Huff, con estos métodos se plantea establecer el comportamiento de las precipitaciones a lo largo de la duración de la precipitación. A continuación se presentan una muestra de los resultados obtenidos mediante los dos métodos empleados la totalidad de los cuadros se presentan en la sección de apéndices.

Hietograma método de Bloque alterno

Cuadro 30. Precipitaciones por medio del método de Bloque alterno para un periodo de retorno de 5 años

Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	96,75	16,13	6,38	3,34
20	80,02	26,67	5,03	3,63
30	71,60	35,80	4,44	4,08
40	66,17	44,12	4,08	5,03
50	62,25	51,88	3,82	6,38
60	59,22	59,22	3,63	4,44
70	56,77	66,23	3,47	3,82
80	54,73	72,97	3,34	3,47

Fuente: Creación Propia

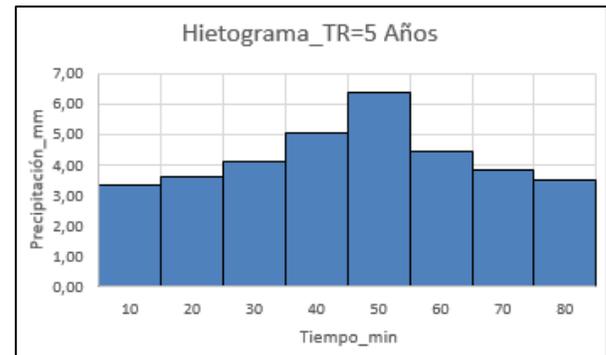


Figura 24. Hietograma de diseño de la quebrada el Molino para un periodo de retorno de 5 años.

Fuente: Elaboración Propia

Hietograma método de Huff

Cuadro 31. Precipitaciones por medio del método de Huff para un periodo de retorno de 5 años

D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	4,38	4,38
20	25%	20%	14,59	10,22
30	38%	50%	36,49	21,89
40	50%	74%	54,00	17,51
50	63%	87%	63,48	9,49
60	75%	94%	68,59	5,11
70	88%	97%	70,78	2,19
80	100%	100%	72,97	2,19

Fuente: Creación Propia

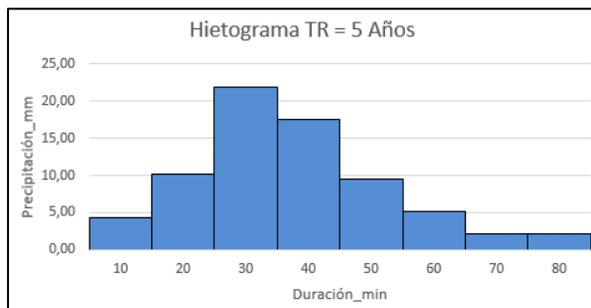


Figura 25. Hietograma de diseño de la quebrada el Molino para un periodo de retorno de 5 años.

Fuente: Creación Propia

Coeficiente de Escorrentía (C)

De la búsqueda realizada mediante distintos autores y sus respectivas tablas con condiciones similares a la cuenca de estudio se obtiene del **Cuadro 32** que resume los resultados obtenidos.

Cuadro 32. Valores de coeficiente de escorrentía						
AUTOR	FUENTE	COBERTURA	VALOR MIN	VALOR MAX	PROMEDIO	SELECCIONADO
Método de Raws	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Pasto relieve quebrado	0,42	0,42	0,42	0,4
Aparicio, 1999	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Zonas residenciales unifamiliares	0,3	0,5	0,4	0,4
Método de Prevert	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Pastizal, pendiente entre 0-5 %, suelo árenos-limoso	0,10	0,1	0,1	0,1
Fórmula de Nadal	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Cuenca menos de 10 km ² , precipitación anual de 900 mm y cuenca ondulada	0,73	0,73	0,73	0,75
Fórmula de Keler	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Precipitación anual mayor a 500 mm	0,49	0,49	0,49	0,5
Benitez et al. (1980)	Lemus & Navarro (2003)	Vegetación densa impermeable, pendiente entre 5-20 %	0,45	0,45	0,45	0,45
Velasco-Molina (1991)	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Pastizales con pendiente entre 0-5 y suelo arenoso	0,1	0,1	0,1	0,1
Razuri, 1994	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Tipo suelo semipermeable, pendiente suave	0,55	0,55	0,55	0,55
Chow et al. (1988)	(Asensio, Ramón, Blanquer, & Manuel, 2011)	Zonas verdes, periodo de retorno 100 años, pendiente 2-7 %	0,53	0,53	0,53	0,55
Promedio			-	-	0,42	0,45
Desv. Est.					0,19	0,21

Fuente: Creación Propia

Tiempo de concentración

Para el cálculo del tiempo de retardo se hace uso de fórmulas empíricas de varios autores para zonas con condiciones semejantes a las que se presentan en la quebrada El Molino en cuanto al uso del suelo, vegetación y demás características de la quebrada. Las fórmulas utilizadas son las siguientes.

Cuadro 33. Valores del tiempo de Concentración.	
Fórmula	Tc (min)
Fórmula de Giandotti	68,50
Bransby-Williams	88,50
Clark	83,99
Giandotti	71,17
Passini:	89,87
Pilgrim y McDermott	61,85
Témez	85,04
Valencia y Zuluaga	81,84
Federal Aviation Administration (1970)	72,42
Federal Aviation Agency , FAA	72,41
Método Racional Generalizado	78,63
Ecuación de retardo, SCS	78,69
Media	78,30
Mediana	78,69
Desviación estándar	8,47

Fuente: Creación Propia

Del **cuadro 33** se propone un valor de 80 minutos como tiempo de concentración ya que el valor promedio es de 78,30 minutos con una desviación estandar de 8,47 minutos. El valor del tiempo de concentración se le suele asignar también a la duración de la tormenta.

Tiempo de retardo

Para el periodo de retardo o de rezago se hace uso de la formula que plantea el SCS el cual considera que el tiempo de rezago o retardo es equivalente al 60% del tiempo de concentración.

Cuadro 34. Valores del tiempo de retardo	
Autor	Tr (min)
SCS Curver Number	48,00

Fuente: Creación Propia

Número de curva

Cuadro 35. Valores de numero de curva para la quebrada el Molino	
Autor	Valor
SCS	74

Fuente: Creación Propia

El valor asignado para el número de curva correspondiente para la quebrada el Molino es de 74 obtenido de la tabla del SCS para áreas con uso de suelo para caseríos.

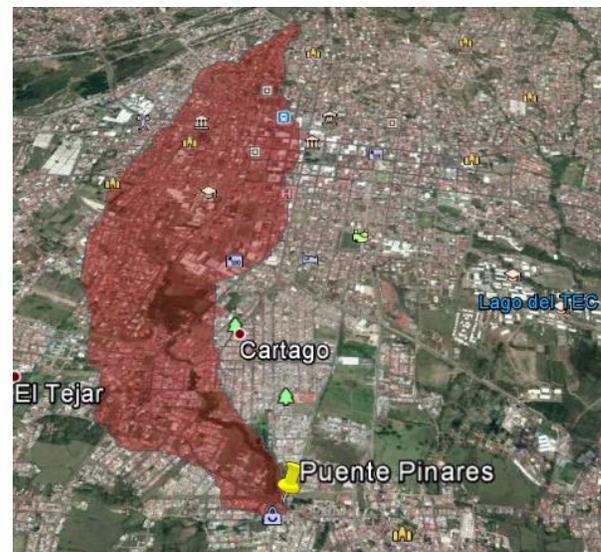


Figura 26. Representación del área impermeable de la cuenca El Molino

Fuente: Google Earth Pro

Hidrogramas para la estimación del caudal de diseño

Mediante la utilización del modelo de precipitación-escorrentía y a través del programa HEC-HMS 4.0 se realiza la creación de los

hidrogramas para los distintos periodos de retorno. Cabe destacar que se obtendrán hidrogramas tanto para los hietogramas obtenidos por el método de bloque alterno como para el método de Huff para así realizar una comparación de los resultados de los dos métodos. Las siguientes figuras muestran parte de los resultados que se obtienen del programa.

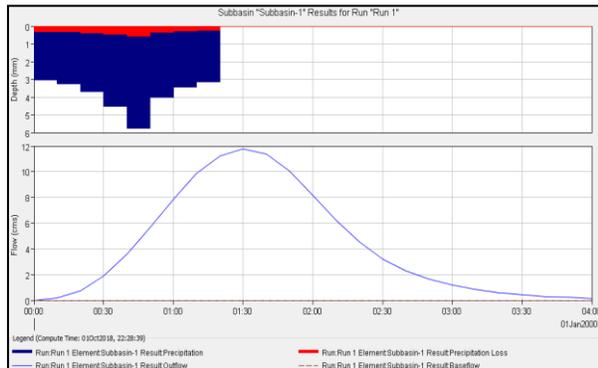


Figura 27. Histograma para el periodo de retorno de 2 años.

Fuente: Elaboración Propia

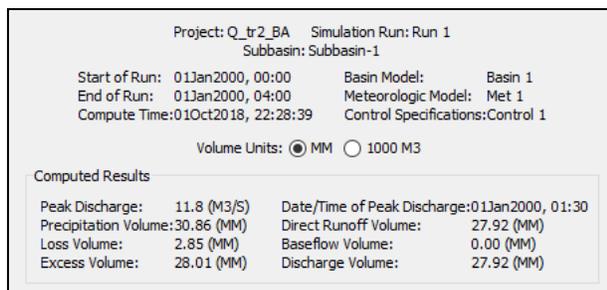


Figura 28. Resultados Histograma para el periodo de retorno de 2 años.

Fuente: Creación Propia

De estos histogramas y mediante el análisis de sensibilidad se pueden tener los caudales de diseño los cuales se muestran a continuación.

Análisis de sensibilidad método de Huff

A continuación se presentan la variabilidad de los distintos resultados obtenidos para los distintos parámetros de influencia.

Combinación	Caudal m3/s
Variación tg	7,70-8,70
Variación NC	6,30-10,70
Variación % Imp	7,90-9,00
Variación tg,NC, %imp	6.20-10,30
Variación tg, NC	6,80-10,30
Variación tg , %imp	8,20-8,70
Variación %imp, NC	5,60-11,20

Las siguientes curvas representan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad para los hidrogramas realizados mediante el uso del método de Huff. Las tablas con el listado de resultados se encuentran en la sección de apéndices.

Parámetro	Valor
n	1925
media	8.39
Desv. Est.P	1.49
Desv. Est.M	1.50
Min	4.7
Q1	7.5
Mediana	8.3
Q3	9.13
Máximo	13.1

Fuente: Creación Propia

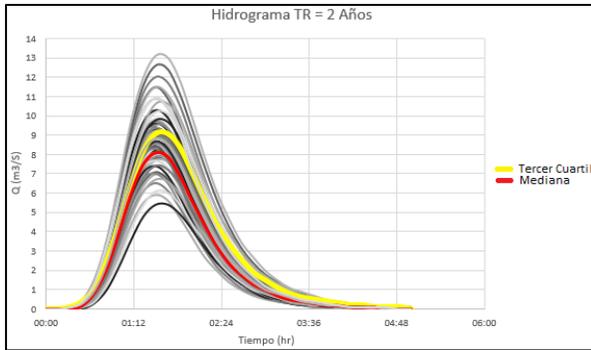


Figura 29. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff

Fuente: Creación Propia

Cuadro 38. Resumen datos periodo de retorno 5 años, método de Huff

n	1925
media	10.09
Desv. Est.P	1.54
Desv. Est.M	1.55
Min	6
Q1	9.1
Mediana	10.1
Q3	11
Máximo	14.7

Fuente: Creación Propia

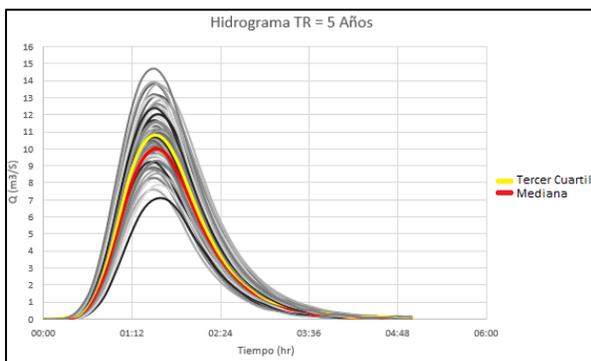


Figura 30. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff

Fuente: Creación Propia

Cuadro 39. Resumen datos periodo de retorno 10 años, método de Huff

n	1925
media	11.69
Desv. Est.P	1.69
Desv. Est.M	1.70
Min	7.1
Q1	10.5
Mediana	11.8
Q3	12.63
Máximo	16.7

Fuente: Creación Propia

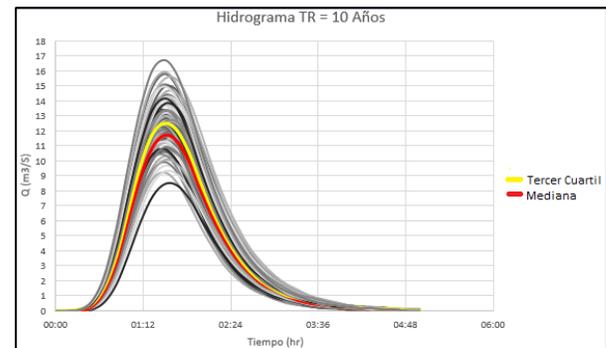


Figura 31. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff

Fuente: Creación Propia

Cuadro 40. Resumen datos periodo de retorno 25 años, método de Huff

n	1925
media	14.12
Desv. Est.P	1.93
Desv. Est.M	1.93
Min	8.8
Q1	12.8
Mediana	14.3
Q3	15.2
Máximo	19.8

Fuente: Creación Propia

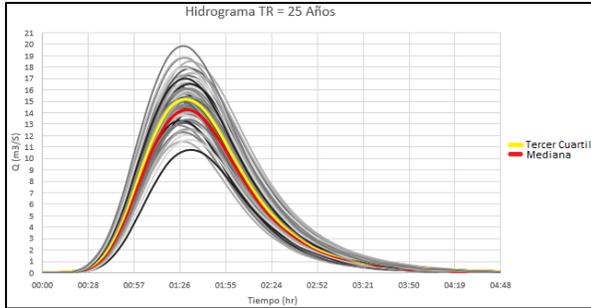


Figura 32 Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

n	1925
media	16.23
Desv. Est.P	2.12
Desv. Est.M	2.12
Min	10.2
Q1	14.775
Mediana	16.45
Q3	17.5
Máximo	22.3

Fuente: Creación Propia

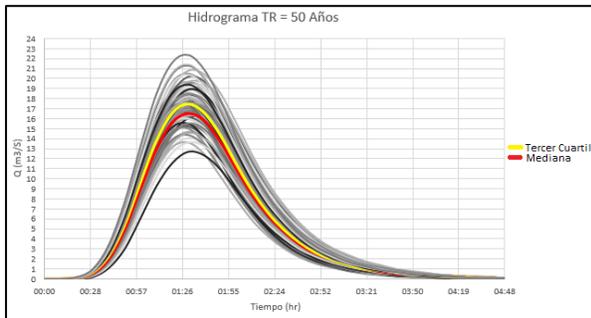


Figura 33. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

n	1925
media	18.58
Desv. Est.P	2.40
Desv. Est.M	2.40
Min	11.9
Q1	16.9
Mediana	18.8
Q3	20
Máximo	25.9

Fuente: Creación Propia

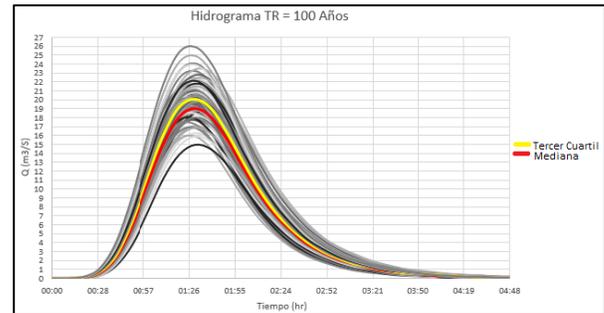


Figura 34. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

Periodo de retorno (Años)	caudal mediana (m³/s)	Caudal 3 Qrt (m³/s)
2	8,30	9,13
5	10,10	11,00
10	11,80	12,63
25	14,30	15,20
50	16,45	17,50
100	18,80	20,00

Fuente: Creación Propia

Análisis de sensibilidad método de Bloque Alterno

Para el método de bloque alterno se presentan los cuadros resumen y curvas que corresponden a los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad para los hidrogramas desarrollados por el programa HEC-HMS 4.0.

n	2617
media	4.10
Desv. Est.P	0.79
Desv. Est.M	0.79
Min	2.2
Q1	3.675
Mediana	4.1
Q3	4.5
Máximo	6.4

Fuente: Creación Propia

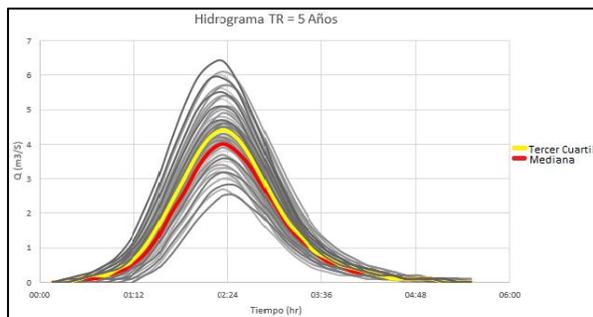


Figura 35 Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Bloque
Fuente: Creación Propia

n	2464
media	4.82
Desv. Est.P	0.87
Desv. Est.M	0.87
Min	2.7
Q1	4.3
Mediana	4.9
Q3	5.3
Máximo	7.3

Fuente: Creación Propia

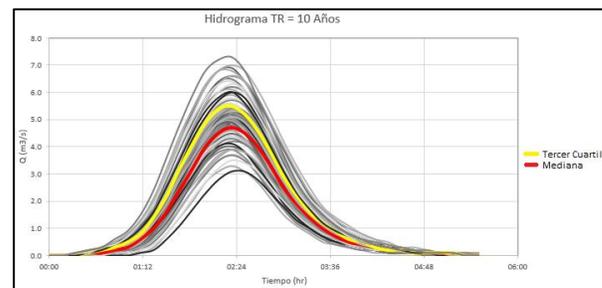


Figura 36 Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Bloque
Fuente: Creación Propia

Cuadro 46. Resumen datos periodo de retorno 25 años, método de bloque alterno	
n	2464
media	6.15
Desv. Est.P	1.27
Desv. Est.M	1.27
Min	3.4
Q1	5.2
Mediana	6.1
Q3	6.9
Máximo	9.1

Fuente: Creación Propia

Cuadro 47. Resumen datos periodo de retorno 50 años, método de bloque alterno	
n	2464
media	6.86
Desv. Est.P	1.08
Desv. Est.M	1.08
Min	4
Q1	6.1
Mediana	6.9
Q3	7.4
Máximo	9.8

Fuente: Creación Propia

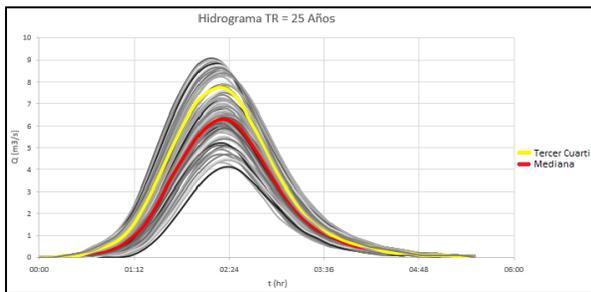


Figura 37 Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Bloque
Fuente: Creación Propia

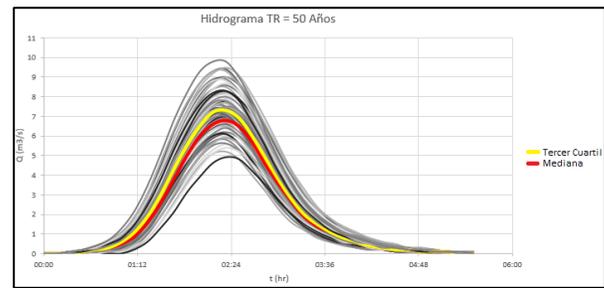


Figura 38. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Bloque
Fuente: Creación Propia

Cuadro 48. Resumen datos periodo de retorno 100 años, método de bloque alterno	
n	2464
media	7.92
Desv. Est.P	1.19
Desv. Est.M	1.19
Min	4.8
Q1	7.1
Mediana	8
Q3	8.6
Máximo	11.2

Fuente: Creación Propia

Coefficiente de Rugosidad

El valor del coeficiente de rugosidad obtenido es de 0.050 para las zonas laterales del cauce y de 0,035 para el cauce principal estos resultados se obtienen de las condiciones y valores que se presentan en el siguiente **cuadro 50**.

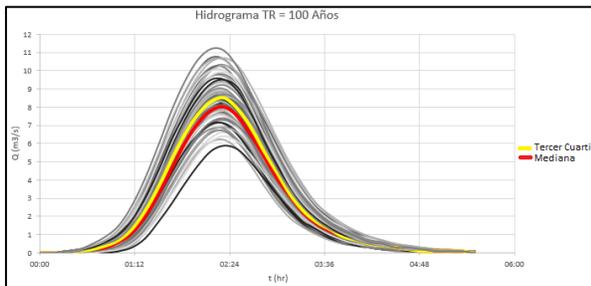


Figura 39. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Bloque

Fuente: Creación Propia

Cuadro 49. Caudales para los distintos periodos de retorno		
Periodo de retorno (Años)	caudal mediana (m ³ /s)	Caudal 3 Qrt (m ³ /s)
2	3,70	4,00
5	4,10	4,50
10	4,90	5,30
25	6,10	6,90
50	6,90	7,40
100	8,00	8,60

Fuente: Creación Propia

Cuadro 50. Valores de coeficiente de rugosidad					
AUTOR	FUENTE	COBERTURA	VALOR MÍN	VALOR MÁX	PROMEDIO
V.t.Chow et al.	(Uniforme, En, & Abiertos, 2003)	Cauce curvado, algunos pozos y bancos, pastos y piedras	0,035	0,045	0,04
HEC-RAS	www.hidrojing.com	Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,05	0,08	0,065
USGS	wwwrcamnl.wr.usgs.gov	Rio Provo, Utah	0,045	0,073	0,059
USGS	wwwrcamnl.wr.usgs.gov	Rio Mission Creek; Washington	0,057	0,057	0,057
Manning (1889)	elisabetguill.blogspot.com	Canales naturales con abundante vegetación	0,035	0,035	0,035
Horton	www.cepes.org.pe	Rio sinuoso, algunos charcos, escollos limpios y secciones pedregosas. Condición Regular	0,055	0,055	0,055
Morales et al, 1995	ctha.utralca.cl	Con lecho pedregoso Y bordes de tierra con maleza, Condición de paredes regular	0,035	0,035	0,035
U.S Department of Agriculture (1955)	(Juan, & Sandoval, 2010) Obtenido de biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0398_MT.pdf	Canales con corriente natural sinuosos, bajos	0,033	0,04	0,0365
Método de Manning	Universidad de Sevilla	Canales en tierra con maleza	0,035	0,035	0,035
Método de Manning	http://mecanicafluidos7mo.blogspot.com	ríos	0,035	0,035	0,035
mediana					0,038
Promedio			-	-	0,045
Desv. Estándar					0,012

Fuente: Creación Propia

Método Racional

Para la determinación del caudal haciendo uso de la **ecuación 15** correspondiente a la ecuación del método racional, se tiene un área de 2,23 km², la intensidad correspondiente a cada periodo de retorno y el coeficiente de escorrentía obtenido de la **figura 19** cuyo valor es 0,53 esto para una zona urbana con condición promedio (cubierta de pasto entre 50% – 70% del área) y una pendiente entre el 2% – 7%.

Cuadro 51. Valores de Caudal mediante el método Racional						
Parámetros	Periodos de retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
C	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
A (m ²)	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23
I (mm/h)	49,44	54,73	59,11	65,43	70,67	76,32
Q (m ³ /s)	10,11	12,20	13,91	17,02	19,70	23,16

Fuente: Creación Propia

A continuación se presenta el cuadro resumen de los resultados de caudal obtenidos mediante los distintos métodos de cálculo.

Cuadro 52. Resumen comparación métodos de cálculo de caudal						
Método	Periodo de Retorno					
	2 años Caudal (m ³ /s)	5 años Caudal (m ³ /s)	10 años Caudal (m ³ /s)	25 años Caudal (m ³ /s)	50 años Caudal (m ³ /s)	100 años Caudal (m ³ /s)
Racional	10,11	12,20	13,91	17,02	19,70	23,16
SCS (Hietograma de Huff)	9,13	11,00	12,63	15,20	17,50	20,00
SCS (Hietograma de Bloques Alternos)	4,40	4,50	5,30	6,90	7,40	8,00

Fuente: Creación Propia

Estimación de Niveles de creciente

Mediante el programa HEC-RAS se determinaron los siguientes niveles de creciente los cuales corresponden a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para esta estimación se crearon dos escenarios uno en el cual se

considera el puente con las condiciones y medidas actuales, y un segundo escenario en el que se propone aumentar la luz libre de la estructura. Además se toman los caudales obtenidos mediante el análisis de sensibilidad realizado al programa HEC-HMS 4.0 en donde se toman los valores de la mediana y tercer cuartil.

A continuación se presentan las secciones transversales de los dos tipos de estructuras.

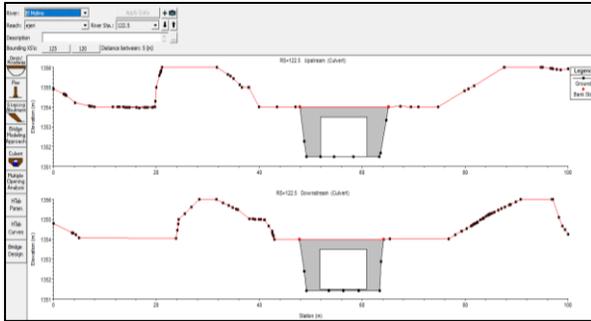


Figura 40. Sección transversal de la quebrada El Molino. Estructura actual

Fuente: Obtenido del programa computacional HEC-RAS 5.0.5

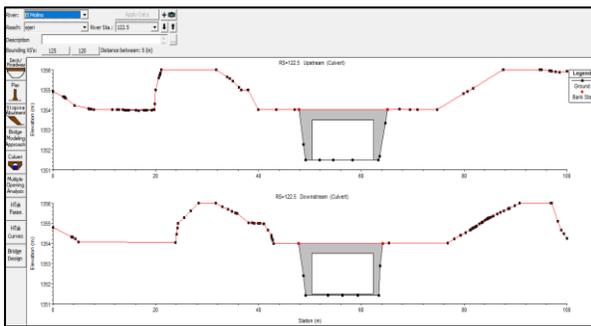


Figura 41. Sección transversal de la quebrada El Molino. Estructura propuesta

Fuente: Obtenido del programa computacional HEC-RAS 5.0.5

En la siguiente figura se presenta la ubicación de las secciones transversales del tramo del cauce analizado, así como la ubicación de la estructura transversal de paso.

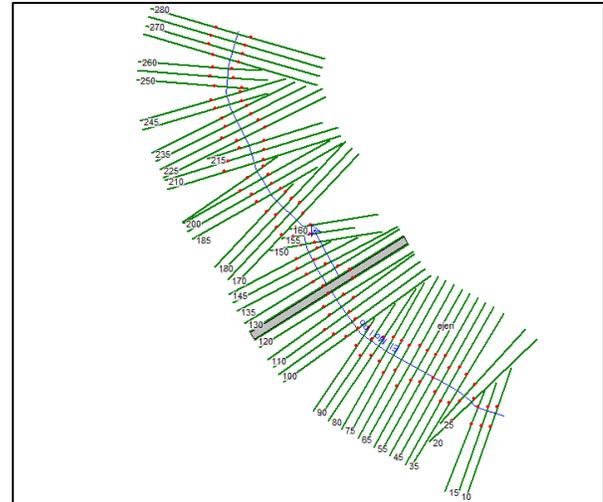


Figura 42. Vista en planta de las secciones transversales de la quebrada El Molino.

Fuente: Obtenido del programa computacional HEC-RAS 5.0.5

En la figura 43 se presenta el comportamiento del flujo en la quebrada El Molino para un caudal cuyo periodo de retorno es de 100 años.

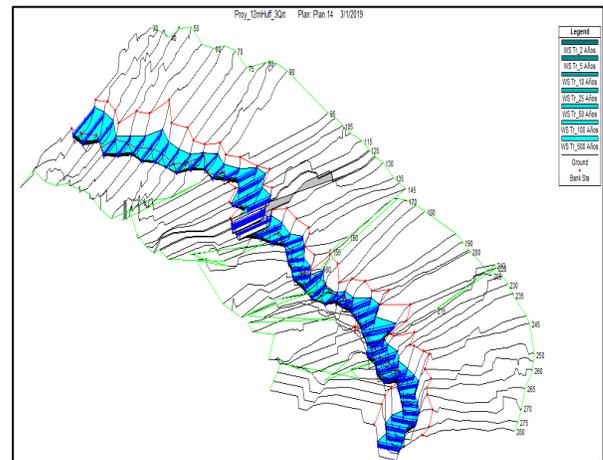


Figura 43. Vista en planta de las secciones transversales y el flujo de la quebrada El Molino.

Fuente: Obtenido del programa computacional HEC-RAS 5.0.5

Análisis de sensibilidad

Para el desarrollo del análisis de sensibilidad para la obtención del nivel de creciente a través del programa computacional HEC-RAS 5.0.5 se

procedió a variar y hacer combinaciones al valor del número de Manning tanto a los costados como en el centro del cauce como se mostró en los **cuadros 18,19 y 20**, que se encuentran en la sección de metodología, de donde se tienen los resultados que se muestran a continuación.

Coeficiente de Rugosidad

Para el coeficiente de rugosidad se tiene un valor de 0.050 para los laterales del cauce y de 0.035 para el canal central como se mostró en el **cuadro 50**, este valor es de suma importancia para el programa HEC-RAS porque expresa la oposición que se presenta ante el flujo del canal; en el siguiente cuadro se muestra los criterios de selección.

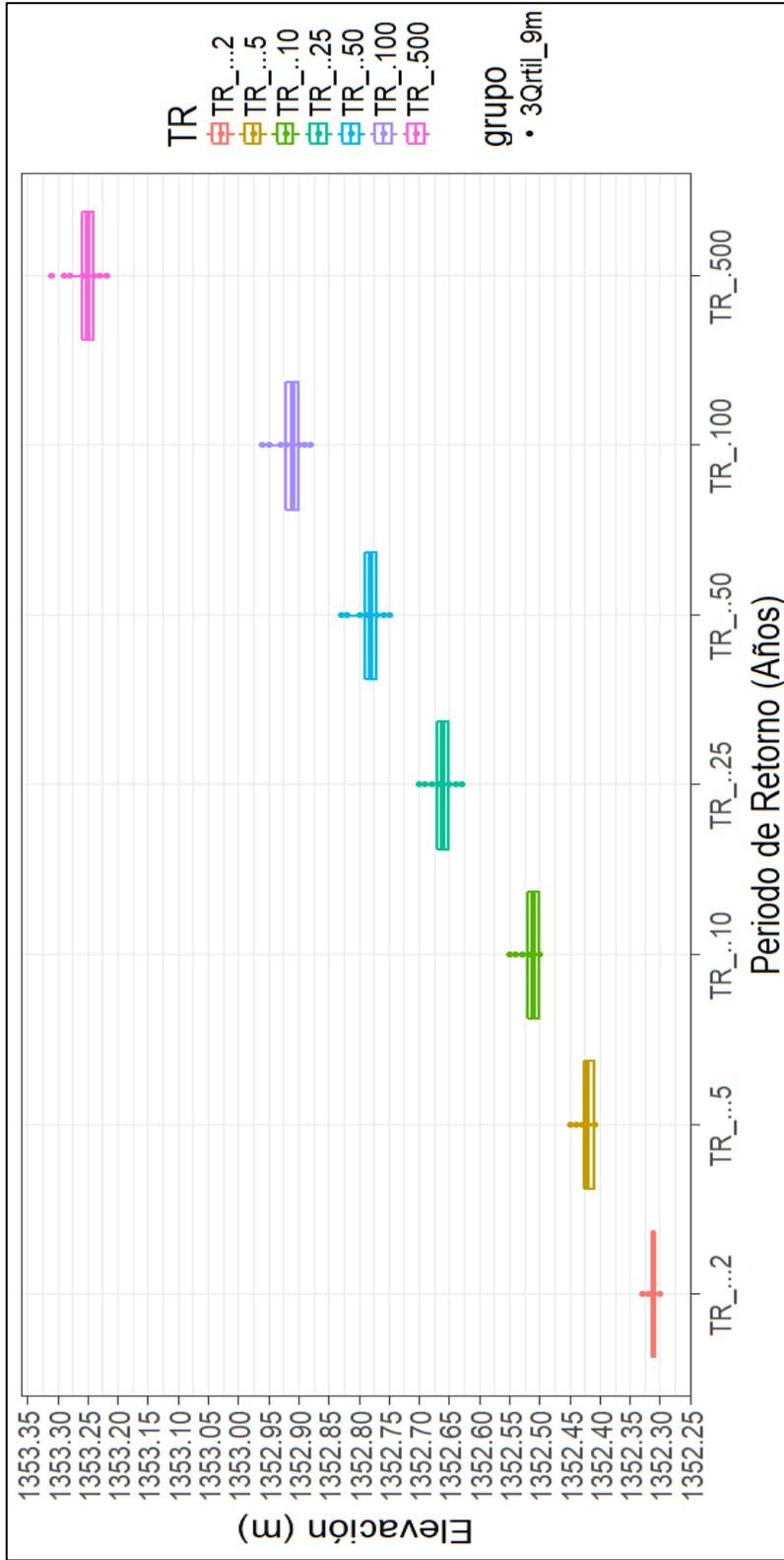


Figura 44. Boxplot del Tirante para el tercer cuartil del caudal de la estructura actual de 9 metros
Fuente: Obtenido del programa R studio

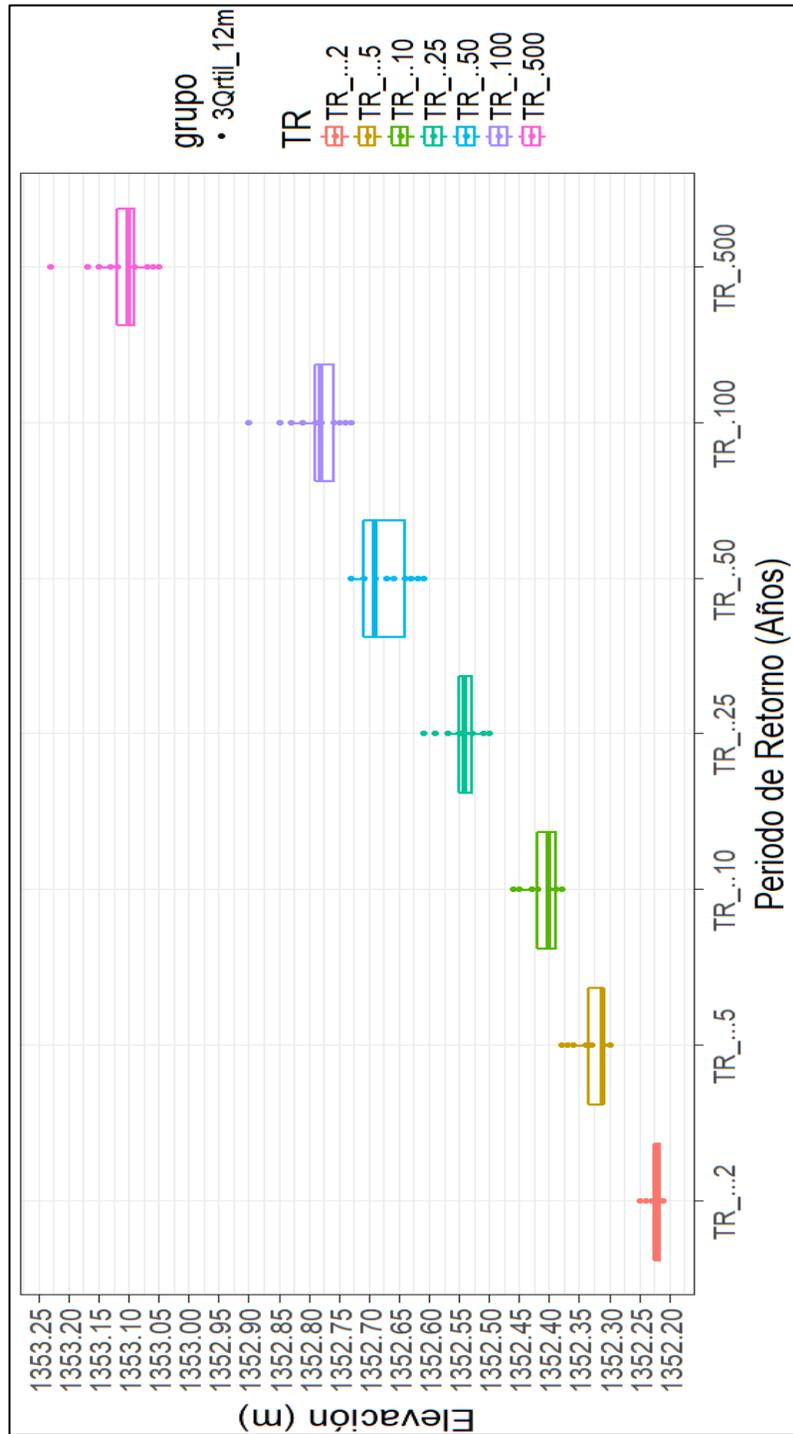


Figura 45. Boxplot del Tirante para el tercer cuartil del caudal de la estructura actual de 12 metros
Fuente: Obtenido del programa R studio

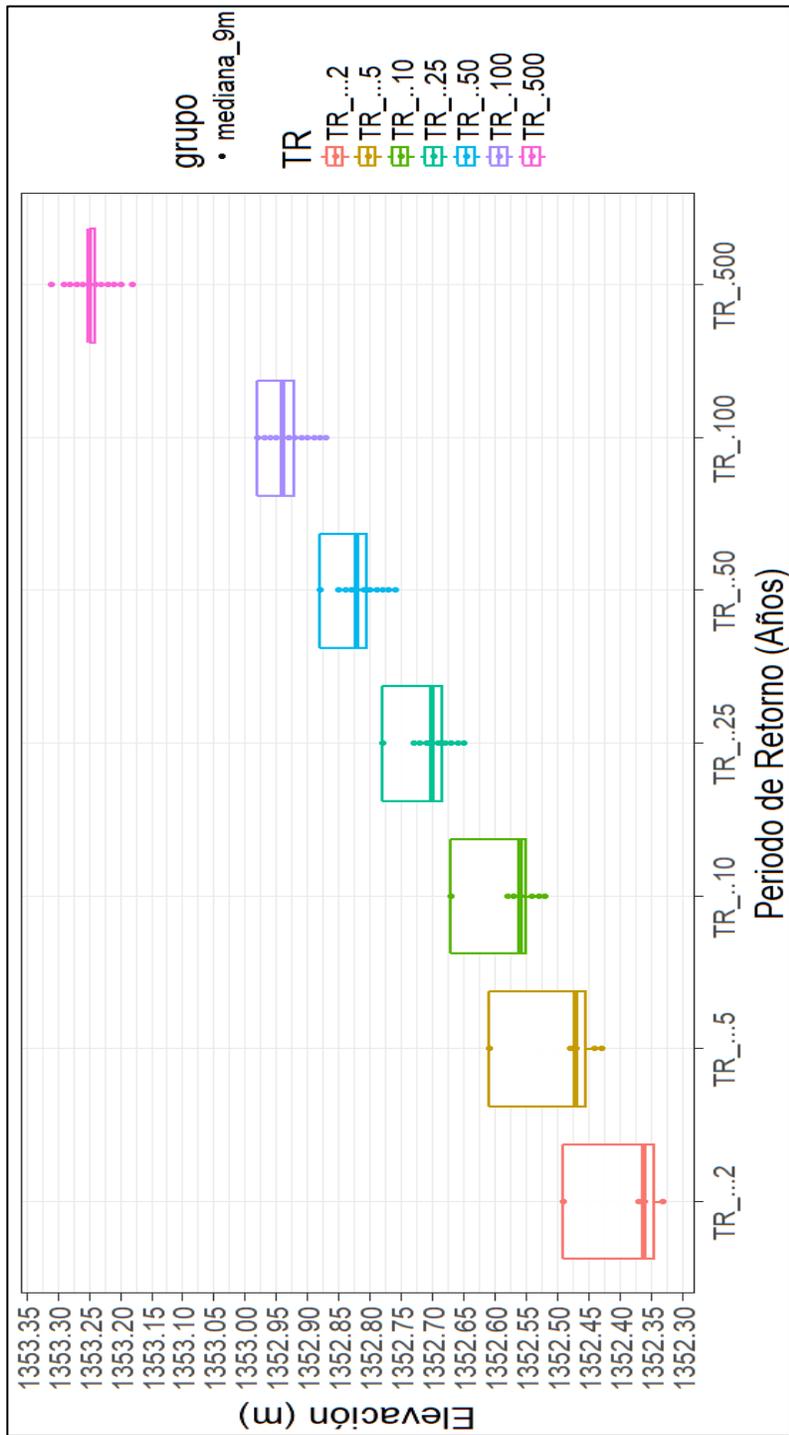


Figura 46. Boxplot del Tirante para la mediana del caudal de la estructura actual de 9 metros
Fuente: Obtenido del programa R studio

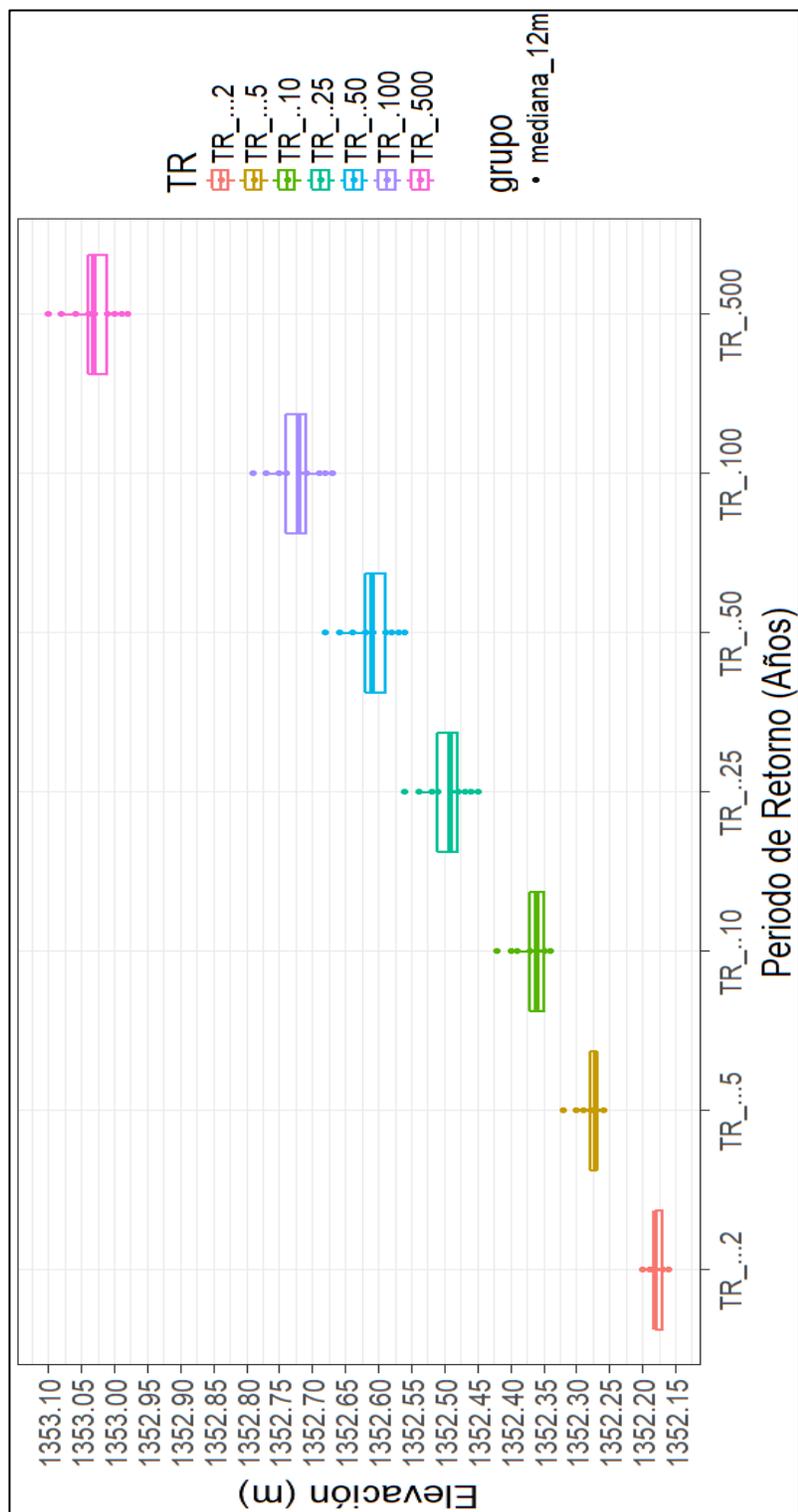


Figura 47. Boxplot del Tirante para la mediana del caudal de la estructura propuesta de 12 metros
Fuente: Obtenido del programa R studio

Las siguientes figuras presentan las curvas de descarga para los dos tipos de estructuras, las cuales grafican la relación que existe entre los niveles de crecida y de energía con el caudal

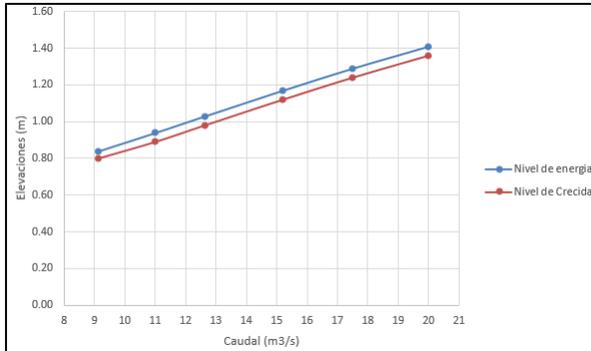


Figura 48. Curva de descarga para la estructura actual.

Fuente: Creación propia

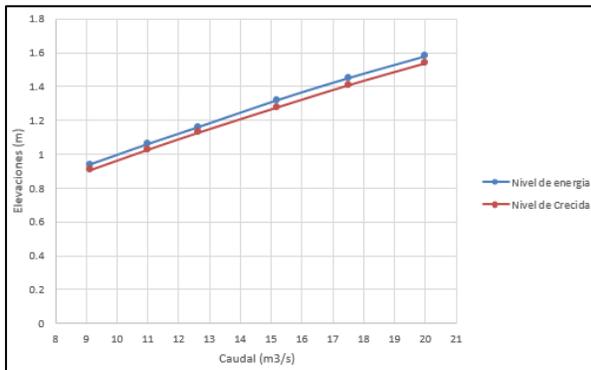


Figura 49. Curva de descarga para la estructura propuesta.

Fuente: Creación propia

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis de sensibilidad para las distintas condiciones de la estructura y sus respectivos caudales. En donde los resultados obtenidos representan la tendencia del conjunto de datos, por lo que no es sólo un valor puntual, debido a que el hacerlo así sería incurrir en un error.

Cuadro 53. Valores de nivel de creciente (m) para estructura actual, mediana del caudal

Valor	Periodo de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Media	0,89	1,00	1,09	1,24	1,36	1,49
Mediana	0,89	1,00	1,09	1,24	1,36	1,49
3Qrt	0,89	1,01	1,10	1,25	1,37	1,50

Fuente: Creación propia

Cuadro 54. Valores de nivel de creciente (m) para estructura actual, Tercer cuartil del caudal

Valor	Periodo de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Media	0,98	1,09	1,17	1,30	1,41	1,52
Mediana	0,94	1,05	1,14	1,28	1,40	1,52
3Qrt	1,07	1,19	1,25	1,36	1,46	1,56

Fuente: Creación propia

Cuadro 55. Valores de nivel de creciente (m) para estructura propuesta, mediana del caudal

Valor	Periodo de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Media	0,76	0,86	0,95	1,08	1,19	1,30
Mediana	0,76	0,85	0,94	1,07	1,19	1,30
3Qrt	0,76	0,86	0,95	1,09	1,20	1,32

Fuente: Creación propia

Cuadro 56. Valores de nivel de creciente (m) para estructura propuesta, Tercer cuartil del caudal

Valor	Periodo de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Media	0,80	0,90	0,99	1,12	1,26	1,36
Mediana	0,80	0,89	0,98	1,12	1,27	1,36
3Qrt	0,80	0,91	1,00	1,13	1,29	1,37

Fuente: Creación propia.

Los cuadros 57 y 58 presentan el resumen de los valores característicos de la quebrada El Molino

Cuadro 57. Resumen datos del programa HEC-RAS 5.0.5. Estructura actual				
Periodo de retorno (Años)	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	Velocidad de salida (m/s)	Velocidad del cauce aguas abajo (m/s)
2	9,13	1,07	1,46	0,90
5	1,00	1,19	1,52	0,96
10	1,63	1,25	1,57	1,01
25	1,20	1,36	1,63	1,07
50	1,50	1,46	1,70	1,14
100	20,00	1,56	1,76	1,19

Fuente: Creación Propia

Cuadro 58. Resumen datos del programa HEC-RAS 5.0.5. Estructura propuesta				
Periodo de retorno (Años)	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	Velocidad de salida (m/s)	Velocidad del Cauce aguas abajo (m/s)
2	9,13	0,80	1,17	0,68
5	11,00	0,91	1,25	0,72
10	12,63	1,00	1,28	0,75
25	15,20	1,13	1,33	0,77
50	17,50	1,29	1,37	0,82
100	20,00	1,37	1,42	0,86

Fuente: Creación Propia

Niveles de Energía

Del programa HEC-RAS 5.0.5 se obtuvieron los siguientes resultados de niveles de energía para el flujo del cauce. Esto es importante para verificar el régimen del río; y si existe la presencia de resaltos hidráulicos en la quebrada El Molino para así poder contrarrestarlos.

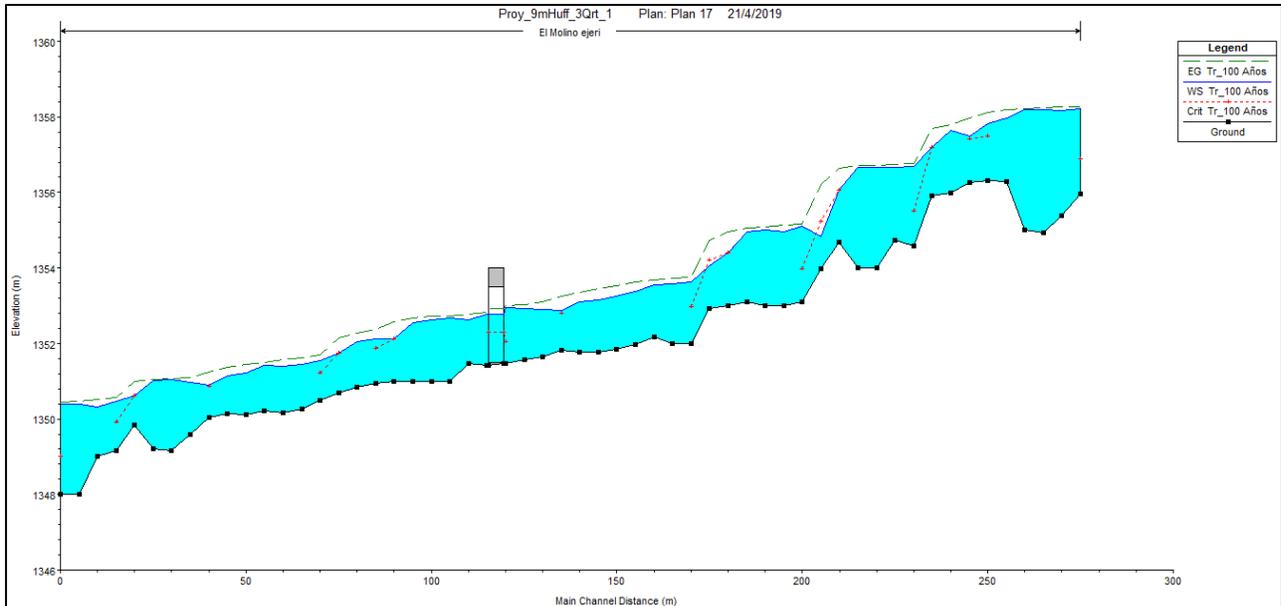


Figura 50. Vista longitudinal de los niveles de energía de la quebrada El Molino. Estructura Actual.
Fuente: Obtenido mediante el modelo HEC-RAS 5.0.5. Periodo de retorno 100 años

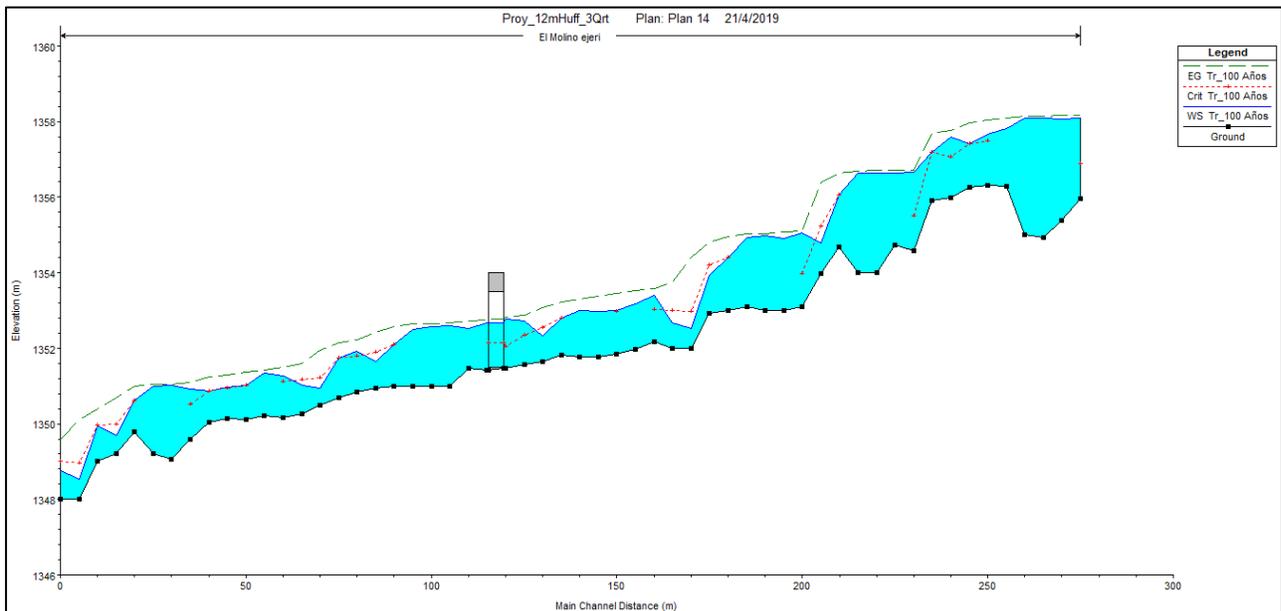


Figura 51. Vista longitudinal de los niveles de energía de la quebrada El Molino. Estructura Propuesta.
Fuente: Obtenido mediante el modelo HEC-RAS 5.0.5. Periodo de retorno 100 años

Elevación de la estructura

Al ser una estructura tipo alcantarilla cajón o box culvert se debe de respetar la capacidad hidráulica de la misma la cual no puede sobrepasar el 75%

de la altura disponible de la estructura que es de 2,75 metros, por lo que su capacidad hidráulica es de 2 metros. De los resultados se tiene un nivel de crecida de 1,37 metros lo cual indica que se está por debajo de la capacidad hidráulica máxima.

Para el caso de la estructura actual el valor del nivel de crecida es 1,56 metros por lo que tampoco excede el nivel de la capacidad hidráulica.

Al llegar a este punto se puede notar que el flujo de la quebrada rebasa la altura de la estructura transversal no por una baja altura de la obra sino por alguna otra causa, que posiblemente puede ser la obstrucción por materiales en la sección transversal de la estructura, lo cual impedía el paso del agua, de ahí que el flujo se haya desbordado. La anterior deducción se da porque en la mayoría de la longitud del cauce se presenta abundante vegetación con la presencia de árboles de altura considerable que pudieron ceder y cayeron al cauce durante las lluvias producidas por la tormenta Nate, además que en la zona existe la problemática de la disposición de desechos sólidos en el cauce de ciertos lugareños que aumentan las obstrucciones en la alcantarilla.

lecho de río (1352,42 MSNM), lo que significa una elevación de 75 cm respecto a la estructura actual.

Para el nivel de rasante se obtuvo una pendiente máxima de 9,8% ubicada en la cuesta en la proximidad de la estructura, por lo que cumple con lo que establece el M.O.P.T. sobre el 12% como pendiente máxima cuando se realiza el diseño nuevas carretas o mejoramientos geométricos. En cuanto a la estructura se cuenta con una pendiente del 1% la cual es menor al 2% de reglamentación.

Estructuras de disipación de energía

Para el caso de la estructura propuesta la velocidad de salida de la alcantarilla fue de 1,42 m/s este valor corresponde al valor de la mediana obtenido del análisis de sensibilidad, este valor es superior al obtenido para la velocidad del cauce aguas abajo que es de 0,86 m/s, estas velocidades para periodos de retorno de 100 años. Para la estructura actual se presenta la misma condición, en donde se tiene una velocidad de salida de 1,76 m/s y una velocidad de cauce aguas abajo de 1,19 m/s.

Elevación de la rasante

Para determinar la rasante se consideró la altura de la estructura, que es de 2,75 metros, ya que se pudo comprobar que en cualquiera de los dos casos de estudio esta altura cumple con la capacidad hidráulica pero se va a elevar debido a que el camino noroeste cercano a la estructura presenta una pendiente pronunciada, razón por la cual una elevación de la estructura corregiría la depresión existente en la entrada del elemento de paso.

Por lo tanto la elevación estimada para la estructura es 1355 metros sobre el nivel del mar; lo que serían 3,50 metros encima del nivel del

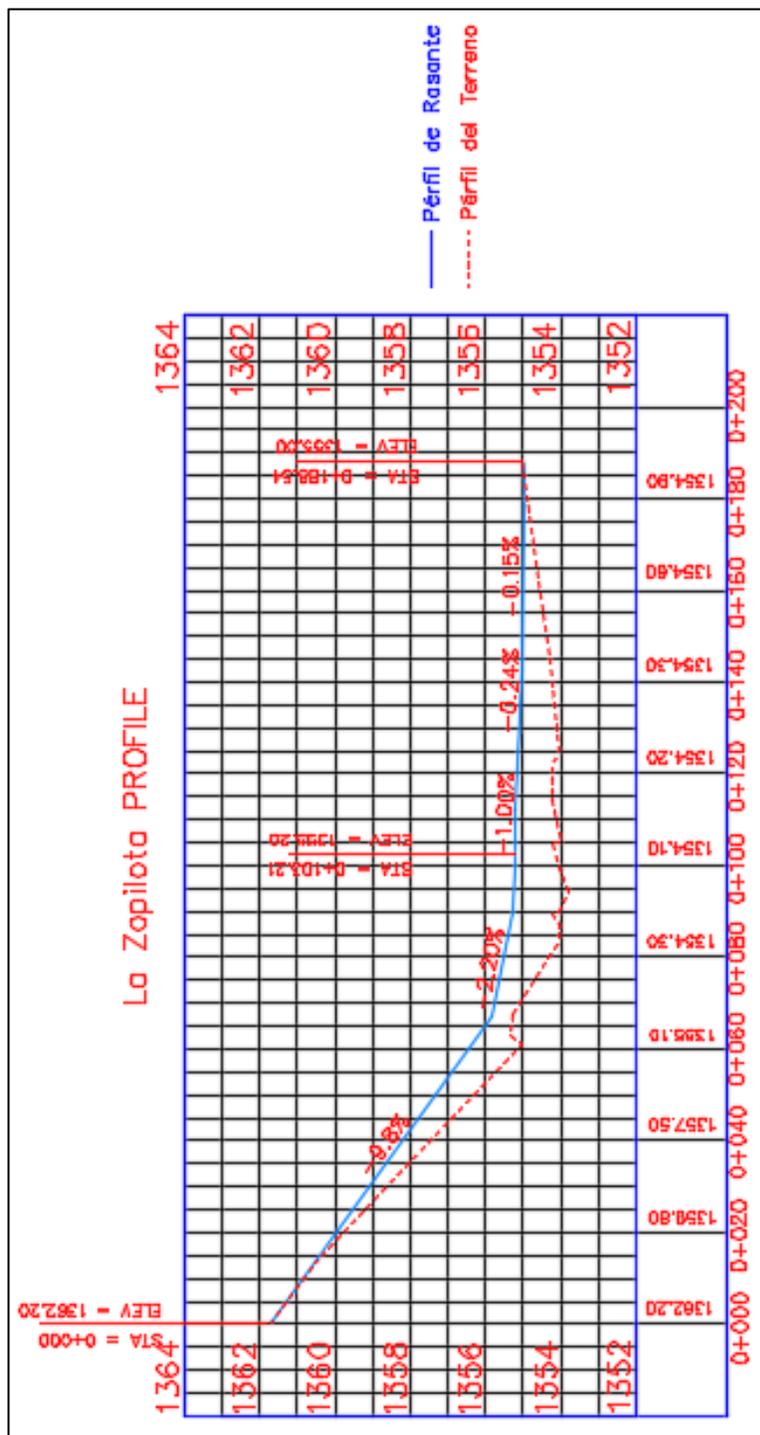


Figura 52. Perfil del nivel de rasante del camino La Zopilota
 Fuente: Elaborado mediante Civil 3D

Análisis de resultados

Determinación de parámetros morfométricos



Figura 53. Representación del área impermeable de la cuenca El Molino
Fuente: Google Earth Pro

Parámetros Generales

Área (A)

El área obtenida para la cuenca de la quebrada el Molino es de 2.23 km^2 lo cual la clasifica como una cuenca pequeña al tener una superficie inferior a los 250 km^2 , lo cual indica que el interés del estudio se debe de basar más en el estudio de las propiedades físicas de la cuenca como lo son la vegetación, tipo de suelo, relieve, entre otros aspectos; y en menor medida al cauce de la cuenca, sin embargo no es un aspecto a dejar de lado en el estudio. Además permite establecer el tipo de escala a utilizar en el caso que se necesitara el uso de mapas para estudios

posteriores, la escala para la cuenca sería la 1:5000. (Yardí, 2017)

Perímetro (P)

El perímetro obtenido a partir del programa ArcGIS 10.5 fue de 10.36 km este valor indica la longitud lineal de la divisoria de aguas de la cuenca, por otra parte el perímetro está relacionado con la litología, en donde cuencas redondeadas indican material más blando y una mayor edad (Yardí, 2017). La cuenca en estudio presenta una forma alargada implicando una litología joven.

Longitud de la cuenca (L)

La longitud de la cuenca es de 3,45 km determinado a partir del programa ArcGIS 10.5 esta longitud se refiere al punto hidrológicamente más alejado de la cuenca desde el punto de salida del flujo de agua.

Parámetros asociados a la forma

Coefficiente de compacidad o de Gravelius (Kc)

El coeficiente de Gravelius nos indica que tan redonda es la cuenca para el caso de la cuenca el Molino se obtiene un valor de 1,31 lo cual indica que la cuenca presenta una forma ovalo redonda a ovalo oblonga como se indicó en el **cuadro 1**.

Entre más alejado a la unidad la cuenca será menos susceptible a inundaciones por lo que se tiene una susceptibilidad moderada en cuanto a que se presenten crecidas en la Quebrada El Molino.

Rectángulo equivalente

Para el rectángulo equivalente se tiene un valor de $l = 0,84$ (base del rectángulo) y de $L = 2.85$ (Altura del rectángulo). La razón de realizar esta transformación de superficie se debe a que permite representar la cuenca de una manera más homogénea describiendo la proporción de la cuenca de una forma sencilla.

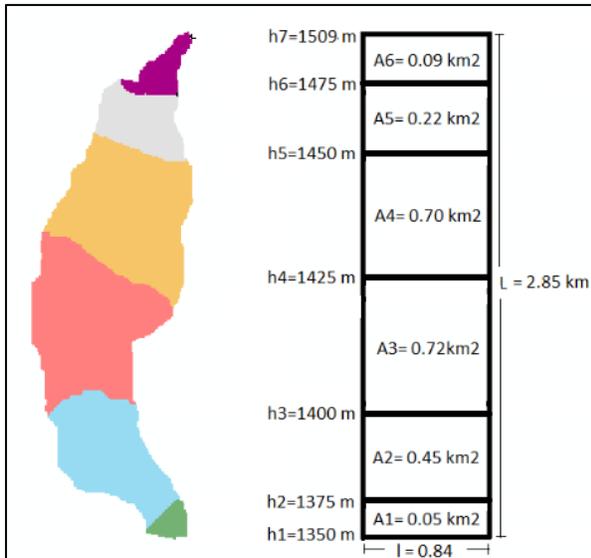


Figura 54. Rectángulo equivalente quebrada el Molino

Fuente: Creación propia

Factor de forma de Horton (Kf)

Para el factor de forma se tiene un valor de 0,19 lo cual indica que la forma de la cuenca el Molino es alargada según Horton, lo cual implica que no presente tantos problemas de inundación en comparación con cuencas con factores de Horton cercanos o mayores a la unidad y por consiguiente una forma más ensanchada.

Relación de elongación (Re)

Para la relación de elongación se obtiene un valor de 0,49 lo que sugiere que la cuenca el Molino presenta una topografía plana pero con porciones accidentadas. (Jimenez, Paroush, & Ish-Horowicz, 1997)

Parámetros de relieve

Índice de alargamiento (La)

Se considera que la cuenca el Molino presenta una forma muy alargada al tener un valor de 5,34 según el **cuadro 3** propuesto por Corbelle-rico, 2016. Esto hace que la cuenca presente menos tendencia a presentar crecidas en su flujo.

Coefficiente de masividad (Km)

El coeficiente de masividad es de 0,64 lo cual hace que la cuenca el Molino se considere como una cuenca montañosa según se dice en el **cuadro 4** propuesta por Hernández et al., 2016. Lo cual considerando las condiciones de vegetación de la cuenca en las aproximaciones del cauce permiten confirmar tal clasificación.

Pendiente media del cauce (so)

Se tiene una pendiente de 0,05 m/m considerándose por lo tanto como una cuenca con pendiente suave. Este valor es importante para conocer el nivel de erosión del cauce producto de la velocidad del flujo y el arrastre que este presente.

Pendiente media de la cuenca (S)

Para la cuenca se presenta un valor de 4% lo cual indica que la superficie posee un terreno suave como se muestra en el **cuadro 5** propuesto por Pérez, 1979. Estableciéndose como una cuenca con un relieve relativamente plano.

Curva Hipsométrica

De esta curva se puede inferir que la altura media de la cuenca corresponde al valor de la mediana que en este caso se obtiene de tomar el valor del 50% en el eje de las abscisas el cual es de 1420 m lo que implica que el 50% de los valores por

debajo de este porcentaje presentaran alturas inferiores a los 1420 m de altura.

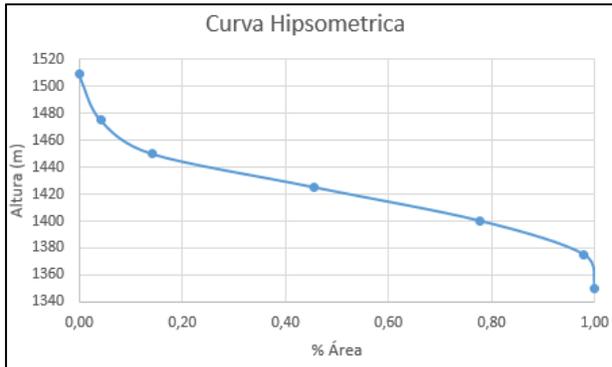


Figura 55. Curva Hipsométrica para la quebrada el Molino.
Fuente: Creación Propia.

Histogramas de frecuencias altimétricas

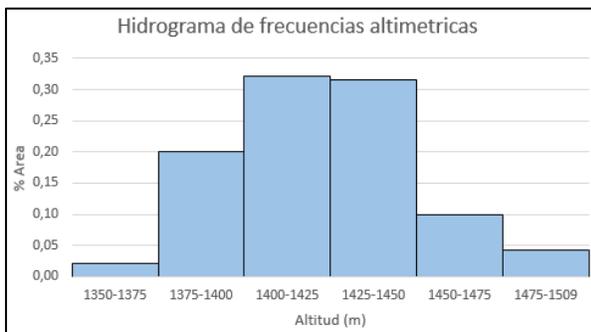


Figura 56. Hidrograma de frecuencias altimétricas para la quebrada el Molino.
Fuente: Creación Propia.

Parámetros de red hidrográfica

El sistema de Horton

Para la designación del orden de la cuenca por medio del sistema de Horton se tiene un valor de 2 cuya clase se clasifica como orden bajo, lo cual hace ver la simplicidad de la cuenca al no presentar tantos afluentes al cauce principal ya que para la cuenca el Molino solo se presenta un afluente tal como se muestra en la **Figura 57**.

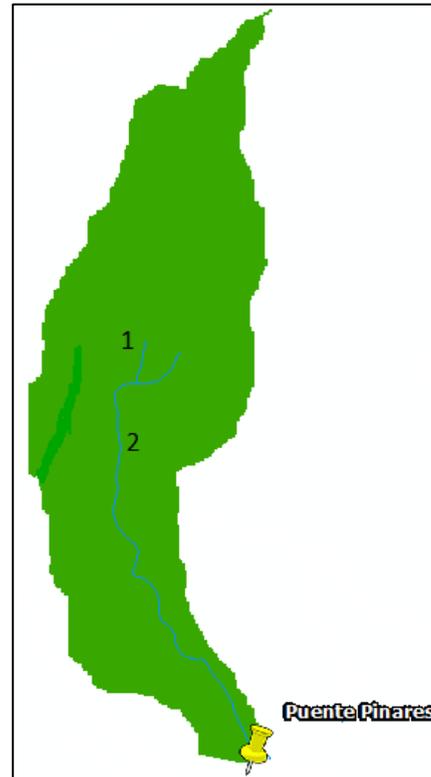


Figura 57. Orden de cuenca sistema Horton
Fuente: ArcGIS 10.5

El sistema de Strahler

Respecto al sistema de strahler se presenta un valor de 2 al igual que el sistema Horton su clase es de orden es bajo, lo cual confirma la poca complejidad existente en el cauce de la Quebrada El Molino.

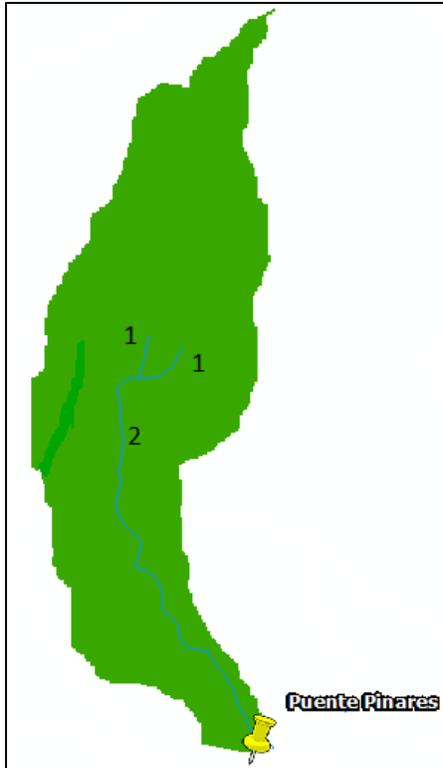


Figura 58. Orden de cuenca sistema Strahler
Fuente: ArcGIS 10.5

Densidad de drenaje (Dd)

El valor de densidad de drenaje corresponde a 1,55 entrando en la clasificación de cuenca con densidad moderada. Este resultado indica que la cuenca posee una sensibilidad moderada a sufrir efectos erosivos, así como una estructuración de red hidrográfica moderada este resultado contrasta ligeramente con los resultados obtenidos para los ordenes de cuenca los cuales presentan una clase baja.

Coefficiente de circularidad de Miller (Cc)

El coeficiente de circularidad como su nombre lo indica expresa que tan circular es la forma de la cuenca, para el caso de la cuenca en estudio el valor de este parametro es de 0,26 valor que se encuentra alejado a la unidad razón por la que la

forma de la cuenca es alargada ya que entre más se acerque a la unidad la forma será más circular.

Resumen parametros morfometricos

Cuadro 59. Resumen parametros morfometricos	
Parametros Generales	
Area (km ²)	2,23
Perimetro (km)	10,36
Long. Cuenca (km)	3,45
Ancho de la cuenca (km)	0,65
Altura media de la cuenca (km)	1420
Altura Max. Cuenca (km)	1509
Altura Min. Cuenca (km)	1350
Desnivel Altitudinal (km)	159
Pendiente Media Cauce (m/m)	0,05
Pendiente Media Cuenca (%)	4%
Número de cauces de Orden uno	2
Número de cauces de un Orden dos	1
Parametros de Forma	
Coefficiente de Gravelius	1,31
Rectangulo Equivalente	-
L (Lado mayor)	2,65
l (Lado menor)	0,84
Factor de Forma de Horton	0,19
Alejamiento medio	2,31
Relación de Elongación	0,49
Parametros de Relieve	
Indice de Alargamiento	5,34
Coefficiente de Masividad	0,64
Parametros de Red Hidrografica	
Sistema de Horton	2
Sistema de strahler	2
Densidad de Drenaje	1,55
Relación de Bifurcación	2
Coefficiente de Circularidad de Miller	0,26

Fuente: Creación propia

Por lo tanto en resumen la cuenca presenta una forma alargada lo cual la hace poco susceptible a presentar crecidas, además es una red de drenaje poco compleja lo cual hace que las precipitaciones tarden más en escurrir por el cauce.

Vida útil de la estructura

Se tomó el valor de 30 años de vida útil para la estructura, a pesar de que según el **cuadro 25** se estableciera este valor de 25 años y de 28 años mediante la **ecuación 33**; esto para establecer un periodo un poco mayor al ser una estructura en la que hay paso de personas, por lo que se debe de velar que la estructura conserve la seguridad, estabilidad y aptitud en servicio el mayor tiempo posible ajustándose por supuesto a la economía del proyecto.

Estimación de Caudales de diseño

Método Racional

La ecuación del método Racional sirve para establecer una referencia con los valores que se obtengan de los resultados que emite el programa HEC-HMS 4.0, para así determinar cuál de los dos modelos de hietogramas se asemeja mejor a las condiciones que se presentan en la quebrada El Molino.

Esta fórmula requiere de ciertas variables entre ellas el valor del coeficiente de escorrentía cuyo valor es de 0,53 para un periodo de retorno de 100 años, debido a las condiciones que se encuentran en el sitio y la presencia de vegetación. Los otros factores son el área (2,23 km²) y la precipitación la cual es obtenida de la **ecuación 15** para un periodo de retorno de 100 años (76,32 mm/h); y al desarrollar la fórmula se da un valor de caudal de 23,16 m³/s. Se toma el valor de periodo de retorno de 100 años ya que es el intervalo de tiempo de reincidencia de tormenta utilizado para el diseño de estructuras como puentes o alcantarillas de caudales considerables.

Determinación de la tormenta de diseño

Se establece una duración de la tormenta de 80 minutos, ya que se toma como valor de referencia el obtenido por el tiempo de concentración; esta es una consideración habitual para establecer dicho valor.

Por otra parte los periodos de retorno son para 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los valores de 2, 5 y 10 años sirven para establecer precipitaciones próximas que pueden afectar a la cuenca y además ayudan al diseño de obras hidráulicas empleadas para canalización de aguas de lluvia en ciudades pequeñas y obras menores de desagüe. El resto de periodos de retorno de 25, 50 y 100 años son usados para el diseño de estructuras hidráulicas de mayor envergadura como por ejemplo alcantarillas y puentes. Para el estudio se usó el periodo de retorno de 100 años ya que para el diseño de alcantarillas que permiten el paso de quebradas o ríos el periodo de diseño suele estar entre los 50 y 100 años siendo el valor de 50 años el más utilizado pero al presentarse en la zona problemas como el desecho de materiales por parte de los vecinos que obstaculizan el paso del agua y además presentar vegetación (árboles y maleza) en las orillas del cauce que se pueden acumular y generar un tapón en el sitio de la estructura, se prefiere utilizar como factor de seguridad el periodo de retorno de 100 años para evitar el daño en la estructura.

El periodo de rezago de 45 minutos es uno de los valores de entrada requeridos en el desarrollo del modelo computacional HEC-RAS 4.0 en específico en el cálculo de las transformaciones de precipitación, el cual indica que existe un tiempo de 45 minutos desde el punto de ubicado en el centroide del hietograma de precipitaciones hasta el punto situado en el hidrograma en el que se presenta el pico de caudal, en otras palabras según el hietograma de precipitaciones se indica por ejemplo que la precipitación se va a dar en un punto situado entre los 20 a 30 minutos pero el punto de mayor caudal en el hidrograma se presentara 45 minutos después en el intervalo entre los 65 a 75 minutos.

Hietogramas

Para los hietogramas se hace el uso de dos métodos, el de distribución acumulada de Huff y el método de bloque alterno. Estos poseen sus semejanzas y diferencias, por lo que se realizó el análisis de ambos casos para establecer cual representa mejor la condición de la quebrada El Molino.

El método de bloque alterno genera hietogramas en forma de campana, lo cual no permite ver el comportamiento real de la distribución de la precipitación en el tiempo ya que los valores máximos se encuentran situados siempre en la parte central del hietograma. Dicha precipitación se presenta en el intervalo de tiempo de 40 a 50 minutos.

El método de Huff presenta hietogramas que permiten ver un comportamiento más variado de la precipitación durante el periodo tormentoso; en donde la mayor precipitación se encuentra entre los minutos 30 y 40 minutos.

Los valores de precipitación obtenidos mediante el método de bloques alternos presentan caudales más bajos en comparación con los resultados obtenidos mediante el método de Huff y el resultado obtenido por medio de la ecuación de Manning como se pudo apreciar en el **cuadro 52**, razón por la cual se eligió el método de Huff como el procedimiento cuyos resultados fueron utilizados para el cálculo del tirante crítico.

De los resultados se puede confirmar que el método de bloques alternos es un método que debido a su simplicidad puede llevar a resultados alejados a los reales, y por tanto incluirlos puede generar un diseño inadecuado. Además otra de las razones que pueden explicar la variación de los datos, recae en que el método de bloques alternos tiene como variable principal la intensidad media máxima de los bloques, mientras que el método de Huff además de la intensidad emplea la relación existente entre la duración de la tormenta y el cuartil donde ocurre la mayor parte de la precipitación, esto permite tener una selección más cuidadosa del método.

Programa HEC-HMS 4.0

Al obtener los resultados de la corrida del programa HEC-HMS 4.0 se pudo determinar cuál de los métodos de hietograma presenta valores de

caudal similares a los obtenidos por la ecuación de Manning, en donde el método de Huff es el que más se aproxima a dichos valores mientras que el método de bloque alterno presenta caudales menores, esto implica que de utilizar este método se tendrían tirantes o niveles de creciente menores a los esperados en la quebrada El Molino; por lo que el utilizar este método generaría un diseño inadecuado. Por lo anterior los resultados del método de bloque alterno no fueron considerados para el cálculo del nivel de crecida, y sí los valores tomados por el método de Huff al ser un método que genera mayor confianza por ser un método formulado de una manera más empírica debido a la gran cantidad de estudios realizados por Huff.

Análisis de sensibilidad

Del análisis de sensibilidad se tienen los valores correspondientes a la mediana y el tercer cuartil del total de los resultados provenientes de las distintas combinaciones, esto para no expresar un único valor sino establecer un cierto rango de posibles resultados de caudal que podrían presentarse en el cauce de la quebrada.

Además se establece que para el diseño del nivel de creciente el valor más apropiado sería el valor del tercer cuartil, esto porque presenta un mayor caudal, lo que lo convierte en el caso más crítico.

Otro aspecto a considerar es que los valores de caudal son tomados para un rango de tiempo ubicado entre las 1:20 y 1:50 horas de las 5 horas establecidas para la simulación del programa, ya que es el intervalo de tiempo en el que se presentaron los caudales pico.

Por otra parte las variables de porcentaje de impermeabilidad (%imp) y número de curva (NC) presentan más variabilidad de los resultados como se puede ver en el **cuadro 36**; en estos resultados se obtuvieron los mayores y menores caudales. Esto se debe a que ambas variables forman parte del modelo de abstracciones o pérdidas de precipitación, por lo que a mayor impermeabilidad y número de curva se obtiene mayor precipitación neta, y por consiguiente los caudales que llegan a la quebrada van a ser mayores así como los tirantes; lo inverso pasa si se reducen estas variables.

Nivel de Creciente

Para la quebrada objeto del presente estudio el uso de un modelo hidráulico unidimensional como el HEC-RAS 5.0.5 es suficiente y adecuado para estimar las características del flujo en particular los niveles para los caudales de diseño y los parámetros hidráulicos relacionados con los cálculos de socavación, porque incluye ecuaciones que permiten describir la influencia del flujo de agua en la estructura.

La ecuación de energía considera las pérdidas de energía por fricción que se presentan en el cauce. Además incluye la ecuación de momentum la cual permite calcular los flujos mixtos como saltos hidráulicos o el flujo que pasa en puentes o alcantarillas por lo que cubre en cierta manera las afectaciones y consideraciones que se pueden presentar en la quebrada como la pendiente, niveles de energía, variaciones de velocidad del flujo de agua en las secciones del cauce, etc.

Los resultados del tirante para la tormenta de diseño se realizaron para dos condiciones estructurales una en el que se mantiene la estructura actual y otra en la que se propone una ampliación de la estructura tanto en el ancho de vía como en el largo y se mantiene la altura, además para cada una de las condiciones se utilizaron los caudales obtenidos de los hidrogramas de Huff tanto para la mediana como para el tercer cuartil por lo que al final se tienen cuatro tirantes esto para generar distintas posibilidades de nivel de crecida en la estructura.

Análisis de sensibilidad

Sobre las combinaciones realizadas se estableció que los cambios más significativos se presentaron al variar el valor del número de Manning en el centro del cauce en donde si hubieron cambios más significativos en el resultado del tirante, mientras que en el caso donde se varió el número de Manning de los costados del cauce los valores de tirante obtenidos fueron casi constantes.

Se estima que el nivel de creciente para la estructura actual en el periodo de retorno de 100 años es de 1,56 m desde el nivel de lecho de cauce hasta la superficie del flujo, por lo que cumple con la capacidad hidráulica de la estructura, ya que no supera el 75% de la altura de la alcantarilla cuyo valor es de 2 metros.

Por otra parte para la estructura propuesta, el valor del tirante para el tercer cuartil y periodo de retorno de 100 años es de 1,37 metros por lo que también cumple con la capacidad hidráulica.

De los resultados anteriores no existe paso del nivel de agua sobre la estructura esto daría a entender que las posibles causas por las que la quebrada sobrepasa la estructura sería por la presencia de materiales propios de la vegetación en las orillas de la quebrada El Molino y por otra problemática de la zona la cual es la deposición de desechos al cauce de la quebrada, ya que esto genera un tapón en la estructura que impide el paso del agua provocando el desborde.

Otro aspecto a considerar es que el aumento de 3 metros de la longitud entre estribos para la estructura propuesta; provocó una disminución de casi el 13% en el tirante crítico en comparación con la actual estructura, lo cual permite reducir el efecto de estrangulamiento que genera el aumento de tirantes y velocidades.

Los boxplot de las **figuras 44, 45, 46 y 47** permiten apreciar la variabilidad de las medianas de los tirantes para los distintos periodos de retorno en donde a medida en que se aumenta el periodo de tiempo aumenta el nivel de crecida, este comportamiento es el esperado ya que en un periodo de tiempo más prolongado cabe mayor posibilidad de que tormentas de gran magnitud existan. Además se puede observar que el periodo de retorno para 500 años existe una dispersión mayor en los valores en comparación con los demás periodos de retorno, esto porque abarca una mayor cantidad de valores; este periodo de 500 años se calculó para su posible uso en proyectos futuros. En su contraparte el periodo de retorno de 2 años presenta una mayor precisión en sus valores ya que al ser un periodo relativamente cercano no implica tanta incertidumbre o variabilidad ya que se considera una menor probabilidad de existir crecidas en un intervalo de tiempo tan corto por lo que las precipitaciones son similares.

Niveles de Energía

De los resultados se puede ver que la mayoría del tramo de la quebrada El Molino presenta un flujo subcrítico, excepto en varios tramos del cauce en donde el tirante crítico se encuentra por encima del nivel de agua lo que lo convierte en un flujo supercrítico.

Para el cauce de la estructura actual se presentan 8 tramos en los que se genera un flujo supercrítico y en el cauce de la estructura propuesta. Este tipo de flujo supercrítico se presenta en las secciones en donde existe un cambio de pendiente pronunciado por ejemplo en el tramo de las secciones 240 y 235 según las **figuras 86 y 87** que se encuentra en el apéndice 14 se tiene que en el tramo anterior de las secciones 245 a 240 se tiene una pendiente de 0,007588 m/m mientras que en el tramo 240 – 235 la pendiente pasa a 0,036817, lo cual reafirma lo que indica Rodríguez (2008) en cuanto que el régimen de un fluido puede variar por varias condiciones por la pendiente, reducción de la sección o por la acción de ambas. Para la estructura actual y propuesta se tiene un mismo comportamiento en cuanto a este tema, sin embargo el cambio más significativo se aprecia en que en la sección propuesta se presenta que el flujo supercrítico aparece unos 10 metros aguas arriba antes de llegar a la estructura esto puede deberse que el haber ampliado la estructura género que no se presentara empozamiento en la entrada de la estructura y al tener un nivel de agua más bajo provocara que la velocidad del agua aumentara y por consiguiente el nivel de carga dinámica, hasta el punto en el cual el tirante crítico quedo por encima del nivel piezómetro.

Además otro punto de flujo supercrítico se ubica en la sección de la estructura esto porque como lo indicaba Rodríguez (2008) se presenta una reducción de la sección, lo cual hace que aumente el nivel de carga dinámica generando que la velocidad.

De las **cuadros 86 y 87** de la sección del apéndice 14 también queda demostrado el tipo de flujo de la cuenca al observar los valores de número de Froude en las secciones donde el tirante crítico se encuentra por encima del nivel de creciente ya que para estos tramos se tienen números de Froude mayores a la unidad, tal como lo indica Rodríguez (2008) números mayores a Froude son propios de flujos supercrítico. Por lo que en estos tramos se presenta velocidades más altas lo cual provoca una mayor presencia de arrastre de material del lecho del río.

Estructuras de disipación de energía

Para el caso de la estructura propuesta, al realizar la comparación entre las velocidades de salida de la alcantarilla y la velocidad del cauce aguas abajo se determinó que es necesario el construir elementos de disipación de energía externos, debido a que la velocidad de salida de la estructura supera en más de 30% a la velocidad del cauce aguas abajo; como se puede apreciar de los resultados se tiene una velocidad de salida de 1,42 m/s, superando la velocidad del cauce aguas abajo (0,86 m/s) en más de un 60%, estas velocidades para periodos de retorno de 100 años. Para la estructura actual se presenta la misma condición, en donde se tiene una velocidad de salida de 1,76 m/s y una velocidad de cauce aguas abajo de 1,19 m/s, lo que representa un exceso cercano al 50%.

Nivel de Rasante

Para el nivel de rasante se tiene una elevación de 1355 MSNM, lo cual significa una nueva altura para la estructura de paso transversal que comunica el camino La Zopilota con el resto comunidades del Cantón de Cartago. Esta nueva altura (3,50 m sobre el nivel de lecho de río) se incrementa en un metro para poder reducir las pendientes en el camino inmediatamente al norte de la obra para así cumplir con los lineamientos que establecen el MOPT y los expuestos en la ley general de caminos públicos.

En cuanto a pendientes se establece que debe de evitar caminos con pendientes superiores al 12%, lo cual se cumple en la propuesta de rasante ya que la pendiente máxima es de 9,8%; por otro lado las pendientes en estructuras como puentes y alcantarillas no pueden tener pendientes mayores al 3%, por lo que la estructura propuesta estaría dentro del rango aceptable al tener una pendiente del 1 %.

Se tiene además un ancho de vía de 14 metros, que es el que rige para caminos en Costa Rica. Surge el inconveniente que tanto al sur como al norte de la estructura existe la construcción de casas de habitación que no respetaron el ancho de vía correspondiente, razón por la cual se debe de realizar el trámite que corresponda para que dichas construcciones cumplan con el retiro de ley.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Del estudio hidrológico y a partir de los resultados obtenidos para los parámetros morfométricos, se establece que la cuenca de la quebrada El Molino presenta una forma alargada lo cual hace que sea poco sensible a presentar crecidas.
- El método del SCS haciendo uso del hietograma de Huff tuvo resultados (20 m³/s) más satisfactorios para determinar el caudal que el hietograma de bloques alternos (9,80 m³/s), al tener un valor similar al método racional (19,86 m³/s), este resultado comprueba que el método de Huff al ser un método más empírico que el de bloques alternos permite obtener resultados que se ajustan más a lo esperado.
- El nivel de crecida para el periodo de retorno de 100 años para la estructura actual es de 1,56 metros y para la estructura propuesta el valor del tirante es de 1,37 metros medidos desde el nivel de lecho de río. Estos valores corresponden al tercer cuartil del conjunto de tirantes obtenidos mediante el análisis de sensibilidad.
- La superación de la capacidad hidráulica de la estructura se da por razones que no son propias del caudal de la cuenca; debido a que la principal causa puede deberse al depósito de basura de las personas que habitan en los alrededores de la cuenca y material producto de la vegetación existente a las orillas de la quebrada.
- El nivel de la rasante queda a una elevación de 1355 MSNM, lo cual significa una elevación de 75 cm respecto a la altura del actual elemento transversal de paso, por lo que la altura medida desde el nivel del lecho de río y la parte inferior de la losa de paso es de 3,50 metros.

Recomendaciones

- En los casos en que el levantamiento topográfico se haga por medio del uso de dron; el tomar en cuenta que las alturas pueden variar por la presencia de objetos como casas, postes, arboles, entre otros, por lo tanto para las zonas en las que según los resultados obtenidos se tengan problemas con las alturas sería necesario el realizar un levantamiento por medio de estación total para compensar los fallos en el sistema realizado por dron.
- El tratar de disponer en la municipalidad de algún dispositivo pluviográfico, que registre las precipitaciones para las zonas cercanas al cantón de Cartago, para así tener datos más certeros de los caudales de los ríos dentro de Cartago para proyectos futuros.
- Tener una base de datos de los proyectos realizados para el Cantón de Cartago que permita el acceso de información a la hora de realizar un estudio o proyecto, ya sea de este tipo o cualquier otro.
- Realizar campañas de concientización a los vecinos para que se detenga la bota de desechos al cauce de la quebrada.
- Al tener velocidades de salida mayores a los del cauce natural, este debe de protegerse mediante la construcción de emboquillados de piedra, superficies con enchapado de rocas apiladas u alguna otra forma que disminuya los niveles de energía. Estos deben tener una longitud más allá de la zona de socavación.
- Para la determinación de la socavación realizar una modelación hidrodinámica en 2D o 3D con el fin de obtener un resultado más aproximado de la afectación en la estructura.

Referencias

- Angel, A., & Rospigliossi, E. (2010). Hidrología en cuencas pequeñas la formula racional.
- Chow, V. Te. (2004). *Chow Ven Te, Hidraulica De Canales Abiertos.PDF*. Bogota: Mac-Graw Hill Internacional S.A.
- Corbelle-rico, E. (2016). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos Lidar en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador, (January), 399–412.
- Cuencas, L. A. S. (2008). Unidad 4: las cuencas (i), (I).
- Datum, E. L., Geoide, E. L., & Elipsoide, E. L. (2016). El datum, el geoide, el elipsoide y la cartografía, 27–38.
- Diseño, C. M. D. E., K, E. L. T., Vergara, A. J., & Mery, J. (2004). ANÁLISIS DEL USO DEL MÉTODO RACIONAL PARA EL CÁLCULO DE ANALYSIS OF THE USE OF THE RATIONAL METHOD TO CALCULATE DESIGN PEAK DISCHARGES , THE K TERM, 3, 69–75.
- Enciso, P. (2015). Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho .".
- González, A. (2004). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LACUENCA YDE LARED DE DRENAJE DELRÍO ZADORRA Y SUS AFLUENTES APLICADO ALAPELIGROSIDAD DE CRECIDAS.
- Hernández, O., Castillo, H., Daniel, F., Herrera, R., Fuentes, V., Edmundo, S., ... Alberto, J. (2016). Investigación y Ciencia, 26–34.
- Jimenez, G., Paroush, Z. 'E., & Ish-Horowicz, D. (1997). Morfometría de cuencas. *Genes & Development*, 11(22), 3072–3082.
- Lavao, S. (2014). APLICACIÓN DE LA TEORÍA DEL NÚMERO DE CURVA (CN) A UNA CUENCA DE MONTAÑA. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO MURCA, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.
- Lobo-Hernández, M. A. (2010). Instituto Geográfico Nacional. *Captura, Gestión y Difusión de Datos Geoespaciales: El Caso de Costa Rica*. Retrieved from <http://www.ign.es/web/ign/portal>
- Lux, B. &, & Cardona. (2014). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.
- Maza Alvarez, J. A. (1997). *Calculo De Socavacion De Puentes*.
- Méndez, W., Cartaya, S., & León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas , Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica Caracterização hidroclimatológica e morfométrica da bacia do rio San Julián (estado Vargas , Venezuela): contribuições para a avaliação da ameaça hidrogeomorfológica Hydroclimatological and Morphometric Characterization of the San Julián River Basin (Vargas , Venezuela): Contributions to the Evaluation of Hydrogeomorphological Threats, 24, 133–156.
- Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pizarro Tapia, R., Aravena Garrido, D., Macaya Pérez, K., Abarza Martínez, A., Cornejo Espinoza, M., Labra Lorca, M., ... Román Arellano, L. (2007). *Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe*. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228195S.pdf>
- Porras, P. (2014). Seminario sobre evaluación de estructuras de puentes en costa rica.
- Tipos, C. (n.d.). Precipitaciones, 1–10.
- Villón, M. (2004). *HIDROLOGÍA-Ing.Máximo Villón_2.pdf*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Yardí, M. (2017). Analisis de las variables morfométricas que nos la def., *XIX*, 41–68.

Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63 (11): 1117 - 1142.

IBAL S.A. (2009). Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Microcuenca de las Quebradas Las Panelas y La Balsa. Recuperado de: http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.ASPECTOS_BIOFISICO

Aparicio, F. (1996). Fundamentos de Hidrología de Superficie. 4ta. Edición. México. Editorial Limusa S.A.P 303

Trenberth K. E. [y otros] The changing character of precipitation. [Publicación periódica] // Bulletin of the American Meteorological Society , 84. - 2003. - págs. 1205–1217.

Team, R Core (2016).R: A language and environment for statistical computing. R-project.org/.

Apéndice

1. Tablas de precipitaciones
2. Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)
3. Precipitaciones método bloque alterno
4. Hietogramas de diseño método bloque alterno
5. Precipitaciones método de Huff
6. Hietogramas de diseño método de Huff
7. Hidrogramas mediante método de bloque alterno
8. Hidrogramas mediante método de Huff
9. Curva Granulométrica del lecho de río
10. Resultados Análisis de sensibilidad para el caudal de diseño (Huff)
11. Resultados Análisis de sensibilidad para el caudal de diseño (Bloque Alterno)
12. Resultados Análisis de sensibilidad para el nivel de creciente
13. Sección transversal del programa HEC-RAS.
14. Tablas resumen HEC-RAS

Apéndice 1. Tablas de precipitaciones

Cuadro 60. Precipitaciones periodo de retorno de 2 años

Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
105.67	2	5
87.39	2	10
78.21	2	15
72.28	2	20
67.99	2	25
64.68	2	30
62.00	2	35
59.78	2	40
57.88	2	45
56.23	2	50
54.78	2	55
53.49	2	60
52.33	2	65
51.28	2	70
50.32	2	75
49.44	2	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 61. Precipitaciones periodo de retorno de 5 años

Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
116.99	5	5
96.75	5	10
86.58	5	15
80.02	5	20
75.27	5	25
71.60	5	30
68.64	5	35
66.17	5	40
64.07	5	45
62.25	5	50
60.65	5	55
59.22	5	60
57.93	5	65
56.77	5	70
55.70	5	75
54.73	5	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 62. Precipitaciones periodo de retorno de 10 años		
Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
126.34	10	5
104.49	10	10
93.50	10	15
86.42	10	20
81.29	10	25
77.33	10	30
74.13	10	35
71.47	10	40
69.20	10	45
67.23	10	50
65.50	10	55
63.95	10	60
62.57	10	65
61.31	10	70
60.16	10	75
59.11	10	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 63. Precipitaciones periodo de retorno de 25 años		
Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
139.87	25	5
115.68	25	10
103.51	25	15
95.67	25	20
89.99	25	25
85.61	25	30
82.07	25	35
79.12	25	40
76.61	25	45
74.43	25	50
72.51	25	55
70.80	25	60
69.26	25	65
67.87	25	70
66.60	25	75
65.43	25	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 64. Precipitaciones periodo de retorno de 50 años		
Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
151.06	50	5
124.93	50	10
111.79	50	15
103.32	50	20
97.19	50	25
92.45	50	30
88.63	50	35
85.45	50	40
82.73	50	45
80.38	50	50
78.31	50	55
76.46	50	60
74.80	50	65
73.30	50	70
71.93	50	75
70.67	50	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 65. Precipitaciones periodo de retorno de 100 años		
Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
163.14	100	5
134.92	100	10
120.73	100	15
111.58	100	20
104.96	100	25
99.85	100	30
95.72	100	35
92.28	100	40
89.35	100	45
86.81	100	50
84.57	100	55
82.58	100	60
80.79	100	65
79.16	100	70
77.68	100	75
76.32	100	80

Fuente: Creación propia

Cuadro 66. Precipitaciones periodo de retorno de 500 años		
Int_(mm/hr)	Per_(años)	Dur_(min)
195.05	500	5
161.31	500	10
144.35	500	15
133.41	500	20
125.49	500	25
119.38	500	30
114.44	500	35
110.33	500	40
106.83	500	45
103.79	500	50
101.11	500	55
98.73	500	60
96.59	500	65
94.65	500	70
92.87	500	75
91.25	500	80

Fuente: Creación propia

Apéndice 2. Curvas intensidad duración-frecuencia (IDF)

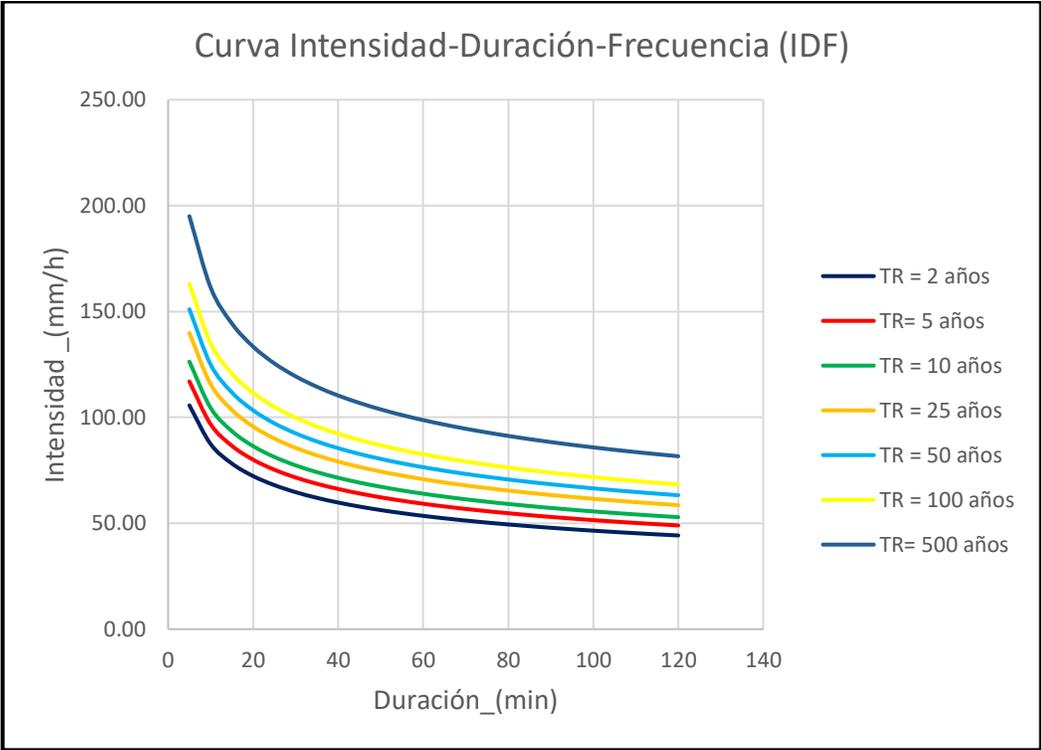


Figura 59. Curvas intensidad-duración- frecuencia para la estación meteorológica del instituto tecnológico de Costa Rica
Fuente: Creación propia

Apéndice 3. Precipitaciones método bloque alternativo

Cuadro 67. Precipitaciones bloque alternativo, periodo retorno 2 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alternativo (mm)
10	87.39	14.57	5.76	3.02
20	72.28	24.09	4.54	3.27
30	64.68	32.34	4.01	3.68
40	59.78	39.85	3.68	4.54
50	56.23	46.86	3.45	5.76
60	53.49	53.49	3.27	4.01
70	51.28	59.82	3.13	3.45
80	49.44	65.91	3.02	3.13

Fuente. Creación Propia

Cuadro 68. Precipitaciones bloque alternativo, periodo retorno 5 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alternativo (mm)
10	96.75	16.13	6.38	3.34
20	80.02	26.67	5.03	3.63
30	71.60	35.80	4.44	4.08
40	66.17	44.12	4.08	5.03
50	62.25	51.88	3.82	6.38
60	59.22	59.22	3.63	4.44
70	56.77	66.23	3.47	3.82
80	54.73	72.97	3.34	3.47

Fuente. Creación Propia

Cuadro 69. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 10 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	104.49	17.41	6.89	3.61
20	86.42	28.81	5.43	3.91
30	77.33	38.66	4.79	4.40
40	71.47	47.64	4.40	5.43
50	67.23	56.02	4.13	6.89
60	63.95	63.95	3.91	4.79
70	61.31	71.53	3.75	4.13
80	59.11	78.81	3.61	3.75

Fuente. Creación Propia

Cuadro 70. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 25 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	115.68	19.28	7.62	3.99
20	95.67	31.89	6.01	4.33
30	85.61	42.80	5.31	4.87
40	79.12	52.75	4.87	6.01
50	74.43	62.02	4.57	7.62
60	70.80	70.80	4.33	5.31
70	67.87	79.18	4.15	4.57
80	65.43	87.24	3.99	4.15

Fuente. Creación Propia

Cuadro 71. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 50 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	124.93	20.82	8.23	4.31
20	103.32	34.44	6.49	4.68
30	92.45	46.23	5.73	5.26
40	85.45	56.96	5.26	6.49
50	80.38	66.98	4.93	8.23
60	76.46	76.46	4.68	5.73
70	73.30	85.52	4.48	4.93
80	70.67	94.22	4.31	4.48

Fuente. Creación Propia

Cuadro 72. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 100 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	134.92	22.49	8.89	4.66
20	111.58	37.19	7.01	5.06
30	99.85	49.92	6.19	5.68
40	92.28	61.52	5.68	7.01
50	86.81	72.34	5.33	8.89
60	82.58	82.58	5.06	6.19
70	79.16	92.36	4.84	5.33
80	76.32	101.76	4.66	4.84

Fuente. Creación Propia

Cuadro 73. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 500 años				
Duración Tormenta (min)	Intensidad de la IDF (mm/h)	Precipitación por intervalo (mm)	Precipitación residual por intervalo (mm)	Bloque alterno (mm)
10	161.31	26.88	26.88	11.69
20	133.41	44.47	17.58	12.94
30	119.38	59.69	15.22	15.22
40	110.33	73.55	13.86	26.88
50	103.79	86.49	12.94	17.58
60	98.73	98.73	12.24	13.86
70	94.65	110.42	11.69	12.24
80	91.25	121.66	11.24	11.24

Fuente. Creación Propia

Apéndice 4. Hietogramas de diseño método bloque alterno

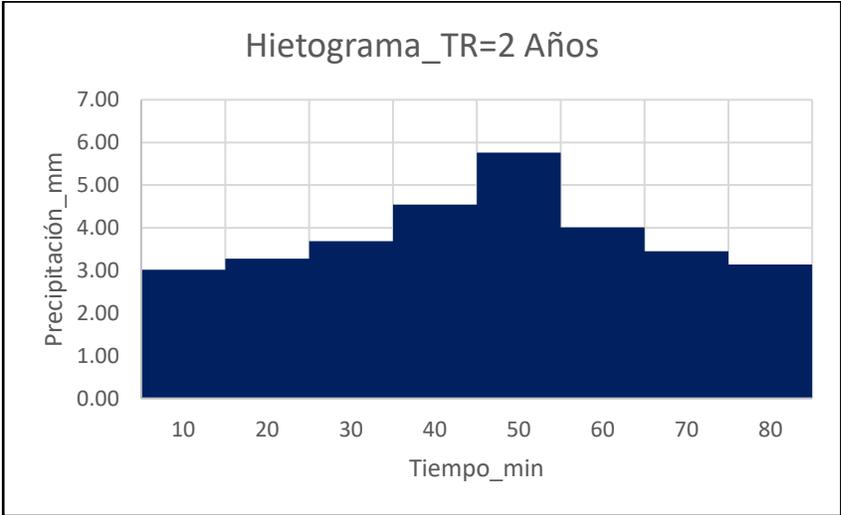


Figura 60. Hietograma periodo retorno 2 años
Fuente: Creación propia

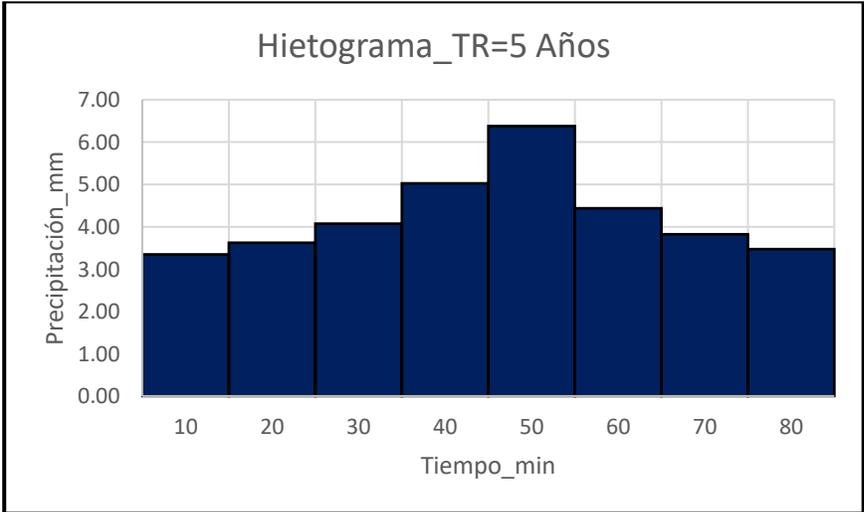


Figura 61. Hietograma periodo retorno 5 años
Fuente: Creación propia

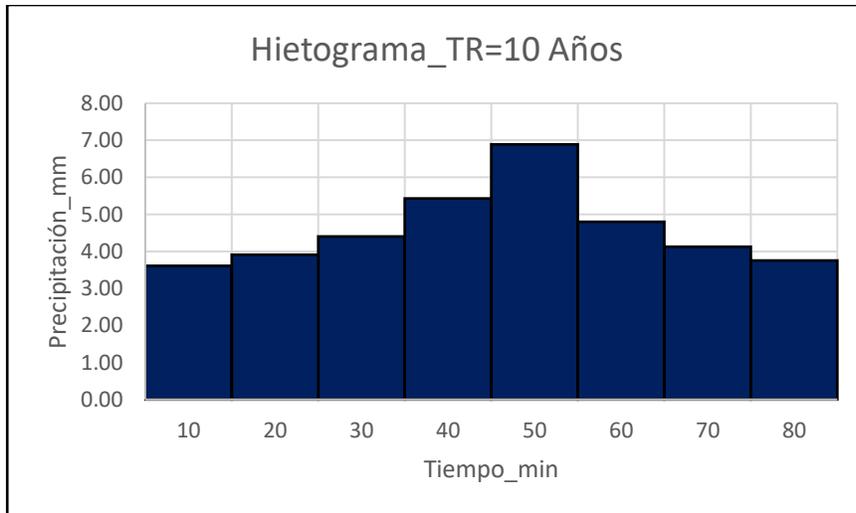


Figura 62. Hietograma periodo retorno 10 años
Fuente: Creación propia

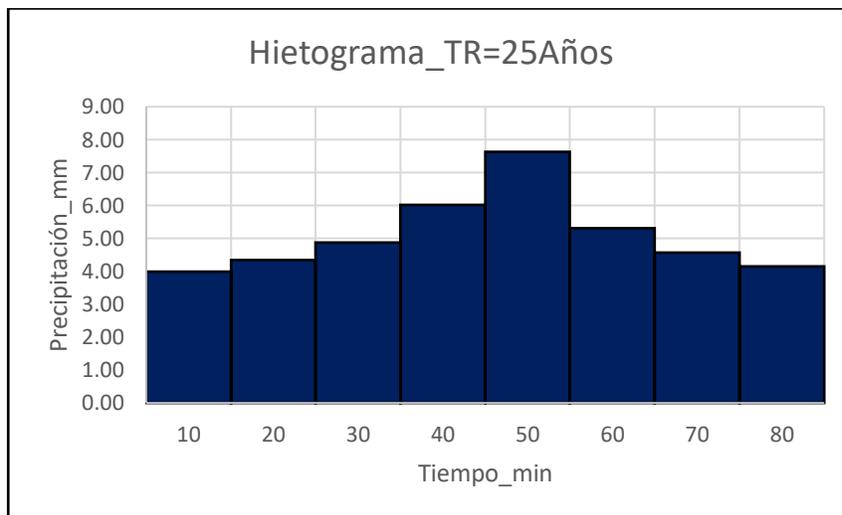


Figura 63. Hietograma periodo retorno 25 años
Fuente: Creación propia

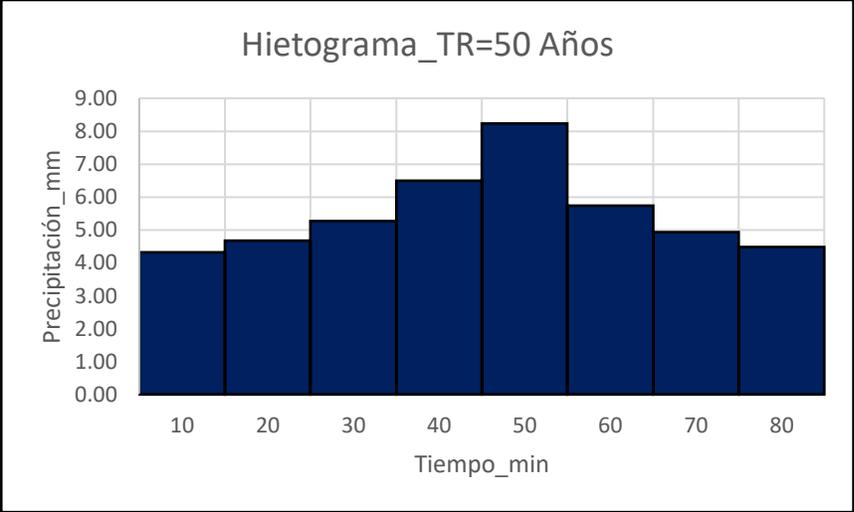


Figura 64. Hietograma periodo retorno 50 años
Fuente: Creación propia

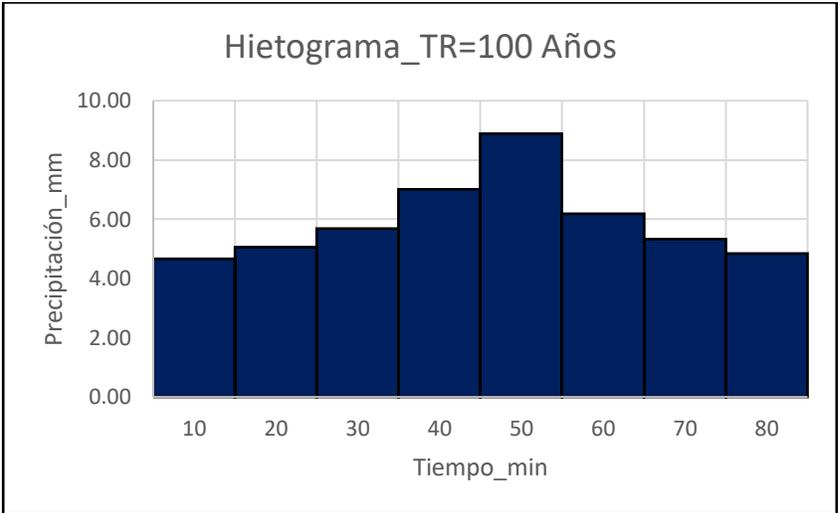


Figura 65. Hietograma periodo retorno 100 años
Fuente: Creación propia

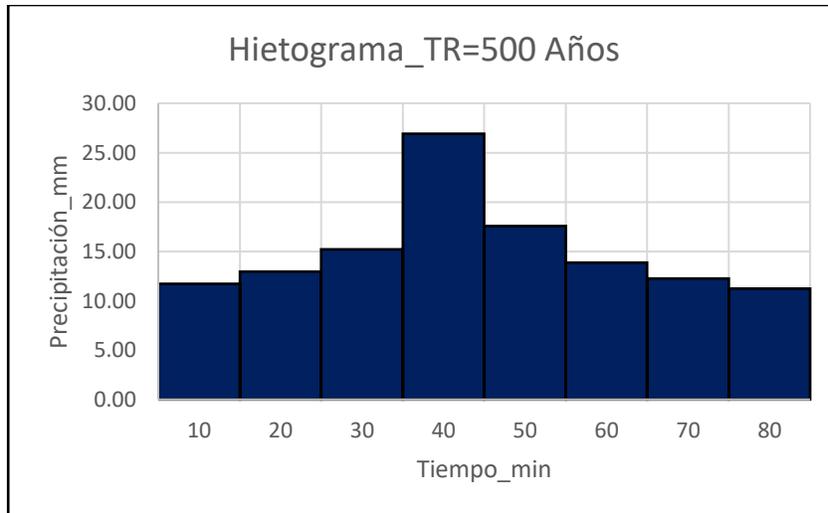


Figura 66. Hietograma periodo retorno 500 años
Fuente: Creación propia

Apéndice 5. Precipitaciones método de Huff

Cuadro 74. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 2 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	3.95	3.95
20	25%	20%	13.18	9.23
30	38%	50%	32.96	19.77
40	50%	74%	48.78	15.82
50	63%	87%	57.35	8.57
60	75%	94%	61.96	4.61
70	88%	97%	63.94	1.98
80	100%	100%	65.91	1.98

Fuente. Creación Propia

Cuadro 75. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 5 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	4.38	4.38
20	25%	20%	14.59	10.22
30	38%	50%	36.49	21.89
40	50%	74%	54.00	17.51
50	63%	87%	63.48	9.49
60	75%	94%	68.59	5.11
70	88%	97%	70.78	2.19
80	100%	100%	72.97	2.19

Fuente. Creación Propia

Cuadro 76. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 10 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	4.73	4.73
20	25%	20%	15.76	11.03
30	38%	50%	39.40	23.64
40	50%	74%	58.32	18.91
50	63%	87%	68.56	10.24
60	75%	94%	74.08	5.52
70	88%	97%	76.44	2.36
80	100%	100%	78.81	2.36

Fuente. Creación Propia

Cuadro 77. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 25 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	5.23	5.23
20	25%	20%	17.45	12.21
30	38%	50%	43.62	26.17
40	50%	74%	64.56	20.94
50	63%	87%	75.90	11.34
60	75%	94%	82.01	6.11
70	88%	97%	84.63	2.62
80	100%	100%	87.24	2.62

Fuente. Creación Propia

Cuadro 78. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 50 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	5.65	5.65
20	25%	20%	18.84	13.19
30	38%	50%	47.11	28.27
40	50%	74%	69.72	22.61
50	63%	87%	81.97	12.25
60	75%	94%	88.57	6.60
70	88%	97%	91.39	2.83
80	100%	100%	94.22	2.83

Fuente. Creación Propia

Cuadro 79. Precipitaciones bloque alterno, periodo retorno 100 años				
D_min	% Duración	% Precipitación	P_mm	P_AC_mm
10	13%	6%	6.11	6.11
20	25%	20%	20.35	14.25
30	38%	50%	50.88	30.53
40	50%	74%	75.30	24.42
50	63%	87%	88.53	13.23
60	75%	94%	95.65	7.12
70	88%	97%	98.70	3.05
80	100%	100%	101.76	3.05

Fuente. Creación Propia

Apéndice 6. Hietogramas de diseño método de Huff

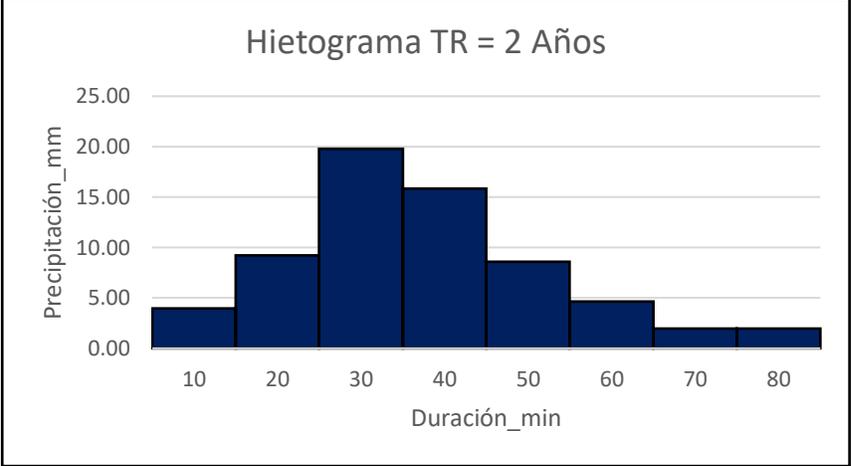


Figura 68. Hietograma periodo retorno 2 años
Fuente. Creación Propia

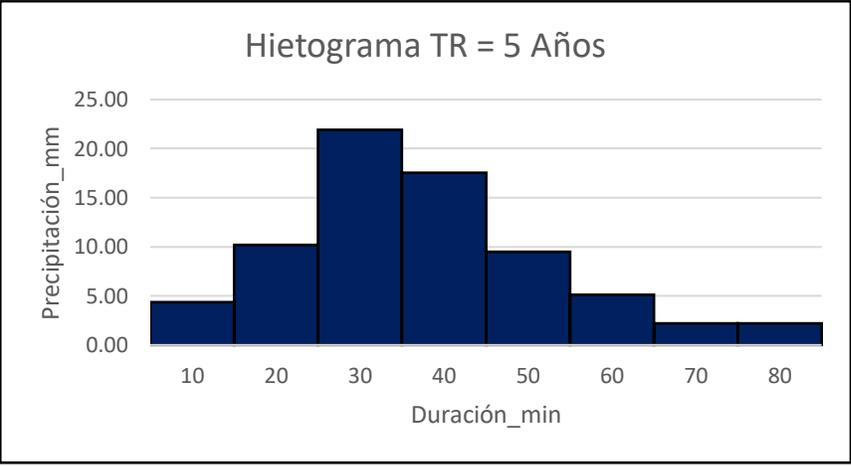


Figura 69. Hietograma periodo retorno 5 años
Fuente. Creación Propia

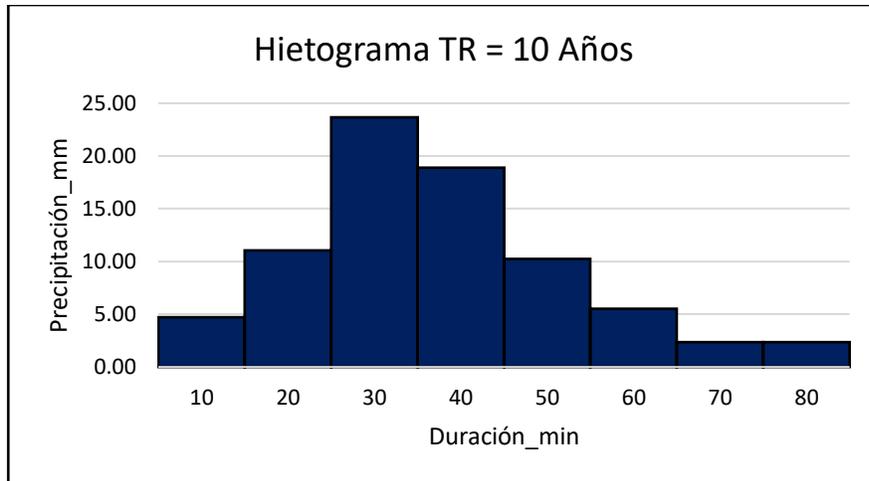


Figura 70. Hietograma periodo retorno 10 años
Fuente. Creación Propia

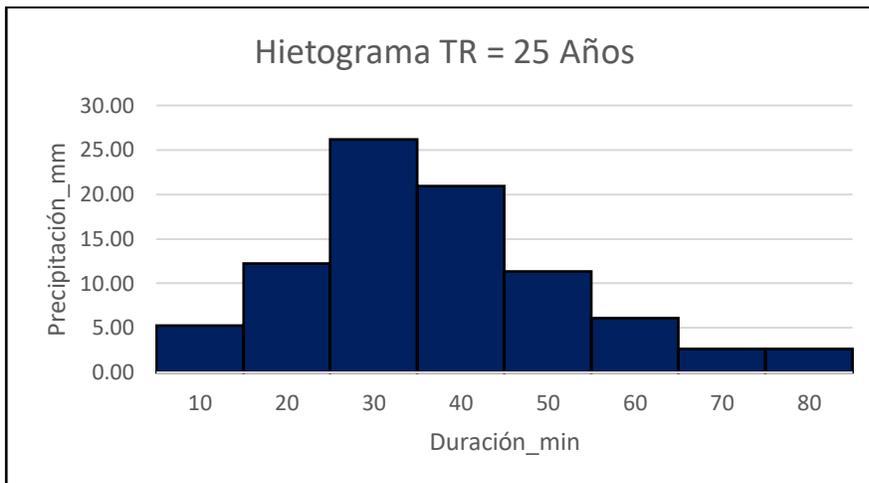


Figura 71. Hietograma periodo retorno 25 años
Fuente. Creación Propia

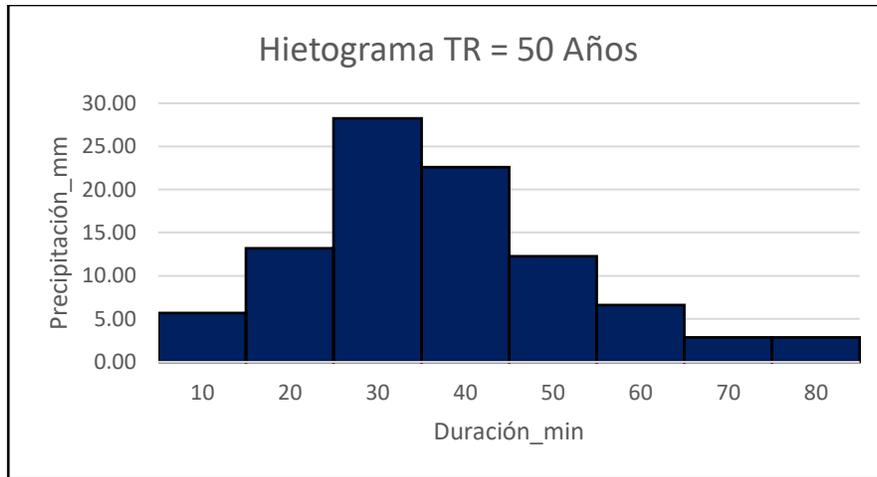


Figura 72. Hietograma periodo retorno 50 años
Fuente. Creación Propia

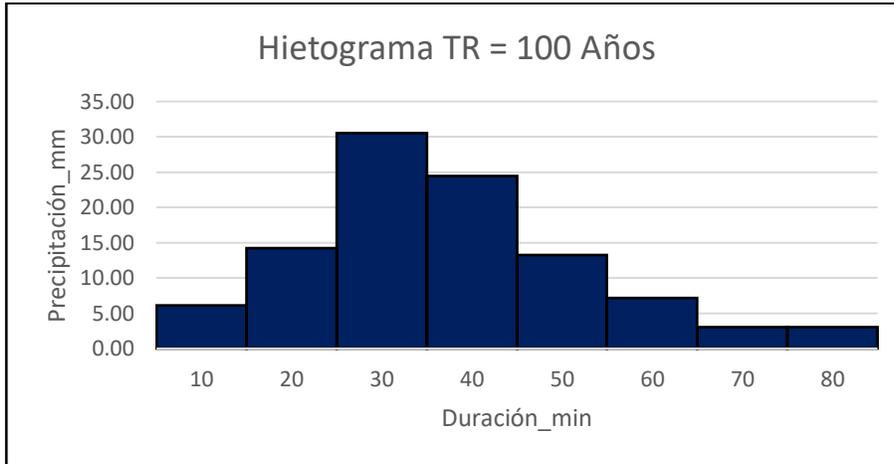


Figura 73. Hietograma periodo retorno 100 años
Fuente. Creación Propia

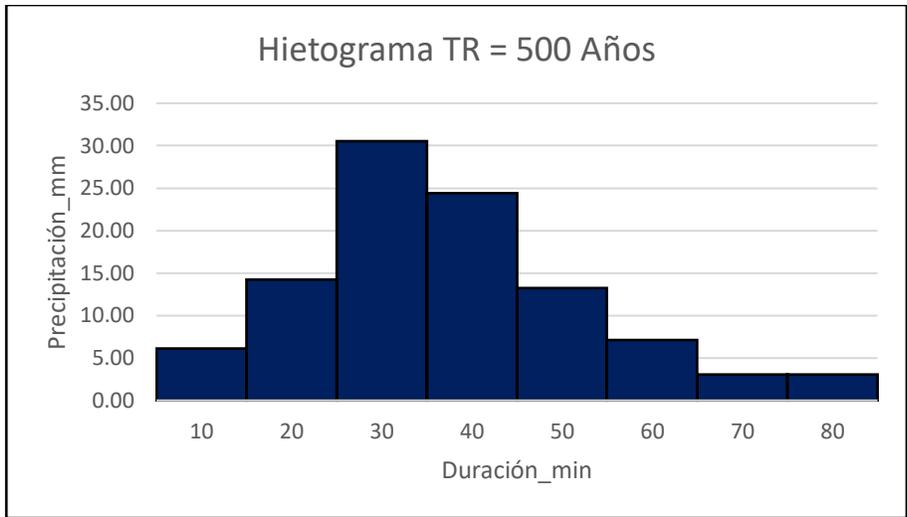


Figura 74. Hietograma periodo retorno 500 años
Fuente. Creación Propia

Apendice 7. Hidrogramas mediante método de bloque alterno

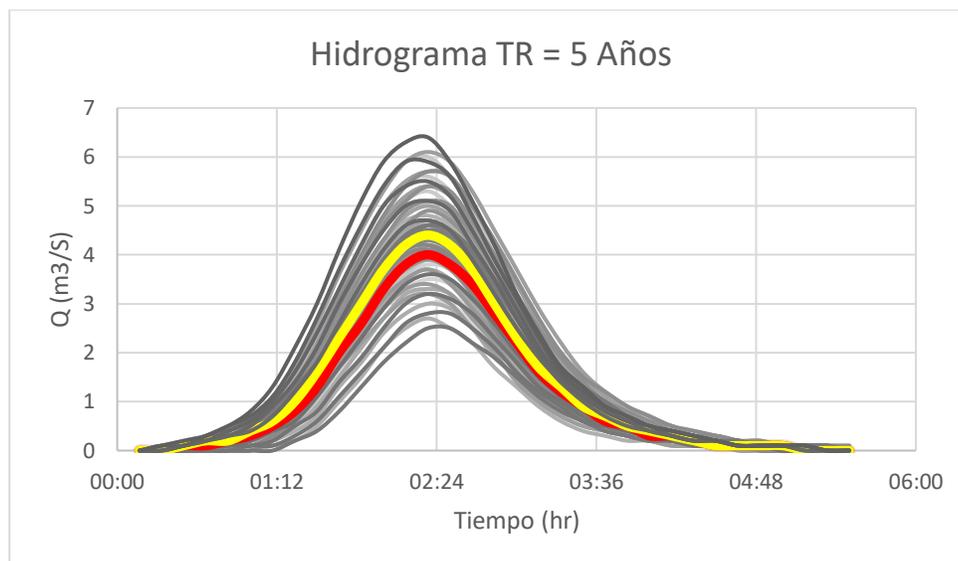


Figura 74. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 5 años, método de Bloque Alterno
Fuente: Creación Propia

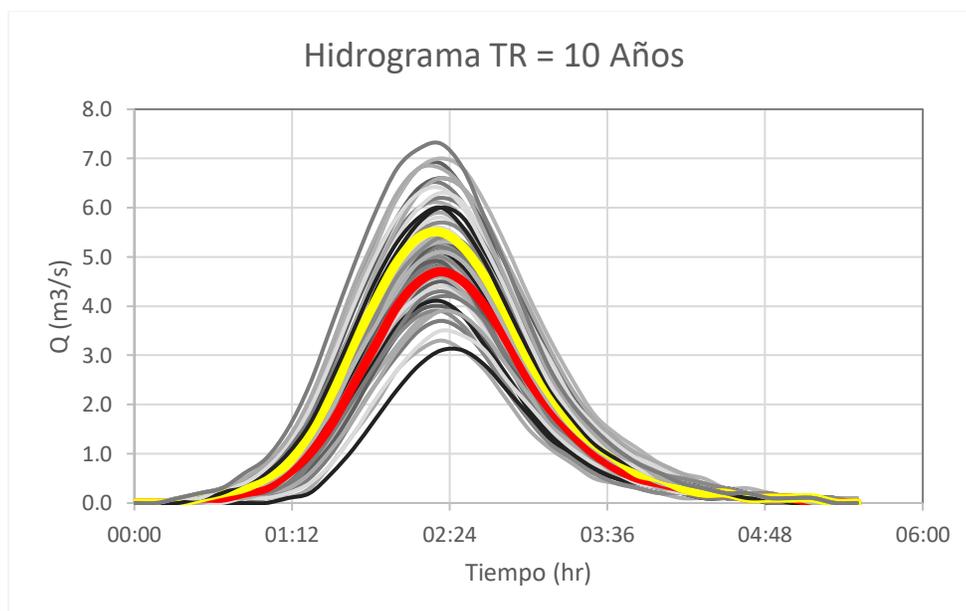


Figura 75. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 10 años, método de Bloque Alterno
Fuente: Creación Propia

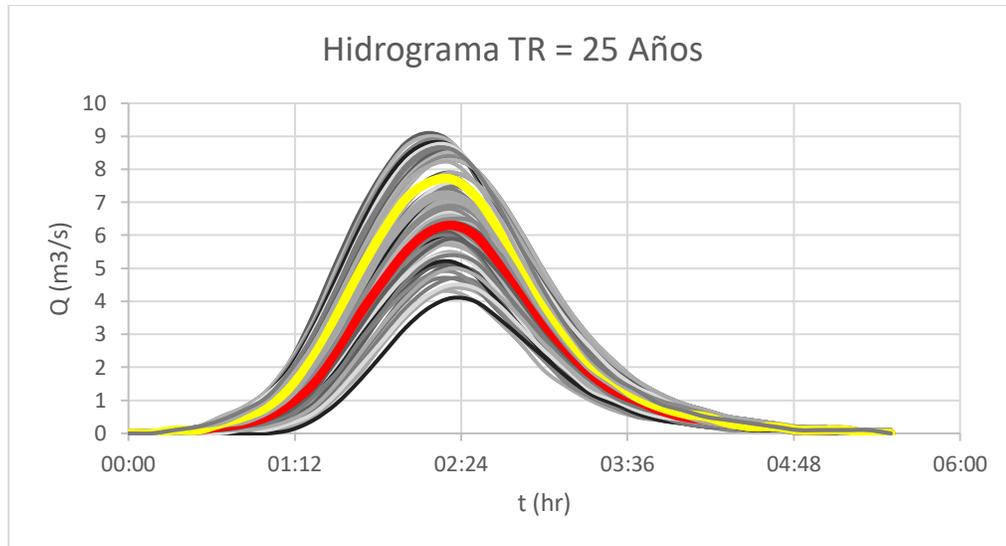


Figura 76. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 25 años, método de Bloque Alterno
Fuente: Creación Propia

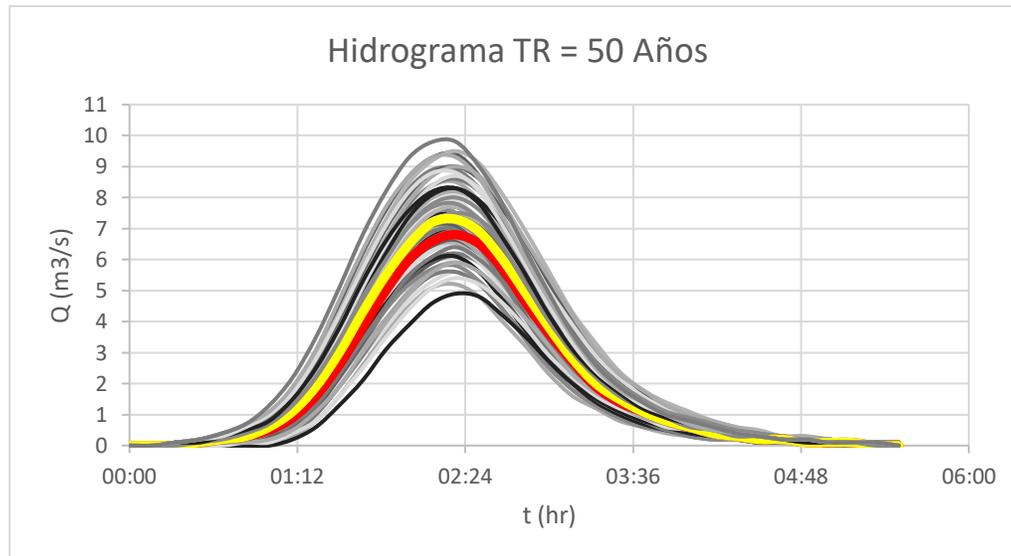


Figura 77. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 50 años, método de Bloque Alterno
Fuente: Creación Propia

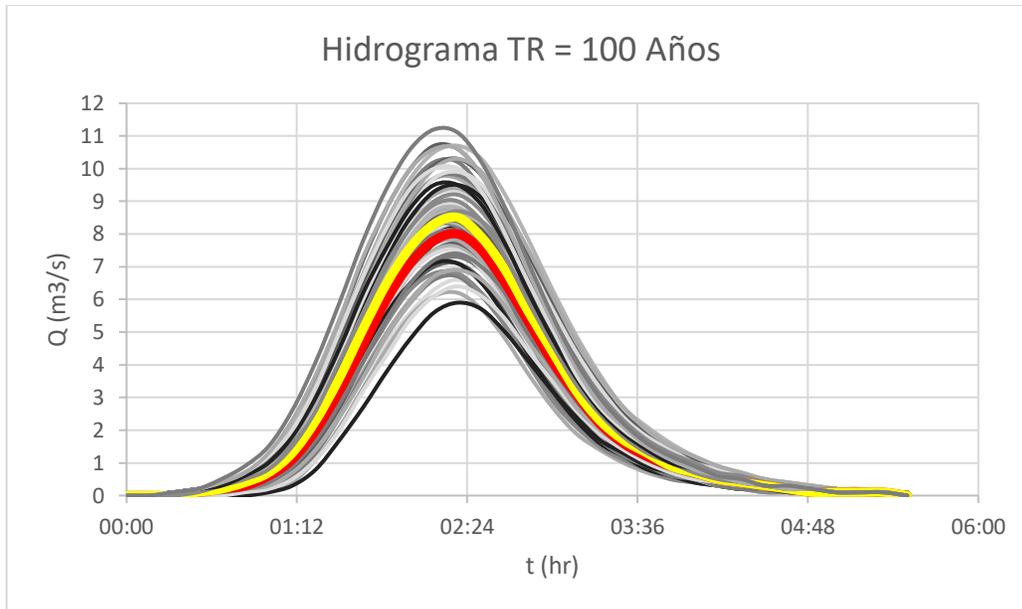


Figura 78. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 100 años, método de Bloque Alterno
Fuente: Creación Propia

Apéndice 8. Hidrogramas mediante método de Huff

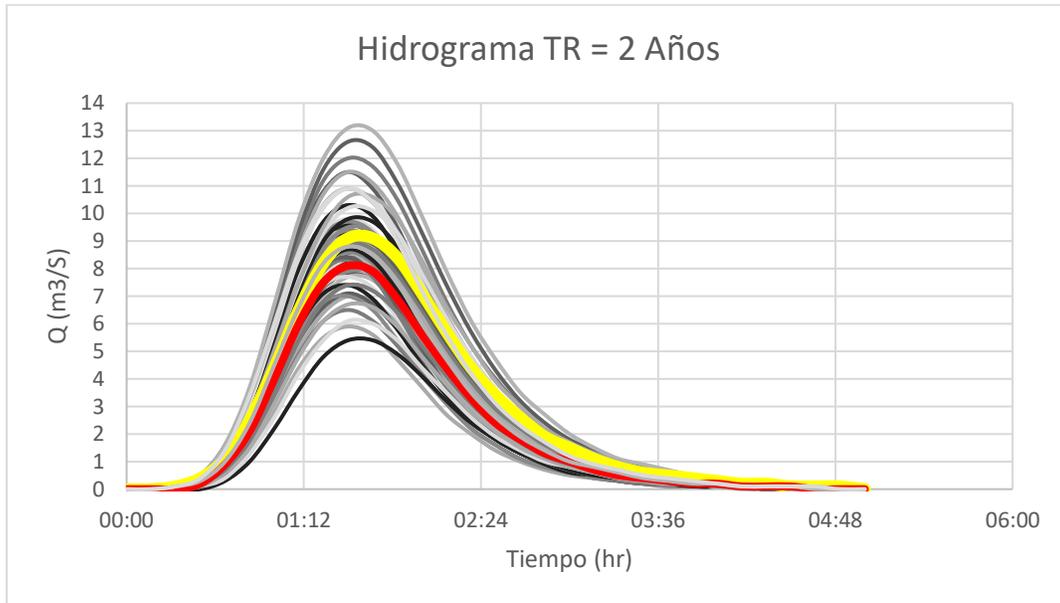


Figura 79. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 2 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

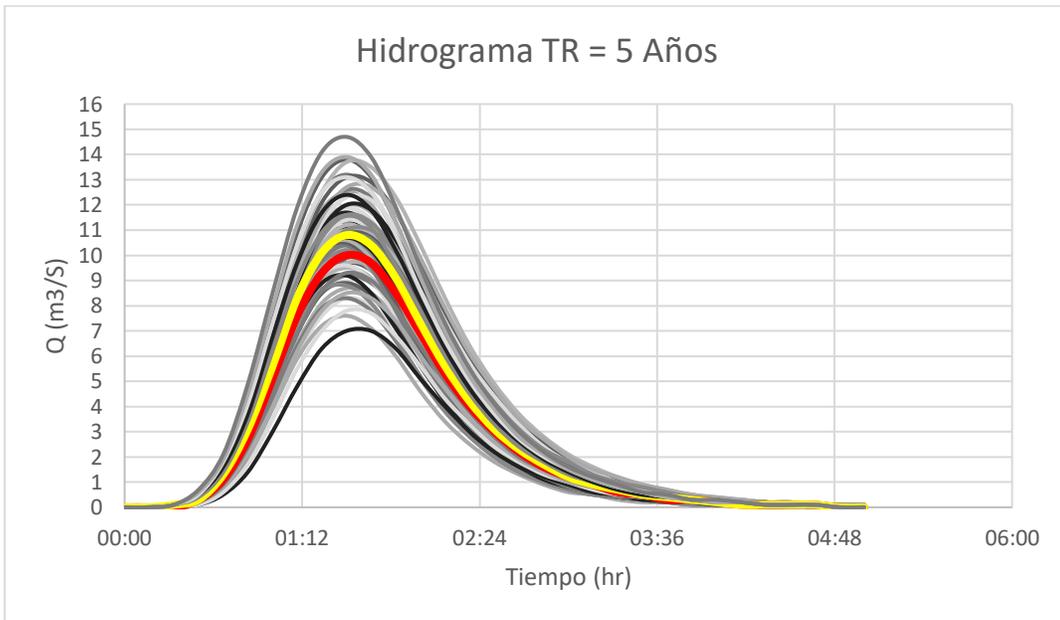


Figura 80. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 5 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

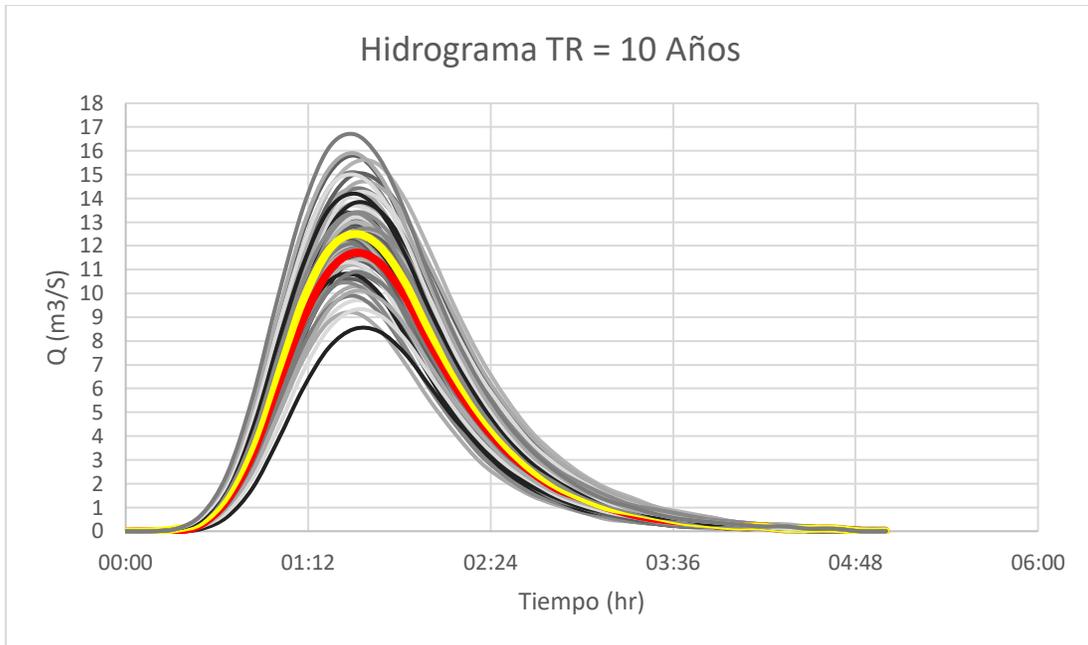


Figura 81. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 10 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

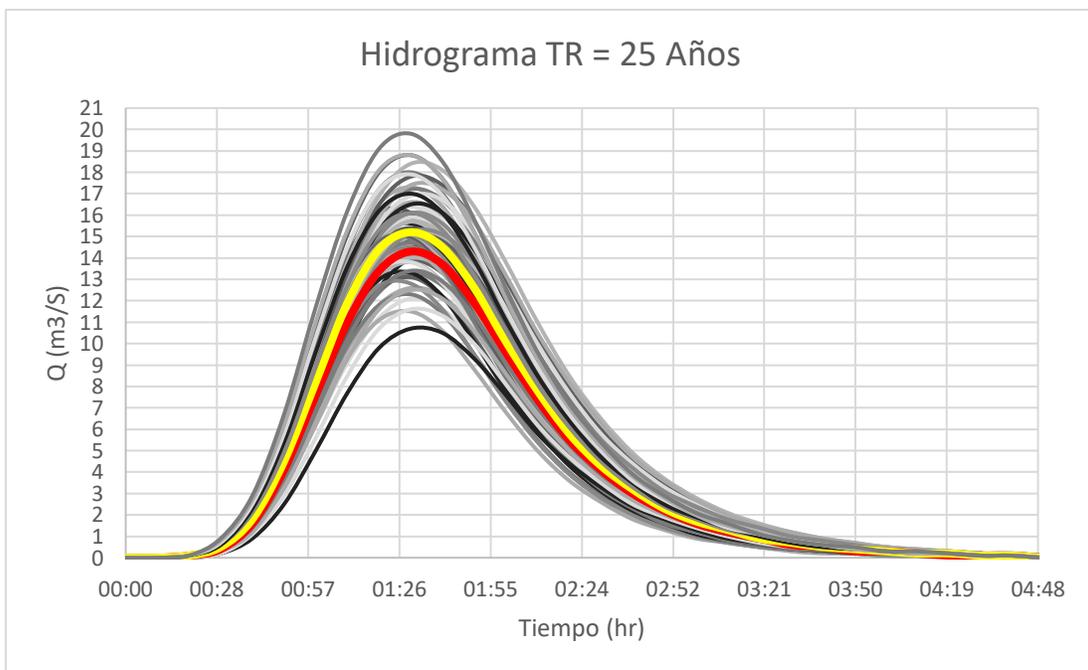


Figura 82. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 25 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

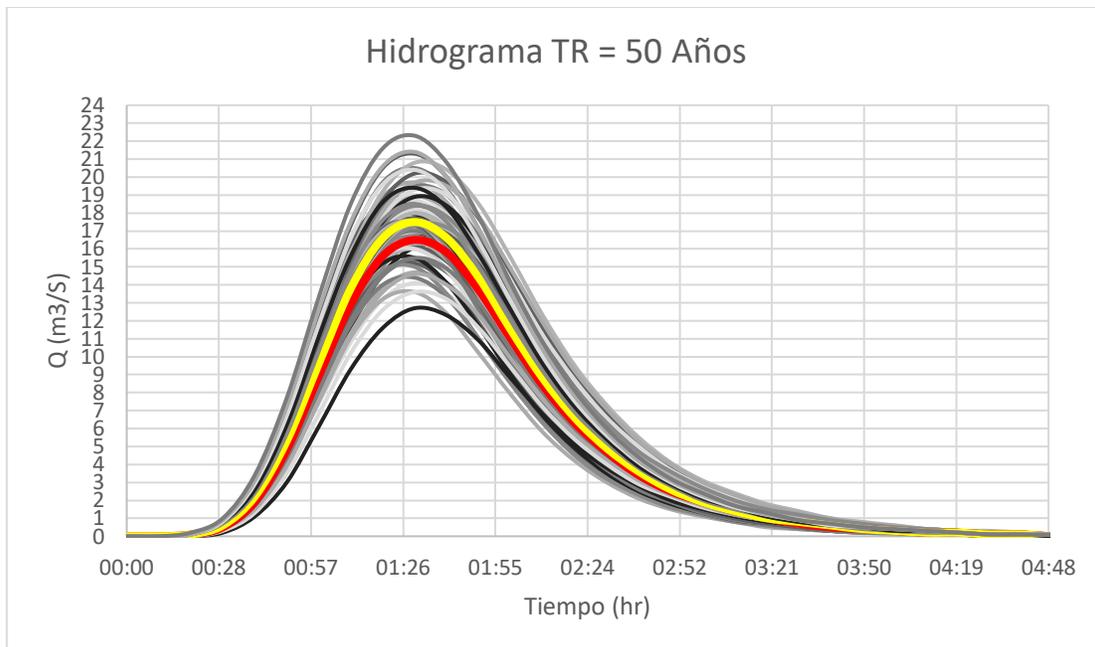


Figura 83. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 50 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

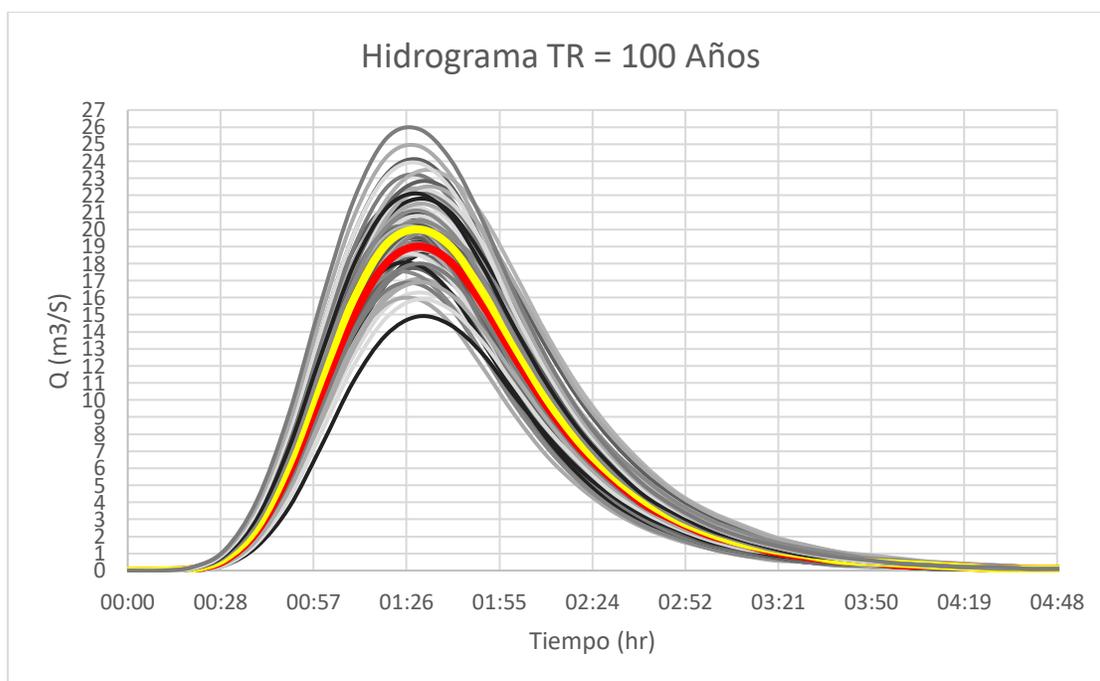


Figura 84. Rango de hidrogramas periodo de retorno de 100 años, método de Huff
Fuente: Creación Propia

Apendice 9. Curva Granulométrica del lecho de río

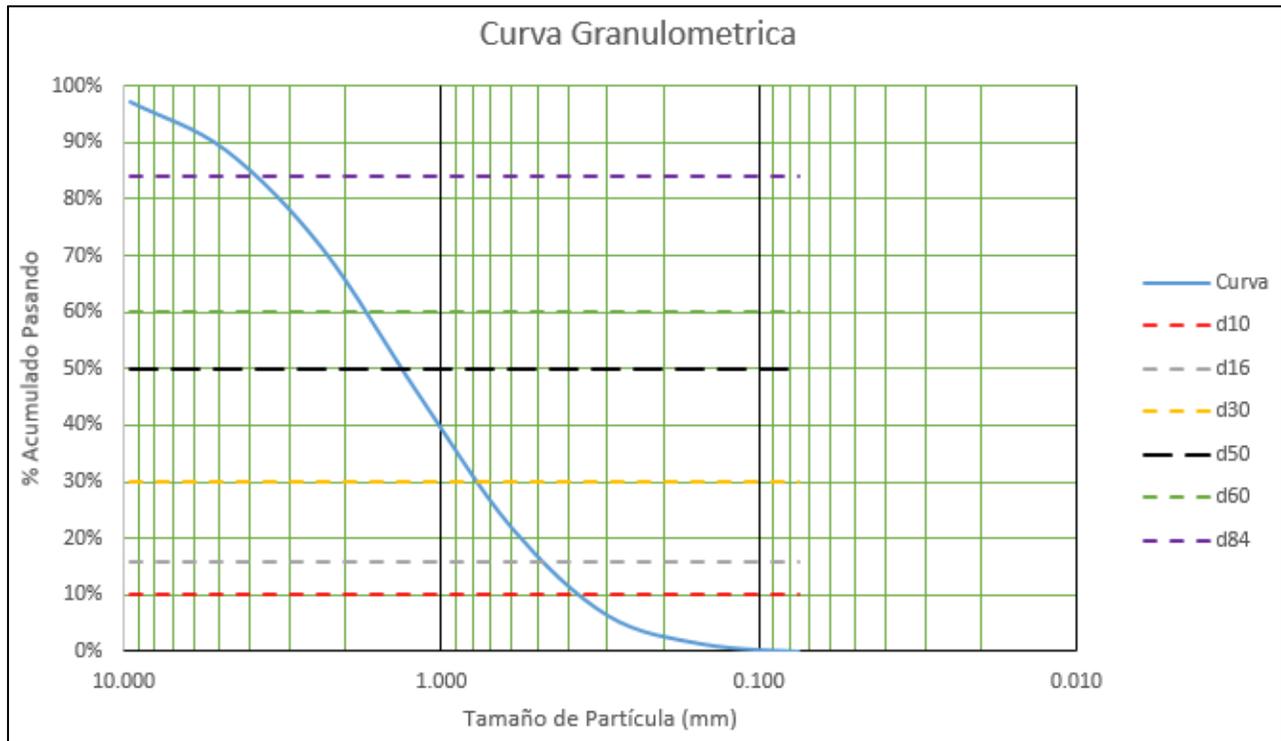


Figura 85. Curva Granulométrica del lecho de la quebrada el Molino
Fuente: Creación Propia

Apéndice 10. Análisis de sensibilidad para el caudal de diseño (Huff)

Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m ³ /s)					
Periodo de Retorno (Años)					
2	5	10	25	50	100
9.2	11.4	13.2	16.1	18.6	21.3
9.4	11.5	13.3	16.1	18.5	21.1
8.5	10.4	11.9	14.4	16.4	18.7
7	8.5	9.7	11.7	13.3	15.1
9	11.1	13.0	15.8	18.2	20.9
9.3	11.4	13.2	15.9	18.3	21.0
8.5	10.4	12.0	14.4	16.5	18.8
7.1	8.6	9.9	11.9	13.6	15.4
8.8	10.9	12.7	15.4	17.8	20.5
9.2	11.3	13.1	15.8	18.2	20.8
8.5	10.4	12.1	14.5	16.6	18.9
7.2	8.8	10.1	12.1	13.8	15.7
8.6	10.6	12.4	15.1	17.4	20.0
9	11.1	12.9	15.6	17.9	20.5
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.3	8.9	10.2	12.3	14.0	15.9
8.4	10.4	12.1	14.7	17.0	19.5
8.9	10.9	12.7	15.4	17.7	20.3
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.4	9.0	10.3	12.4	14.2	16.1
8.2	10.1	11.8	14.4	16.6	19.1
8.8	10.8	12.5	15.2	17.5	20.0
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.5	9.1	10.5	12.6	14.4	16.3
8	9.9	11.8	14.0	16.2	18.6
8.6	10.6	12.5	15.0	17.2	19.8
8.4	10.3	12.0	14.4	16.6	18.9
7.5	9.1	10.5	12.7	14.5	16.5
7.8	9.6	11.2	13.7	15.8	18.2
8.5	10.5	12.2	14.8	17.0	19.5
8.4	10.3	11.9	14.4	16.5	18.8

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
7.5	9.2	10.6	12.8	14.6	16.6
7.6	9.4	10.9	13.3	15.4	17.7
8.4	10.3	12.0	14.5	16.7	19.2
8.3	10.2	11.8	14.3	16.4	18.7
7.6	9.2	10.7	12.8	14.7	16.7
7.4	9.1	10.6	13.0	15.0	17.3
8.2	10.1	11.7	14.2	16.4	18.8
8.2	10.1	11.7	14.1	16.2	18.6
7.6	9.3	10.7	12.9	14.8	16.8
7.2	8.9	10.3	12.6	14.6	16.8
8.0	9.9	11.5	14.0	16.1	18.5
8.2	10.0	11.6	14.0	16.1	18.4
7.6	9.3	10.7	12.9	14.8	16.9
7.2	7.6	9.0	11.2	13.2	15.4
8.0	8.3	9.7	12.1	14.1	16.3
8.2	8.0	9.4	11.6	13.5	15.6
7.6	7.1	8.3	10.2	11.8	13.6
6.4	8.1	9.6	11.8	13.8	16.1
7.0	8.7	10.3	12.6	14.7	17.1
6.8	8.5	9.9	12.2	14.1	16.3
6.0	7.5	8.7	10.7	12.3	14.2
6.8	8.6	10.1	12.4	14.5	16.8
7.4	9.2	10.8	13.3	15.4	17.8
7.2	8.9	10.4	12.7	14.7	16.9
6.4	7.9	9.2	11.1	12.8	14.7
7.3	9.1	10.6	13.1	15.2	17.5
7.8	9.7	11.4	13.9	16.1	18.5
7.6	9.4	10.9	13.3	15.3	17.6
6.7	8.3	9.6	11.6	13.3	15.2
7.7	9.6	11.2	13.3	15.9	18.3
8.3	10.3	11.9	14.1	16.8	19.3
8.0	9.9	11.5	13.5	16.0	18.3
7.1	8.7	10.0	11.8	13.8	15.8
8.2	10.1	11.8	13.6	16.6	19.1
8.8	10.8	12.5	14.4	17.5	20.0
8.5	10.4	12.0	13.7	16.6	19.0
7.5	9.1	10.5	11.9	14.4	16.3

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
8.7	10.7	12.4	15.0	17.3	19.9
9.3	11.4	13.1	15.9	18.2	20.8
8.9	10.9	12.6	15.1	17.3	19.7
7.8	9.5	10.9	13.1	14.9	16.9
9.2	11.2	13.0	15.7	18.1	20.7
9.8	11.9	13.8	16.6	19.0	21.6
9.4	11.4	13.1	15.7	17.9	20.4
8.2	9.9	11.4	13.6	15.4	17.5
9.7	11.8	13.7	16.5	18.9	21.5
10.3	12.5	14.4	17.3	19.7	22.4
9.9	12.0	13.7	16.4	18.6	21.1
8.6	10.4	11.9	14.1	16.0	18.1
10.3	12.5	14.4	17.2	19.7	22.4
10.9	13.2	15.1	18.0	20.5	23.2
10.4	12.5	14.3	17.0	19.3	21.8
9.1	10.8	12.4	14.6	16.5	18.6
10.8	13.1	15.0	18.0	20.5	23.2
11.5	13.8	15.8	18.8	21.3	24.1
10.9	13.1	14.9	17.7	20.0	22.6
9.5	11.3	12.8	15.2	17.1	19.2
7.0	8.9	10.5	13.1	15.2	17.7
7.7	9.7	11.4	14.0	16.3	18.8
7.6	9.5	11.1	13.5	15.6	17.9
6.8	8.3	9.7	11.8	13.6	15.5
7.3	9.1	10.8	13.3	15.5	18.0
7.9	9.9	11.6	14.2	16.5	19.0
7.8	9.6	11.2	13.7	15.8	18.1
6.9	8.5	9.9	11.9	13.7	15.7
7.5	9.4	11.0	13.6	15.8	18.2
8.2	10.1	11.9	14.5	16.7	19.3
8.0	9.8	11.4	13.9	16.0	18.3
7.0	8.6	10.0	12.1	13.9	15.9
7.7	9.6	11.3	13.8	16.0	18.5
8.4	10.4	12.1	14.7	17.0	19.5
8.1	10.0	11.6	14.1	16.2	18.6
7.2	8.8	10.2	12.3	14.0	16.0
7.9	9.9	11.5	14.1	16.3	18.8

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
8.6	10.6	12.3	15.0	17.2	19.8
8.3	10.2	11.8	14.3	16.4	18.8
7.3	8.9	10.3	12.4	14.2	16.2
8.2	10.1	11.8	14.4	16.6	19.1
8.8	10.8	12.5	15.2	17.5	20.0
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.5	9.1	10.5	12.6	14.4	16.3
8.4	10.3	12.0	14.6	16.9	19.4
9.0	11.0	12.8	15.4	17.7	20.3
8.7	10.6	12.2	14.7	16.8	19.2
7.6	9.2	10.6	12.7	14.5	16.5
8.6	10.3	12.3	14.9	17.1	19.6
9.2	11.0	13.0	15.7	18.0	20.5
8.8	10.6	12.4	14.9	17.0	19.4
7.7	9.2	10.8	12.9	14.7	16.7
8.8	10.8	12.5	15.1	17.4	19.9
9.4	11.5	13.2	15.9	18.2	20.8
9.0	10.9	12.6	15.1	17.2	19.6
7.9	9.5	10.9	13.0	14.8	16.8
9.1	11.1	12.8	15.4	17.7	20.2
9.6	11.7	13.4	16.1	18.5	21.0
9.2	11.1	12.8	15.3	17.4	19.8
8.0	9.7	11.1	13.2	15.0	17.0
9.3	11.3	13.0	15.7	17.9	20.5
9.8	11.9	13.7	16.4	18.7	21.3
9.4	11.3	13.0	15.5	17.6	20.0
8.1	9.8	11.2	13.3	15.2	17.2
5.5	7.2	8.8	11.1	13.2	15.6
5.9	7.6	9.2	11.5	13.6	15.9
5.6	7.1	8.5	10.6	12.4	14.5
4.7	6.0	7.1	8.8	10.2	11.9
6.1	7.9	9.4	11.8	14.0	16.4
6.5	8.3	9.9	12.3	14.4	16.8
6.1	7.8	9.2	11.4	13.3	15.4
5.2	6.6	7.7	9.5	11.0	12.7
6.6	8.5	10.1	12.5	14.7	17.1
7.1	8.9	10.6	13.1	15.2	17.7

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
6.7	8.4	9.9	12.2	14.1	16.3
5.8	7.2	8.4	10.3	11.9	13.6
8.7	9.0	10.6	13.1	15.3	17.8
9.1	9.5	11.2	13.8	16.0	18.5
8.6	9.1	10.6	12.9	14.9	17.2
7.4	7.8	9.1	11.0	12.7	14.5
9.2	9.6	11.2	13.8	16.0	18.4
9.7	10.2	11.9	14.5	16.7	19.2
9.3	9.7	11.3	13.7	15.8	18.1
8.0	8.4	9.8	11.8	13.5	15.4
9.7	10.1	11.8	14.4	16.6	19.1
10.3	10.8	12.5	15.2	17.5	20.0
9.9	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
8.6	9.1	10.5	12.6	14.4	16.3
10.2	10.6	12.3	14.9	17.2	19.7
10.9	11.4	13.2	15.9	18.2	20.8
10.5	11.0	12.7	15.2	17.4	19.8
9.3	9.7	11.2	13.3	15.2	17.3
10.7	11.1	12.9	15.5	17.8	20.3
11.5	12.0	13.8	16.6	18.9	21.5
11.1	11.7	13.4	16.0	18.2	20.7
9.9	10.4	11.9	14.1	16.0	18.1
11.2	11.6	13.4	16.0	18.3	20.8
12.0	12.6	14.4	17.2	19.5	22.2
11.7	12.3	14.0	16.7	19.0	21.4
10.5	11.0	12.6	14.9	16.8	19.0
11.6	12.1	13.8	16.5	18.7	21.3
12.6	13.1	15.0	17.8	20.2	22.8
12.4	12.9	14.7	17.4	19.7	22.2
11.1	11.7	13.3	15.7	17.7	19.9
12.0	12.5	14.3	16.9	19.2	21.7
13.1	13.7	15.5	18.4	20.8	23.4
13.0	13.5	15.4	18.1	20.4	23.0
11.8	12.3	14.0	16.4	18.5	20.8
6.8	8.6	10.2	12.7	14.8	17.3
7.0	8.8	10.4	12.8	15.0	17.3
6.5	8.1	9.5	11.6	13.5	15.6

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
5.4	6.7	7.8	9.5	11.0	12.7
7.1	8.9	10.5	13.0	15.2	17.7
7.4	9.2	10.8	13.3	15.5	17.9
6.9	8.5	10.0	12.2	14.1	16.3
5.8	7.1	8.3	10.1	11.7	13.4
7.4	9.2	10.9	13.4	15.6	18.1
7.7	9.6	11.3	13.8	16.0	18.5
7.3	9.0	10.5	12.8	14.8	17.0
6.2	7.6	8.8	10.7	12.3	14.1
7.6	9.5	11.2	13.7	15.9	18.4
8.1	10.0	11.7	14.3	16.5	19.0
7.7	9.4	11.0	13.3	15.4	17.6
6.6	8.1	9.4	11.3	13.0	14.9
7.9	9.8	11.5	14.0	16.2	18.7
8.4	10.4	12.1	14.7	17.0	19.5
8.1	9.9	11.5	13.9	16.0	18.3
7.0	8.6	9.9	11.9	13.7	15.6
8.2	10.1	11.8	14.4	16.6	18.7
8.8	10.8	12.5	15.2	17.5	19.5
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	18.3
7.5	9.1	10.5	12.6	14.4	15.6
8.4	10.4	12.1	14.7	16.9	19.1
9.1	11.2	13.0	15.7	18.0	20.0
8.9	10.8	12.5	15.1	17.2	19.0
7.9	9.6	11.0	13.2	15.0	16.3
8.7	10.7	12.4	15.0	17.3	19.4
9.5	11.6	13.4	16.1	18.4	20.5
9.3	11.3	13.0	15.6	17.8	19.6
8.3	10.1	11.6	13.8	15.7	17.1
9.0	11.0	12.7	15.3	17.5	20.6
9.8	12.0	13.8	16.5	18.9	21.8
9.7	11.8	13.5	16.1	18.4	21.0
8.8	10.6	12.1	14.4	16.4	18.4
9.3	11.3	13.0	15.6	17.8	20.8
10.2	12.3	14.2	16.9	19.3	22.3
10.1	12.2	14.0	16.7	19.0	21.6
9.3	11.1	12.7	15.1	17.1	19.2

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
9.5	11.5	13.3	15.9	18.1	20.6
10.6	12.7	14.6	17.4	19.7	22.4
10.6	12.7	14.5	17.2	19.5	22.1
9.8	11.7	13.3	15.7	17.8	20.0
8.0	10.1	12.0	14.8	17.2	19.9
8.3	10.4	12.2	14.9	17.3	19.9
7.7	9.5	11.1	13.5	15.5	17.8
6.4	7.8	9.1	11.0	12.6	14.4
8.1	10.1	11.9	14.7	17.1	19.7
8.4	10.5	12.3	15.0	17.4	20.0
7.9	9.7	11.3	13.7	15.8	18.1
6.6	8.1	9.4	11.3	13.0	14.8
8.1	10.2	11.9	14.6	17.0	19.6
8.6	10.6	12.4	15.1	17.5	20.1
8.0	9.9	11.5	13.9	16.0	18.3
6.8	8.4	9.7	11.7	13.4	15.2
8.1	10.1	11.9	14.5	16.8	19.4
8.6	10.7	12.4	15.1	17.4	20.0
8.2	10.1	11.7	14.1	16.2	18.6
7.0	8.6	9.9	12.0	13.7	15.6
8.1	10.1	11.8	14.4	16.7	19.2
8.7	10.7	12.5	15.2	17.5	20.0
8.3	10.2	11.8	14.3	16.4	18.8
7.2	8.8	10.2	12.3	14.0	16.0
8.2	10.1	11.8	14.4	16.6	19.1
8.8	10.8	12.5	15.2	17.5	20.0
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.5	9.1	10.5	12.6	14.4	16.3
8.2	10.1	11.7	14.3	16.5	18.9
8.9	10.9	12.6	15.2	17.5	20.0
8.6	10.5	12.2	14.6	16.8	19.1
7.7	9.3	10.7	12.8	14.7	16.7
8.2	10.1	11.7	14.2	16.3	18.8
8.9	10.9	12.6	15.2	17.5	20.0
8.7	10.6	12.3	14.8	16.9	19.3
7.8	9.5	10.9	13.1	14.9	17.0
8.2	10.1	11.6	14.1	16.2	18.6

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
9.0	10.9	12.6	15.2	17.4	19.9
8.9	10.8	12.4	14.9	17.0	19.4
8.0	9.7	11.1	13.3	15.2	17.3
8.2	10.0	11.6	14.0	16.0	18.3
9.0	11.0	12.6	15.2	17.4	19.8
9.0	10.9	12.5	15.0	17.1	19.5
8.2	9.9	11.4	13.6	15.5	17.5
8.2	10.0	11.5	13.8	15.9	18.1
9.1	11.0	12.6	15.2	17.3	19.8
9.1	11.0	12.6	15.1	17.2	19.5
8.4	10.1	11.6	13.8	15.7	17.8
4.8	6.3	7.7	9.8	11.6	13.8
5.4	7.0	8.5	10.7	12.7	14.9
5.4	7.0	8.4	10.5	12.3	14.4
4.9	6.3	7.5	9.3	10.9	12.7
5.4	7.0	8.5	10.7	12.6	14.8
6.1	7.8	9.3	11.6	13.6	15.9
6.0	7.7	9.1	11.3	13.2	15.3
5.4	6.8	8.1	10.0	11.6	13.4
6.1	7.8	9.3	11.6	13.6	15.9
6.7	8.5	10.1	12.5	14.6	16.9
6.6	8.3	9.8	12.1	14.0	16.2
5.9	7.4	8.7	10.6	12.3	14.1
6.8	8.6	10.1	12.5	14.6	17.0
7.4	9.3	10.9	13.4	15.5	18.0
7.2	9.0	10.5	12.9	14.9	17.2
6.4	7.9	9.3	11.3	13.0	14.9
7.5	9.3	10.9	13.4	15.6	18.0
8.1	10.0	11.7	14.3	16.5	19.0
7.9	9.7	11.3	13.7	15.8	18.1
6.9	8.5	9.9	11.9	13.7	15.6
8.2	10.1	11.8	14.4	16.6	19.1
8.8	10.8	12.5	15.2	17.5	20.0
8.5	10.4	12.0	14.5	16.6	19.0
7.5	9.1	10.5	12.6	14.4	16.3
8.9	10.9	12.6	15.3	17.6	20.1
9.5	11.6	13.4	16.1	18.5	21.1

(Continuación) Cuadro 80. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
9.1	11.1	12.7	15.3	17.5	19.9
8.0	9.6	11.1	13.2	15.0	17.1
9.6	11.7	13.5	16.2	18.6	21.2
10.2	12.4	14.2	17.0	19.4	22.1
9.7	11.8	13.5	16.1	18.3	20.8
8.5	10.2	11.7	13.9	15.7	17.8
10.3	12.5	14.4	17.2	19.6	23.1
10.9	13.1	15.0	17.9	20.4	23.9
10.4	12.5	14.2	16.9	19.2	22.4
9.0	10.8	12.3	14.5	16.4	19.1
10.3	13.3	15.2	18.1	20.6	24.2
10.9	13.9	15.9	18.8	21.4	24.9
10.4	13.2	15.0	17.7	20.0	23.2
9.0	11.3	12.9	15.2	17.1	19.8
11.8	14.1	16.1	19.1	21.6	25.3
12.4	14.7	16.7	19.8	22.3	25.9
11.7	13.9	15.7	18.5	20.8	24.1
10.1	11.9	13.5	15.8	17.8	20.5

Apéndice 11. Análisis de sensibilidad para el caudal de diseño (Bloque Alterno)

Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m ³ /s)					
Periodo de Retorno (Años)					
2	5	10	25	50	100
4.5	4.5	5.3	9.1	7.7	8.9
4.5	4.5	5.3	8.8	7.5	8.7
4.5	4.1	4.8	7.8	6.8	7.8
4.1	3.5	4.0	6.4	5.6	6.5
3.5	4.4	5.3	9.0	7.6	8.8
4.4	4.5	5.3	8.8	7.5	8.7
4.5	4.2	4.9	7.9	6.8	7.9
4.2	3.5	4.1	6.5	5.7	6.6
3.5	4.4	5.2	8.9	7.5	8.7
4.4	4.5	5.3	8.7	7.5	8.7
4.5	4.2	4.9	7.9	6.9	7.9
4.2	3.6	4.1	6.6	5.8	6.7
3.6	4.3	5.1	8.8	7.4	8.6
4.3	4.4	5.2	8.7	7.4	8.6
4.4	4.2	4.9	7.9	6.9	7.9
4.2	3.6	4.2	6.7	5.9	6.8
3.6	4.2	5.0	8.7	7.3	8.5
4.2	4.4	5.2	8.7	7.4	8.5
4.4	4.2	4.9	8.0	6.9	7.9
4.2	3.6	4.2	6.8	6.0	6.8
3.6	4.2	4.9	8.6	7.2	8.3
4.2	4.4	5.1	8.6	7.3	8.5
4.4	4.2	4.9	8.0	6.9	7.9
4.2	3.7	4.3	6.9	6.0	6.9
3.7	4.1	4.9	8.5	7.1	8.2
4.1	4.3	5.1	8.6	7.3	8.4
4.3	4.2	4.9	8.0	6.9	8.0
4.2	3.7	4.3	7.0	6.1	7.0
3.7	4.0	4.8	8.4	7.0	8.1
4.0	4.3	5.0	8.5	7.2	8.3
4.3	4.1	4.9	8.0	6.9	8.0

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
4.1	3.7	4.3	7.0	6.1	7.0
3.7	4.0	4.7	8.3	6.8	8.0
4.0	4.2	5.0	8.5	7.1	8.3
4.2	4.1	4.8	8.0	6.9	7.9
4.1	3.7	4.4	7.1	6.1	7.1
3.7	3.9	4.6	8.2	6.7	7.9
3.9	4.2	4.9	8.4	7.1	8.2
4.2	4.1	4.8	8.0	6.9	7.9
4.1	3.7	4.4	7.1	6.2	7.1
3.7	3.8	4.5	8.1	6.6	7.7
3.8	4.1	4.9	8.3	7.0	8.1
4.1	4.1	4.8	8.0	6.8	7.9
4.1	3.7	4.4	7.2	6.2	7.1
3.7	2.8	3.5	3.8	5.3	6.3
2.8	3.0	3.7	4.1	5.6	6.6
3.0	3.0	3.6	4.0	5.3	6.2
3.0	2.6	3.2	3.5	4.7	5.5
2.6	3.1	3.7	4.1	5.7	6.7
3.1	3.3	3.9	4.4	5.9	6.9
3.3	3.2	3.8	4.3	5.6	6.6
3.2	2.8	3.4	3.8	4.9	5.8
2.8	3.3	4.0	4.4	6.0	7.1
3.3	3.5	4.2	4.7	6.2	7.3
3.5	3.4	4.1	4.6	5.9	6.9
3.4	3.0	3.6	4.0	5.2	6.0
3.0	3.6	4.3	4.8	6.4	7.5
3.6	3.8	4.5	5.1	6.6	7.7
3.8	3.7	4.3	4.9	6.2	7.2
3.7	3.2	3.8	4.3	5.5	6.3
3.2	3.9	4.6	5.2	6.8	7.9
3.9	4.1	4.8	5.4	7.0	8.1
4.1	3.9	4.6	5.2	6.6	7.6
3.9	3.4	4.0	4.6	5.7	6.6
3.4	4.2	4.9	5.5	7.2	8.3
4.2	4.4	5.1	5.8	7.3	8.5
4.4	4.2	4.9	5.5	6.9	7.9
4.2	3.7	4.3	4.9	6.0	6.9

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
3.7	4.5	5.3	5.9	7.6	8.8
4.5	4.6	5.5	6.2	7.7	8.9
4.6	4.4	5.2	5.9	7.2	8.3
4.4	3.9	4.5	5.1	6.3	7.2
3.9	4.8	5.6	6.4	8.0	9.2
4.8	5.0	5.8	6.6	8.1	9.3
5.0	4.7	5.5	6.2	7.6	8.7
4.7	4.1	4.8	5.4	6.6	7.5
4.1	5.1	6.0	6.8	8.4	9.7
5.1	5.3	6.1	7.0	8.5	9.7
5.3	5.0	5.8	6.6	7.9	9.1
5.0	4.4	5.0	5.7	6.9	7.8
4.4	5.5	6.4	7.2	8.9	10.2
5.5	5.6	6.5	7.4	8.9	10.2
5.6	5.3	6.1	6.9	8.3	9.4
5.3	4.6	5.3	6.0	7.2	8.2
4.6	5.9	6.8	7.7	9.3	10.7
5.9	6.0	6.9	7.8	9.4	10.6
6.0	5.6	6.4	7.3	8.7	9.8
5.6	4.9	5.6	6.3	7.5	8.5
4.9	3.6	4.4	5.5	6.6	7.7
3.6	3.9	4.6	5.8	6.8	7.9
3.9	3.7	4.5	5.5	6.4	7.5
3.7	3.3	3.9	4.9	5.6	6.5
3.3	3.7	4.5	5.7	6.7	7.8
3.7	4.0	4.7	5.9	6.9	8.0
4.0	3.8	4.5	5.6	6.5	7.6
3.8	3.4	4.0	4.9	5.7	6.6
3.4	3.8	4.6	5.8	6.8	8.0
3.8	4.1	4.8	6.0	7.0	8.2
4.1	3.9	4.6	5.7	6.6	7.7
3.9	3.5	4.1	5.0	5.8	6.7
3.5	3.9	4.7	5.9	6.9	8.1
3.9	4.2	4.9	6.1	7.1	8.3
4.2	4.0	4.7	5.8	6.7	7.8
4.0	3.5	4.1	5.1	5.9	6.8
3.5	4.1	4.8	6.0	7.0	8.2

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
4.1	4.3	5.0	6.2	7.2	8.4
4.3	4.1	4.8	5.9	6.8	7.9
4.1	3.6	4.2	5.1	5.9	6.8
3.6	4.2	4.9	6.1	7.2	8.3
4.2	4.4	5.1	6.3	7.3	8.5
4.4	4.2	4.9	6.0	6.9	7.9
4.2	3.7	4.3	5.2	6.0	6.9
3.7	4.3	5.1	6.3	7.3	8.5
4.3	4.4	5.2	6.4	7.4	8.6
4.4	4.2	5.0	6.0	7.0	8.0
4.2	3.7	4.3	5.3	6.1	7.0
3.7	4.4	5.2	6.4	7.3	8.6
4.4	4.5	5.3	6.5	7.4	8.7
4.5	4.3	5.0	6.1	7.0	8.1
4.3	3.8	4.4	5.4	6.1	7.1
3.8	4.5	5.3	6.5	7.5	8.7
4.5	4.6	5.4	6.6	7.7	8.8
4.6	4.4	5.1	6.2	7.2	8.2
4.4	3.9	4.5	5.4	6.2	7.1
3.9	4.6	5.4	6.6	7.7	8.8
4.6	4.7	5.5	6.7	7.8	8.9
4.7	4.5	5.2	6.3	7.3	8.3
4.5	3.9	4.6	5.5	6.3	7.2
3.9	4.7	5.5	6.7	7.8	9.0
4.7	4.8	5.6	6.8	7.9	9.0
4.8	4.6	5.3	6.4	7.3	8.4
4.6	4.0	4.6	5.6	6.4	7.3
4.0	2.5	3.1	4.2	5.1	6.1
2.5	2.7	3.3	4.3	5.2	6.2
2.7	2.5	3.1	4.0	4.8	5.7
2.5	2.2	2.7	3.4	4.0	4.8
2.2	2.8	3.5	4.6	5.5	6.6
2.8	3.0	3.7	4.7	5.6	6.7
3.0	2.9	3.5	4.4	5.2	6.1
2.9	2.5	3.0	3.7	4.4	5.2
2.5	3.2	3.9	5.0	5.9	7.0
3.2	3.3	4.0	5.1	6.1	7.1

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)

3.3	3.2	3.8	4.8	5.6	6.6
3.2	2.7	3.3	4.1	4.8	5.6
2.7	3.5	4.2	5.3	6.3	7.5
3.5	3.7	4.4	5.5	6.5	7.6
3.7	3.5	4.2	5.2	6.0	7.0
3.5	3.0	3.6	4.5	5.2	6.0
3.0	3.8	4.6	5.7	6.7	7.9
3.8	4.0	4.8	5.9	6.9	8.0
4.0	3.8	4.5	5.6	6.5	7.5
3.8	3.3	3.9	4.8	5.6	6.5
3.3	4.2	4.9	6.1	7.2	8.3
4.2	4.4	5.1	6.3	7.3	8.5
4.4	4.2	4.9	6.0	6.9	7.9
4.2	3.7	4.3	5.2	6.0	6.9
3.7	4.5	5.3	6.5	7.6	8.8
4.5	4.7	5.5	6.7	7.8	8.9
4.7	4.5	5.2	6.4	7.3	8.4
4.5	4.0	4.6	5.6	6.4	7.4
4.0	4.8	5.7	6.9	8.0	9.2
4.8	5.0	5.9	7.1	8.2	9.4
5.0	4.8	5.6	6.8	7.8	8.9
4.8	4.3	5.0	6.0	6.8	7.8
4.3	5.2	6.0	7.3	8.4	9.7
5.2	5.4	6.2	7.5	8.6	9.8
5.4	5.2	6.0	7.2	8.2	9.3
5.2	4.6	5.3	6.4	7.3	8.3
4.6	5.5	6.4	7.7	8.8	10.1
5.5	5.7	6.6	7.9	9.0	10.3
5.7	5.6	6.4	7.6	8.6	9.8
5.6	5.0	5.7	6.8	7.7	8.7
5.0	5.9	6.8	8.1	9.2	10.5
5.9	6.1	7.0	8.3	9.5	10.7
6.1	5.9	6.8	8.0	9.1	10.3
5.9	5.3	6.1	7.2	8.1	9.2
5.3	3.1	3.8	4.8	5.7	6.8
3.1	3.2	3.9	4.9	5.8	6.8
3.2	3.0	3.6	4.5	5.3	6.2

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)

3.0	2.5	3.0	3.8	4.4	5.2
2.5	3.3	4.0	5.1	6.0	7.1
3.3	3.4	4.1	5.2	6.1	7.1
3.4	3.2	3.8	4.8	5.6	6.5
3.2	2.7	3.2	4.0	4.7	5.5
2.7	3.5	4.2	5.3	6.3	7.4
3.5	3.7	4.4	5.4	6.4	7.5
3.7	3.4	4.1	5.1	5.9	6.9
3.4	2.9	3.5	4.3	5.0	5.8
2.9	3.7	4.5	5.6	6.6	7.7
3.7	3.9	4.6	5.7	6.7	7.8
3.9	3.7	4.3	5.4	6.2	7.2
3.7	3.2	3.7	4.6	5.3	6.2
3.2	3.9	4.7	5.9	6.9	8.0
3.9	4.1	4.9	6.0	7.0	8.1
4.1	3.9	4.6	5.7	6.6	7.6
3.9	3.4	4.0	4.9	5.7	6.5
3.4	4.2	4.9	6.1	7.2	8.3
4.2	4.4	5.1	6.3	7.3	8.5
4.4	4.2	4.9	6.0	6.9	7.9
4.2	3.7	4.3	5.2	6.0	6.9
3.7	4.4	5.2	6.4	7.5	8.7
4.4	4.6	5.4	6.6	7.7	8.8
4.6	4.4	5.2	6.3	7.2	8.3
4.4	3.9	4.6	5.5	6.4	7.3
3.9	4.6	5.5	6.7	7.8	9.0
4.6	4.9	5.7	6.9	8.0	9.2
4.9	4.7	5.5	6.6	7.6	8.7
4.7	4.2	4.8	5.8	6.7	7.7
4.2	4.9	5.7	7.0	8.1	9.3
4.9	5.1	6.0	7.2	8.3	9.5
5.1	5.0	5.8	6.9	7.9	9.1
5.0	4.4	5.1	6.2	7.1	8.0
4.4	5.1	6.0	7.3	8.4	9.7
5.1	5.4	6.3	7.6	8.7	9.9
5.4	5.3	6.1	7.3	8.3	9.5
5.3	4.7	5.4	6.5	7.4	8.4

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
4.7	5.4	6.3	7.6	8.7	10.0
5.4	5.7	6.6	7.9	9.0	10.3
5.7	5.6	6.4	7.6	8.7	9.9
5.6	5.0	5.8	6.9	7.8	8.8
5.0	4.0	4.8	6.0	7.1	8.3
4.0	4.1	4.9	6.0	7.0	8.2
4.1	3.8	4.5	5.5	6.4	7.4
3.8	3.2	3.7	4.6	5.3	6.2
3.2	4.0	4.8	6.0	7.1	8.3
4.0	4.1	4.9	6.1	7.1	8.3
4.1	3.8	4.5	5.6	6.5	7.5
3.8	3.3	3.8	4.7	5.5	6.3
3.3	4.1	4.9	6.1	7.1	8.3
4.1	4.2	5.0	6.2	7.2	8.3
4.2	3.9	4.6	5.7	6.6	7.7
3.9	3.4	4.0	4.8	5.6	6.5
3.4	4.1	4.9	6.1	7.1	8.3
4.1	4.2	5.0	6.2	7.2	8.4
4.2	4.0	4.7	5.8	6.7	7.7
4.0	3.5	4.1	5.0	5.7	6.6
3.5	4.1	4.9	6.1	7.1	8.3
4.1	4.3	5.1	6.3	7.3	8.4
4.3	4.1	4.8	5.9	6.8	7.8
4.1	3.6	4.2	5.1	5.9	8.3
3.6	4.2	4.9	6.1	7.2	8.5
4.2	4.4	5.1	6.3	7.3	7.9
4.4	4.2	4.9	6.0	6.9	6.9
4.2	3.7	4.3	5.2	6.0	8.4
3.7	4.2	5.0	6.2	7.2	8.5
4.2	4.4	5.2	6.4	7.4	8.1
4.4	4.2	5.0	6.1	7.0	7.1
4.2	3.8	4.4	5.3	6.1	8.4
3.8	4.2	5.0	6.2	7.2	8.6
4.2	4.5	5.2	6.4	7.4	8.1
4.5	4.3	5.0	6.1	7.1	7.2
4.3	3.8	4.5	5.4	6.3	8.4
3.8	4.3	5.0	6.2	7.2	8.6

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
4.3	4.5	5.3	6.4	7.5	8.2
4.5	4.4	5.1	6.2	7.2	7.3
4.4	3.9	4.6	5.5	6.4	8.4
3.9	4.3	5.1	6.2	7.2	8.6
4.3	4.6	5.3	6.5	7.5	8.3
4.6	4.5	5.2	6.3	7.2	7.4
4.5	4.0	4.7	5.7	6.5	8.4
4.0	4.4	5.1	6.3	7.2	8.7
4.4	4.6	5.4	6.5	7.5	8.4
4.6	4.5	5.3	6.4	7.3	7.6
4.5	4.1	4.8	5.8	6.6	5.6
4.1	2.2	2.8	3.8	4.6	5.9
2.2	2.5	3.1	4.1	4.9	5.7
2.5	2.5	3.1	4.0	4.8	5.0
2.5	2.2	2.8	3.5	4.2	6.1
2.2	2.6	3.2	4.2	5.1	6.4
2.6	2.8	3.5	4.5	5.4	6.1
2.8	2.8	3.4	4.4	5.2	5.4
2.8	2.5	3.1	3.9	4.6	6.7
2.5	3.0	3.6	4.7	5.6	6.9
3.0	3.2	3.9	5.0	5.9	6.6
3.2	3.1	3.8	4.8	5.6	5.8
3.1	2.8	3.4	4.2	4.9	7.2
2.8	3.4	4.1	5.2	6.1	7.4
3.4	3.6	4.3	5.4	6.4	7.0
3.6	3.5	4.1	5.2	6.0	6.2
3.5	3.1	3.7	4.5	5.3	7.8
3.1	3.8	4.5	5.6	6.6	8.0
3.8	4.0	4.7	5.9	6.8	7.5
4.0	3.8	4.5	5.6	6.5	6.5
3.8	3.4	4.0	4.9	5.7	8.3
3.4	4.2	4.9	6.1	7.2	8.5
4.2	4.4	5.1	6.3	7.3	7.9
4.4	4.2	4.9	6.0	6.9	6.9
4.2	3.7	4.3	5.2	6.0	8.9
3.7	4.6	5.4	6.6	7.7	9.0
4.6	4.7	5.5	6.8	7.8	8.4

(Continuación) Cuadro 81. Resultados del análisis de sensibilidad para el programa HEC-HMS 5.0.5, caudales (m³/s)					
4.7	4.5	5.2	6.4	7.3	7.3
4.5	3.9	4.6	5.5	6.4	9.5
3.9	5.0	5.8	7.1	8.2	9.5
5.0	5.1	6.0	7.2	8.3	8.9
5.1	4.9	5.6	6.8	7.8	7.7
4.9	4.2	4.9	5.9	6.7	10.0
4.2	5.4	6.3	7.6	8.8	10.0
5.4	5.5	6.4	7.7	8.8	9.3
5.5	5.2	6.0	7.2	8.2	8.0
5.2	4.5	5.2	6.2	7.1	10.6
4.5	5.9	6.8	8.1	9.3	10.6
5.9	5.9	6.8	8.2	9.3	9.8
5.9	5.6	6.4	7.6	8.6	8.4
5.6	4.8	5.5	6.6	7.4	11.2
4.8	6.3	7.2	8.6	9.8	11.1
6.3	6.4	7.3	8.6	9.8	10.2
6.4	5.9	6.8	8.0	9.0	8.8
5.9	5.1	5.8	6.9	7.8	8.7
5.1	5.8	6.9	7.8	7.7	8.7

**Apéndice 12. Resultados
Análisis de sensibilidad para el
nivel de creciente (m),
Estructura actual, tercer cuartil**

Cuadro 82. Resultados del nivel de crecida (m), Estructura actual, tercer cuartil								
Combinaciones			Periodo de retorno					
nl	nc	nr	Elev 2 años	Elev 5 años	Elev 10 años	Elev 25 años	Elev 50 años	Elev 100 años
0.010	0.035	0.010	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.020	0.035	0.020	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.030	0.035	0.030	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.040	0.035	0.040	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.050	0.035	0.050	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.060	0.035	0.060	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.070	0.035	0.070	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.080	0.035	0.080	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.090	0.035	0.090	1352.49	1352.61	1352.67	1352.78	1352.88	1352.98
0.050	0.015	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.69	1352.81	1352.92
0.050	0.02	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.69	1352.81	1352.92
0.050	0.025	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.69	1352.81	1352.93
0.050	0.03	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.7	1352.81	1352.93
0.050	0.035	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.7	1352.82	1352.94
0.050	0.04	0.050	1352.36	1352.47	1352.57	1352.71	1352.83	1352.95
0.050	0.045	0.050	1352.36	1352.47	1352.56	1352.71	1352.83	1352.96
0.050	0.05	0.050	1352.36	1352.47	1352.57	1352.72	1352.84	1352.97
0.050	0.055	0.050	1352.37	1352.48	1352.58	1352.73	1352.85	1352.98
0.010	0.015	0.010	1352.36	1352.47	1352.56	1352.69	1352.81	1352.92
0.020	0.02	0.020	1352.36	1352.47	1352.56	1352.69	1352.81	1352.92
0.030	0.025	0.030	1352.33	1352.43	1352.52	1352.65	1352.76	1352.87
0.040	0.03	0.040	1352.33	1352.43	1352.52	1352.65	1352.77	1352.88
0.050	0.035	0.050	1352.33	1352.43	1352.52	1352.65	1352.77	1352.88
0.060	0.04	0.060	1352.33	1352.43	1352.52	1352.66	1352.77	1352.89
0.070	0.045	0.070	1352.33	1352.43	1352.53	1352.67	1352.78	1352.9
0.080	0.05	0.080	1352.33	1352.43	1352.53	1352.67	1352.79	1352.91
0.090	0.055	0.090	1352.33	1352.44	1352.54	1352.68	1352.8	1352.93

Fuente: Creación Propia

Cuadro 83. Resultados del nivel de crecida (m), Estructura actual, mediana								
Combinaciones			Periodo de retorno					
nl	nc	nr	Elev 2 años	Elev 5 años	Elev 10 años	Elev 25 años	Elev 50 años	Elev 100 años
0.010	0.035	0.010	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.020	0.035	0.020	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.030	0.035	0.030	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.040	0.035	0.040	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.050	0.035	0.050	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.060	0.035	0.060	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.070	0.035	0.070	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.080	0.035	0.080	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.090	0.035	0.090	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.050	0.015	0.050	1352.3	1352.41	1352.5	1352.63	1352.75	1352.88
0.050	0.02	0.050	1352.3	1352.41	1352.5	1352.63	1352.76	1352.88
0.050	0.025	0.050	1352.3	1352.41	1352.5	1352.64	1352.76	1352.89
0.050	0.03	0.050	1352.31	1352.41	1352.5	1352.65	1352.77	1352.9
0.050	0.035	0.050	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.050	0.04	0.050	1352.31	1352.43	1352.52	1352.67	1352.79	1352.92
0.050	0.045	0.050	1352.32	1352.43	1352.53	1352.68	1352.8	1352.93
0.050	0.05	0.050	1352.32	1352.44	1352.54	1352.69	1352.82	1352.95
0.050	0.055	0.050	1352.33	1352.45	1352.55	1352.7	1352.83	1352.96
0.010	0.015	0.010	1352.3	1352.41	1352.5	1352.63	1352.75	1352.88
0.020	0.02	0.020	1352.3	1352.41	1352.5	1352.63	1352.76	1352.88
0.030	0.025	0.030	1352.3	1352.41	1352.5	1352.64	1352.76	1352.89
0.040	0.03	0.040	1352.31	1352.41	1352.5	1352.65	1352.77	1352.9
0.050	0.035	0.050	1352.31	1352.42	1352.51	1352.66	1352.78	1352.91
0.060	0.04	0.060	1352.31	1352.42	1352.52	1352.67	1352.79	1352.92
0.070	0.045	0.070	1352.32	1352.43	1352.53	1352.68	1352.8	1352.93
0.080	0.05	0.080	1352.32	1352.44	1352.54	1352.69	1352.82	1352.95
0.090	0.055	0.090	1352.33	1352.45	1352.55	1352.7	1352.83	1352.96

Fuente: Creación Propia

Cuadro 84. Resultados del nivel de crecida (m), Estructura propuesta, mediana								
Combinaciones			Periodo de retorno					
nl	nc	nr	Elev 2 años	Elev 5 años	Elev 10 años	Elev 25 años	Elev 50 años	Elev 100 años
0.010	0.035	0.010	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.020	0.035	0.020	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.030	0.035	0.030	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.040	0.035	0.040	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.050	0.035	0.050	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.060	0.035	0.060	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.070	0.035	0.070	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.080	0.035	0.080	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.090	0.035	0.090	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.050	0.015	0.050	1352.16	1352.26	1352.34	1352.45	1352.56	1352.67
0.050	0.02	0.050	1352.17	1352.26	1352.34	1352.46	1352.57	1352.68
0.050	0.025	0.050	1352.17	1352.26	1352.34	1352.47	1352.58	1352.69
0.050	0.03	0.050	1352.17	1352.27	1352.35	1352.48	1352.59	1352.71
0.050	0.035	0.050	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.050	0.04	0.050	1352.18	1352.28	1352.37	1352.51	1352.62	1352.74
0.050	0.045	0.050	1352.18	1352.29	1352.39	1352.52	1352.64	1352.75
0.050	0.05	0.050	1352.19	1352.3	1352.4	1352.54	1352.66	1352.77
0.050	0.055	0.050	1352.2	1352.32	1352.42	1352.56	1352.68	1352.79
0.010	0.015	0.010	1352.16	1352.26	1352.34	1352.45	1352.56	1352.67
0.020	0.02	0.020	1352.17	1352.26	1352.34	1352.46	1352.57	1352.68
0.030	0.025	0.030	1352.17	1352.26	1352.34	1352.47	1352.58	1352.69
0.040	0.03	0.040	1352.17	1352.27	1352.35	1352.48	1352.59	1352.71
0.050	0.035	0.050	1352.18	1352.27	1352.36	1352.49	1352.61	1352.72
0.060	0.04	0.060	1352.18	1352.28	1352.37	1352.51	1352.62	1352.74
0.070	0.045	0.070	1352.18	1352.29	1352.39	1352.52	1352.64	1352.75
0.080	0.05	0.080	1352.19	1352.3	1352.4	1352.54	1352.66	1352.77
0.090	0.055	0.090	1352.2	1352.32	1352.42	1352.56	1352.68	1352.79

Fuente: Creación Propia

Cuadro 85. Resultados del nivel de crecida (m), Estructura propuesta, mediana								
Combinaciones			Periodo de retorno					
nl	nc	nr	Elev 2 años	Elev 5 años	Elev 10 años	Elev 25 años	Elev 50 años	Elev 100 años
0.010	0.035	0.010	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.020	0.035	0.020	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.030	0.035	0.030	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.040	0.035	0.040	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.050	0.035	0.050	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.060	0.035	0.060	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.070	0.035	0.070	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.080	0.035	0.080	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.090	0.035	0.090	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.71	1352.78
0.050	0.015	0.050	1352.24	1352.34	1352.38	1352.5	1352.61	1352.73
0.050	0.02	0.050	1352.21	1352.3	1352.38	1352.51	1352.62	1352.74
0.050	0.025	0.050	1352.21	1352.31	1352.38	1352.51	1352.63	1352.75
0.050	0.03	0.050	1352.21	1352.31	1352.39	1352.53	1352.64	1352.76
0.050	0.035	0.050	1352.22	1352.31	1352.4	1352.54	1352.66	1352.78
0.050	0.04	0.050	1352.22	1352.33	1352.42	1352.55	1352.67	1352.79
0.050	0.045	0.050	1352.23	1352.38	1352.43	1352.57	1352.69	1352.81
0.050	0.05	0.050	1352.24	1352.36	1352.45	1352.59	1352.71	1352.83
0.050	0.055	0.050	1352.25	1352.37	1352.46	1352.61	1352.73	1352.85
0.010	0.015	0.010	1352.21	1352.3	1352.38	1352.5	1352.61	1352.73
0.020	0.02	0.020	1352.21	1352.3	1352.38	1352.5	1352.62	1352.74
0.030	0.025	0.030	1352.21	1352.31	1352.38	1352.51	1352.63	1352.75
0.040	0.03	0.040	1352.21	1352.31	1352.39	1352.53	1352.64	1352.76
0.050	0.035	0.050	1352.22	1352.33	1352.42	1352.55	1352.67	1352.79
0.060	0.04	0.060	1352.22	1352.33	1352.42	1352.55	1352.67	1352.79
0.070	0.045	0.070	1352.23	1352.34	1352.43	1352.57	1352.69	1352.81
0.080	0.05	0.080	1352.24	1352.36	1352.45	1352.59	1352.71	1352.83
0.090	0.055	0.090	1352.25	1352.37	1352.46	1352.61	1352.73	1352.9

Fuente: Creación Propia

Apéndice 13. Sección transversal de la quebrada El Molino.

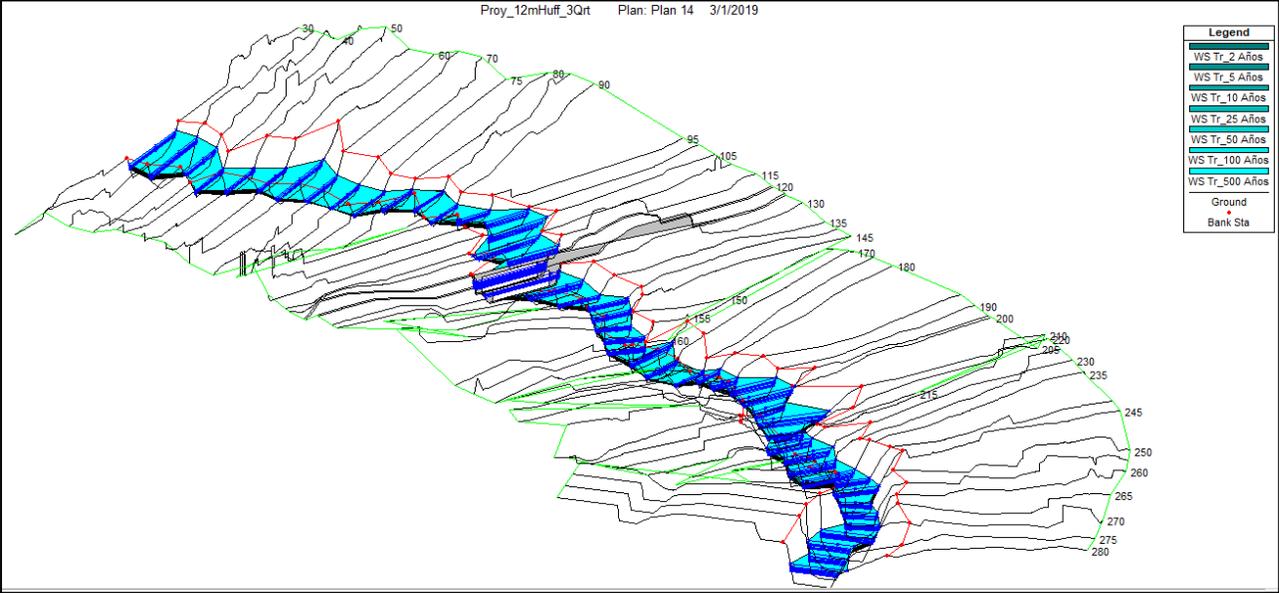


Figura 86. Secciones transversales de la quebrada El Molino
Fuente. Obtenido por medio del programa HEC-RAS.

Apéndice 14. Tablas resumen HEC-RAS

Cuadro 86. Resumen resultados HEC-RAS												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
ejeri	280	Tr_100 Años	20	1355.95	1358.1	1356.89	1358.17	0.00112	1.18	16.98	9.65	0.28
ejeri	275	Tr_100 Años	20	1355.39	1358.07		1358.16	0.001361	1.35	14.81	6.74	0.29
ejeri	270	Tr_100 Años	20	1354.94	1358.09		1358.15	0.000837	1.11	18.04	8.18	0.24
ejeri	265	Tr_100 Años	20	1355	1358.1		1358.14	0.000325	0.79	25.44	10.03	0.16
ejeri	260	Tr_100 Años	20	1356.28	1357.81		1358.11	0.007008	2.41	8.31	5.97	0.65
ejeri	255	Tr_100 Años	20	1356.32	1357.67	1357.5	1358.05	0.01026	2.75	7.27	6.2	0.81
ejeri	250	Tr_100 Años	20	1356.26	1357.42	1357.42	1357.97	0.017044	3.28	6.1	5.61	1
ejeri	245	Tr_100 Años	20	1355.99	1357.59	1357.06	1357.76	0.003464	1.83	10.93	8.27	0.51
ejeri	240	Tr_100 Años	20	1355.9	1357.19	1357.19	1357.7	0.01489	3.16	6.32	6.27	1.01
ejeri	235	Tr_100 Años	20	1354.59	1356.66	1355.5	1356.72	0.000903	1.1	18.14	10.24	0.26
ejeri	230	Tr_100 Años	20	1354.74	1356.64		1356.72	0.001177	1.21	16.52	9.37	0.29
ejeri	225	Tr_100 Años	20	1354	1356.65		1356.7	0.000713	1.04	19.3	9.11	0.23
ejeri	220	Tr_100 Años	20	1354	1356.65		1356.7	0.000686	1.01	19.74	8.87	0.22
ejeri	215	Tr_100 Años	20	1354.68	1356.07	1356.07	1356.64	0.016128	3.34	5.99	5.3	1
ejeri	210	Tr_100 Años	20	1353.99	1354.78	1355.24	1356.38	0.082714	5.61	3.57	5.82	2.29
ejeri	205	Tr_100 Años	20	1353.09	1355.05	1353.97	1355.1	0.000836	1.02	19.53	12.92	0.27
ejeri	200	Tr_100 Años	20	1353	1354.9		1355.08	0.003495	1.9	10.5	6.48	0.48
ejeri	195	Tr_100 Años	20	1353	1354.97		1355.04	0.00105	1.14	17.58	10.9	0.29
ejeri	190	Tr_100 Años	20	1353.09	1354.93		1355.03	0.001636	1.38	14.46	9.45	0.36
ejeri	185	Tr_100 Años	20	1352.99	1354.4	1354.4	1354.96	0.015738	3.33	6	5.35	1
ejeri	180	Tr_100 Años	20	1352.92	1353.94	1354.2	1354.82	0.033187	4.16	4.81	5.68	1.44
ejeri	175	Tr_100 Años	20	1352	1352.52	1352.98	1354.42	0.14087	6.1	3.28	7.29	2.91

(Continuación) Cuadro 86. Resumen resultados HEC-RAS

ejeri	165	Tr_100 Años	20	1352.18	1353.41	1353.03	1353.57	0.004104	1.76	11.35	10.83	0.55
ejeri	160	Tr_100 Años	20	1351.97	1353.18		1353.52	0.009653	2.61	7.66	6.82	0.79
ejeri	155	Tr_100 Años	20	1351.85	1353	1352.98	1353.45	0.014348	2.98	6.72	7.04	0.97
ejeri	150	Tr_100 Años	20	1351.76	1352.98		1353.37	0.010732	2.76	7.24	6.4	0.83
ejeri	145	Tr_100 Años	20	1351.77	1352.99		1353.3	0.008257	2.46	8.14	7.65	0.76
ejeri	140	Tr_100 Años	20	1351.82	1352.79	1352.79	1353.23	0.014819	2.93	6.82	7.88	1.01
ejeri	135	Tr_100 Años	20	1351.65	1352.32	1352.54	1353.09	0.039532	3.89	5.15	8.3	1.58
ejeri	130	Tr_100 Años	20	1351.56	1352.72	1352.35	1352.87	0.004021	1.74	11.49	11.34	0.55
ejeri	125	Tr_100 Años	20	1351.48	1352.78	1352.06	1352.83	0.001091	1.02	19.52	15.8	0.29
ejeri	122.5		Culvert									
ejeri	120	Tr_100 Años	20	1351.42	1352.68		1352.74	0.001292	1.09	18.41	15.05	0.31
ejeri	115	Tr_100 Años	20	1351.46	1352.53		1352.71	0.005192	1.9	10.51	10.55	0.61
ejeri	110	Tr_100 Años	20	1351	1352.59		1352.67	0.001743	1.25	16.06	14.39	0.38
ejeri	105	Tr_100 Años	20	1351	1352.57		1352.66	0.001951	1.32	15.1	12.23	0.38
ejeri	100	Tr_100 Años	20	1351	1352.49		1352.64	0.003279	1.73	11.53	9.25	0.5
ejeri	95	Tr_100 Años	20	1350.99	1352.1	1352.1	1352.58	0.01579	3.04	6.57	7.07	1.01
ejeri	90	Tr_100 Años	20	1350.95	1351.66	1351.88	1352.43	0.038062	3.9	5.13	8.31	1.58
ejeri	85	Tr_100 Años	20	1350.84	1351.92	1351.8	1352.22	0.00978	2.41	8.31	9.42	0.82
ejeri	80	Tr_100 Años	20	1350.7	1351.76	1351.76	1352.15	0.014553	2.77	7.22	9.38	1.01
ejeri	75	Tr_100 Años	20	1350.48	1350.93	1351.22	1351.94	0.083294	4.45	4.49	11	2.22
ejeri	70	Tr_100 Años	20	1350.27	1351.02	1351.17	1351.59	0.027991	3.34	5.99	9.97	1.37
ejeri	65	Tr_100 Años	20	1350.16	1351.26	1351.11	1351.5	0.008059	2.18	9.17	11.3	0.77
ejeri	60	Tr_100 Años	20	1350.21	1351.35		1351.43	0.002092	1.24	16.16	17.04	0.41
ejeri	55	Tr_100 Años	20	1350.12	1351.02	1351.01	1351.38	0.013711	2.66	7.5	10.02	0.98
ejeri	50	Tr_100 Años	20	1350.13	1350.97	1350.94	1351.31	0.013316	2.59	7.73	10.32	0.95
ejeri	45	Tr_100	20	1350.04	1350.87	1350.87	1351.24	0.014635	2.7	7.42	10.05	1

(Continuación) Cuadro 86. Resumen resultados HEC-RAS												
ejeri	40	Tr_100 Años	20	1349.59	1350.92	1350.53	1351.08	0.003994	1.77	11.31	10.94	0.56
ejeri	35	Tr_100 Años	20	1349.07	1351.01		1351.04	0.00034	0.7	28.48	17.12	0.17
ejeri	30	Tr_100 Años	20	1349.2	1351		1351.04	0.000496	0.81	24.74	15.91	0.21
ejeri	25	Tr_100 Años	20	1349.8	1350.62	1350.62	1350.99	0.029937	2.71	7.37	9.9	1
ejeri	20	Tr_100 Años	20	1349.2	1349.69	1349.99	1350.7	0.076435	4.46	4.48	10.28	2.16
ejeri	15	Tr_100 Años	20	1349.02	1349.95	1349.96	1350.38	0.015859	2.94	6.81	8.19	1.03
ejeri	10	Tr_100 Años	20	1348	1348.54	1348.96	1350.11	0.10389	5.54	3.61	6.99	2.47
ejeri	5	Tr_100 Años	20	1348	1348.76	1349	1349.59	0.039084	4.02	4.98	7.53	1.58

Cuadro 87. Resumen resultados HEC-RAS, Estructura Actual												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m/s)	Top Width (m)	Froude # Chl
ejeri	280	Tr_100 Años	20	1355.95	1358.22	1356.89	1358.28	0.002334	1.1	18.14	10.02	0.26
ejeri	275	Tr_100 Años	20	1355.39	1358.18		1358.26	0.002965	1.28	15.57	6.96	0.27
ejeri	270	Tr_100 Años	20	1354.94	1358.19		1358.25	0.001834	1.06	18.89	8.36	0.22
ejeri	265	Tr_100 Años	20	1355	1358.2		1358.23	0.000723	0.76	26.42	10.11	0.15
ejeri	260	Tr_100 Años	20	1356.28	1357.96		1358.2	0.012908	2.17	9.21	6.05	0.56
ejeri	255	Tr_100 Años	20	1356.32	1357.81	1357.5	1358.12	0.017918	2.44	8.19	6.33	0.69
ejeri	250	Tr_100 Años	20	1356.26	1357.48	1357.42	1357.98	0.036318	3.12	6.42	5.63	0.93
ejeri	245	Tr_100 Años	20	1355.99	1357.65		1357.8	0.007588	1.76	11.39	8.34	0.48
ejeri	240	Tr_100 Años	20	1355.9	1357.19	1357.19	1357.7	0.036817	3.16	6.32	6.27	1.01
ejeri	235	Tr_100 Años	20	1354.59	1356.69	1355.5	1356.75	0.002112	1.08	18.49	10.28	0.26
ejeri	230	Tr_100 Años	20	1354.74	1356.67		1356.74	0.002781	1.19	16.77	9.38	0.28
ejeri	225	Tr_100 Años	20	1354	1356.67		1356.72	0.001718	1.03	19.48	9.16	0.22
ejeri	220	Tr_100 Años	20	1354	1356.66		1356.71	0.001664	1.01	19.87	8.89	0.21
ejeri	215	Tr_100 Años	20	1354.68	1356.07	1356.07	1356.64	0.039938	3.34	5.99	5.3	1

(Continuación) Cuadro 87. Resumen resultados HEC-RAS, Estructura Actual												
ejeri	210	Tr_100 Años	20	1353.99	1354.82	1355.24	1356.2	0.163743	5.19	3.85	5.96	2.06
ejeri	205	Tr_100 Años	20	1353.09	1355.1	1353.97	1355.15	0.001865	0.99	20.24	13.08	0.25
ejeri	200	Tr_100 Años	20	1353	1354.95		1355.13	0.007866	1.84	10.86	6.54	0.46
ejeri	195	Tr_100 Años	20	1353	1355.01		1355.07	0.002431	1.11	17.99	10.98	0.28
ejeri	190	Tr_100 Años	20	1353.09	1354.96		1355.05	0.003826	1.36	14.74	9.49	0.35
ejeri	185	Tr_100 Años	20	1352.99	1354.4	1354.4	1354.96	0.038696	3.33	6.01	5.35	1
ejeri	180	Tr_100 Años	20	1352.92	1354.07	1354.2	1354.72	0.055965	3.59	5.57	6.15	1.21
ejeri	175	Tr_100 Años	20	1352	1353.64	1352.98	1353.76	0.006125	1.58	12.65	9.47	0.44
ejeri	170	Tr_100 Años	20	1352	1353.58		1353.73	0.007849	1.72	11.61	8.98	0.48
ejeri	165	Tr_100 Años	20	1352.18	1353.56		1353.68	0.006845	1.54	12.95	11.13	0.46
ejeri	160	Tr_100 Años	20	1351.97	1353.37		1353.62	0.014963	2.23	8.98	6.98	0.63
ejeri	155	Tr_100 Años	20	1351.85	1353.26		1353.54	0.017522	2.33	8.6	7.48	0.69
ejeri	150	Tr_100 Años	20	1351.76	1353.15		1353.45	0.01745	2.4	8.35	6.5	0.67
ejeri	145	Tr_100 Años	20	1351.77	1353.1		1353.35	0.015279	2.23	8.98	7.78	0.66
ejeri	140	Tr_100 Años	20	1351.82	1352.87	1352.79	1353.24	0.028214	2.69	7.45	8.01	0.89
ejeri	135	Tr_100 Años	20	1351.65	1352.91		1353.1	0.011609	1.92	10.4	9.3	0.58
ejeri	130	Tr_100 Años	20	1351.56	1352.93		1353.04	0.005544	1.43	13.97	11.8	0.42
ejeri	125	Tr_100 Años	20	1351.48	1352.96	1352.06	1353	0.001748	0.89	22.44	16.01	0.24
ejeri	122.5		Culvert									
ejeri	120	Tr_100 Años	20	1351.42	1352.76		1352.82	0.002577	1.01	19.71	15.12	0.28
ejeri	115	Tr_100 Años	20	1351.46	1352.63		1352.79	0.009457	1.72	11.61	10.71	0.53
ejeri	110	Tr_100 Años	20	1351	1352.66		1352.73	0.003541	1.17	17.14	14.58	0.34
ejeri	105	Tr_100 Años	20	1351	1352.63		1352.71	0.004184	1.26	15.87	12.44	0.36
ejeri	100	Tr_100 Años	20	1351	1352.54		1352.68	0.007194	1.66	12.02	9.36	0.47
ejeri	95	Tr_100 Años	20	1350.99	1352.11	1352.11	1352.58	0.038343	3.03	6.61	7.08	1
ejeri	90	Tr_100	20	1350.95	1352.13	1351.88	1352.36	0.016158	2.15	9.29	9.54	0.7

(Continuación) Cuadro 87. Resumen resultados HEC-RAS, Estructura Actual												
ejeri	85	Tr_100 Años	20	1350.84	1352.06		1352.28	0.015513	2.08	9.62	9.62	0.66
ejeri	80	Tr_100 Años	20	1350.7	1351.76	1351.76	1352.15	0.035938	2.77	7.22	9.38	1.01
ejeri	75	Tr_100 Años	20	1350.48	1351.54	1351.22	1351.69	0.010949	1.74	11.51	12.37	0.57
ejeri	70	Tr_100 Años	20	1350.27	1351.46		1351.63	0.012599	1.84	10.88	12.21	0.62
ejeri	65	Tr_100 Años	20	1350.16	1351.39		1351.56	0.012962	1.88	10.66	11.9	0.63
ejeri	60	Tr_100 Años	20	1350.21	1351.43		1351.5	0.004085	1.14	17.49	17.37	0.36
ejeri	55	Tr_100 Años	20	1350.12	1351.23		1351.45	0.016055	2.08	9.62	10.54	0.7
ejeri	50	Tr_100 Años	20	1350.13	1351.14		1351.36	0.017207	2.1	9.53	10.55	0.71
ejeri	45	Tr_100 Años	20	1350.04	1350.9	1350.87	1351.24	0.031108	2.57	7.79	10.12	0.94
ejeri	40	Tr_100 Años	20	1349.59	1350.96		1351.11	0.009075	1.72	11.66	11.08	0.53
ejeri	35	Tr_100 Años	20	1349.16	1351.03		1351.06	0.000865	0.71	28.34	17.26	0.18
ejeri	30	Tr_100 Años	20	1349.2	1351.02		1351.05	0.001187	0.8	25.01	15.94	0.2
ejeri	25	Tr_100 Años	20	1349.83	1350.62	1350.62	1351	0.042627	2.73	7.34	9.79	1.01
ejeri	20	Tr_100 Años	20	1349.15	1350.47	1349.92	1350.57	0.005836	1.44	13.86	12.14	0.43
ejeri	15	Tr_100 Años	20	1349.02	1350.31		1350.52	0.012713	2.01	9.94	8.74	0.6
ejeri	10	Tr_100 Años	20	1348	1350.39		1350.46	0.002104	1.1	18.17	8.84	0.25
ejeri	5	Tr_100 Años	20	1348	1350.4	1349	1350.44	0.0014	0.91	28.14	30.56	0.21

Anexos

- 1. Conceptos básicos de hidrología**
- 2. Información sobre programas computacionales utilizados**

1. Conceptos básicos de hidrología

Hidrología

La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas así como su relación con el medio ambiente en donde se incluyen los seres vivos. (Villón, 2014,p. 14)

Hidráulica

Es la rama de la mecánica aplicada al estudio del comportamiento de fluidos ya sea en reposo o en movimiento. (Giles, 1994, p. 7)

Ciclo Hidrológico

Se le denomina al conjunto de cambios que sufre el agua en su naturaleza tanto en su estado (líquido, sólido, gaseoso) como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.) (Villón, 2014,p. 15)

El ciclo hidrológico es variable por lo que el hombre ha buscado la manera de poder predecir el comportamiento de éste a partir del estudio de su manera de manifestarse a lo largo de la historia.

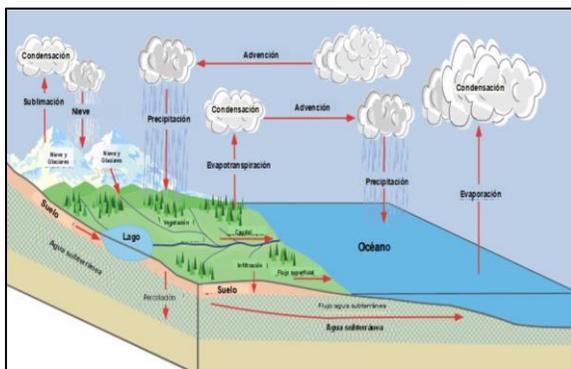


Figura 87. Representación del Ciclo Hidrológico
Fuente:www.eoearth.org/article/Hydrologic_cycle, adaptado por Ordoñez, 2011
Reservorio

Precipitación

Precipitación es cualquier agua (en varios de sus estados) que cae en la superficie. Entre los fenómenos meteorológicos que se consideran como precipitación están la lluvia, la nieve y granizo. (Tipos, n.d.) El estudio de la precipitación es de gran relevancia para la hidrología ya que es la principal fuente de agua en una cuenca y con esto se puede prevenir las crecidas en ciertas zonas, diseño de obras, estudios de erosión, entre otros.

Divisoria de aguas

Las cuencas hidrográficas están separadas por una línea que divide las aguas correspondientes a una cuenca de otra; esta línea sigue las máximas alturas que bordean una cuenca y las características locales de las superficies vertientes. (Cuencas, 2008)

Cuenca

Es el área de terreno separada por la divisoria de aguas en la cual el agua producto de la precipitación se une en un único curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca definida para cada punto de su recorrido. (Villón, 2014,p. 21)

Estudios a analizar en una cuenca

En una cuenca no sólo basta con poder delimitar su área y establecer las características como su extensión o forma, sino que se debe considerar aspectos que proporcionan información de interés para conocer el uso que se puede dar a la cuenca o lo que técnicamente se podría realizar. Entre los aspectos de estudio cabe destacar los siguientes puntos:

- **Régimen climático**

Este aspecto implica la necesidad de establecer la estadística de las condiciones climáticas que se presentan en el parte aguas de la cuenca con el fin de determinar las precipitaciones y su distribución.

- **Cobertura vegetal y uso de suelo**

La existencia de cobertura vegetal así como sus cualidades de densidad, uso y tipo, son de suma importancia pues influyen en la cantidad de volumen y calidad de corriente de agua en la quebrada. De esto surge la importancia del uso de mapeos y uso de fotografía aéreas para establecer las condiciones con las que se cuenta.

- **Levantamiento del suelo**

En este estudio se requiere una descripción de las condiciones existentes en la superficie y las que se presentan al realizar los perfiles del terreno. Como bien se sabe el agua posee una conducta variable y a veces impredecible por lo que es útil conocer el aporte del suelo ante el comportamiento del agua.

- **Caracterización física e hidrológica**

Es de gran relevancia para el estudio de una cuenca conocer sobre sus aspectos físicos, resaltando características como pendiente promedio y alturas, también es primordial saber sobre la jerarquización de sus relaciones de drenaje y así conocer como se distribuye la red de avenamiento a lo largo y ancho de la cuenca.

Clasificación de cuencas

Las cuencas se deben clasificar con la finalidad de poder establecer o crear conjeturas sobre las características que pueden tener éstas con respecto a su comportamiento, esto también

permite el poder establecer los métodos a emplear en el estudio.

Una de las formas para clasificar una cuenca es por medio de tres características: extensión, altura y salida del cauce.

Otra forma es la clasificación según su extensión territorial en donde existen dos grupos, cuencas grandes y cuencas pequeñas.

Cuencas grandes

Es aquella que predominan las características físicas y de relieve de la misma (pendiente, elevación, área, cauce, etc.). Se considera en la práctica que una cuenca puede clasificarse como grande cuando la extensión de su área es superior a los 250 km². (Villón, 2014,p. 24)

Cuencas Pequeñas

Son aquellas que responden a las lluvias de fuerte intensa y poca duración y en que las características físicas como tipo de suelo y vegetación poseen mayor relevancia que las propias del cauce. Se considera una cuenca pequeña a las que poseen un área inferior a los 250 km². (Villón, 2014,p. 24)

En cuanto a su función de salida las cuencas se clasifican en cuencas endorreicas y exorreicas.

Cuencas Endorreicas

El punto de desfogue o salida del afluente de la cuenca se da hacia dentro de la misma, por ejemplo un lago. (Andia & Morales, 2009)

Cuencas Exorreicas

En las cuencas exorreicas el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca, lo que permite que fluya hacia otra corriente de agua o al mar. (Andia & Morales, 2009)

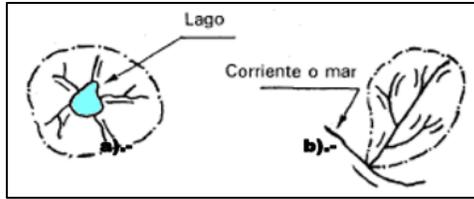


Figura 88 Tipos de cuencas según su función de salida

Fuente: Obtenido de Universidad Mayor De San Simón.co.org

En cuanto a su función en relación a la elevación relativa de sus partes, se clasifica en: cuencas, alta, media y baja.

Cuenca alta

Llamada como cuenca cabecera o de recepción de la cuenca; por su posición, capta y almacena en sus cumbres ya sea en lagunas o represamientos de las altiplanicies la mayor parte de los aportes de la precipitación. Además, tiene una cobertura vegetal típica de pastos o bosques y una menor presión demográfica. (Andia & Morales, 2009, p. 14)

Cuenca media

De mayor pendiente relativa, con un caudal caracterizado por ser de régimen turbulento. También se le denomina zona de transporte de sedimentos o de escurrimiento. (Andia & Morales, 2009, p. 14)

Cuenca Baja

Cuenca de menor pendiente relativa, con un caudal de flujo continuo, cauce definido y amplia planicie de inundación, suele llamarse como de deyección o zona de depósito. (Andia & Morales, 2009, p. 14)

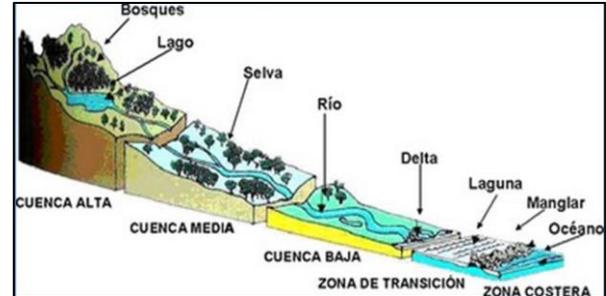


Figura 89. Partes de la cuenca

Fuente: www.eoearth.org/article/Hydrologic_cycle, adaptado por Ordoñez, 2011

Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica son de gran importancia a la hora de realizar estudios referentes a condiciones de la superficie terrestre ya que estos permiten ubicar y caracterizar las condiciones presentes en el área de estudio, lo cual permite establecer las medidas que se requieran sin tener la necesidad, en algunos casos, de realizar los estudios con la visita al sitio.

El término Sistema de Información Geográfica (SIG) suele aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales que constituyen la herramienta informática más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales. Se trata de herramientas complejas como producto de la evolución y fusión de programas de muy distinto tipo que anteriormente se habían utilizado de forma independiente. Esta complejidad ha desarrollado el nacimiento, a partir del trabajo con SIG, de una nueva disciplina científica, todavía bastante discutida, conocida como Ciencia de la Información Geográfica. (Sarría, 2014, p. 5)

Entre las funciones de los SIG destacan las siguientes. (Olaya, 2014):

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos.
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Conceptos geodecicos

A la hora de establecer modelos apropiados para representar las formas de la tierra se debe tener en cuenta dos conceptos básicos el geoide y el elipsoide de referencia, los cuales son formas de describir el relieve de la tierra de una mejor manera o más similar posible.

El elipsoide

Se conoce como la forma geométrica que mejor se ajusta a la forma de la tierra respecto a otras como círculos o demás formas geométricas.(Olaya, 2014)

El geoide

Es la otra forma de referencia que se define como la superficie tridimensional en cuyos puntos la atracción gravitacional es constante (Olaya, 2014).

El geoide no posee una forma constante como la elipse debido a que la tierra presenta zonas con distinta densidad de ahí que la gravedad varíe y con ello la forma del geoide.

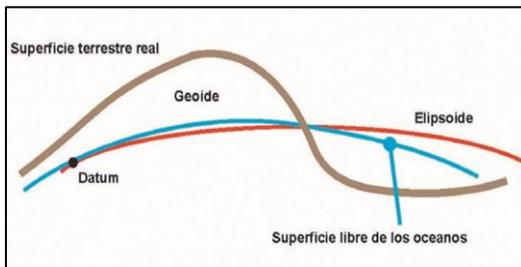


Figura 90. Superficies fundamentales para los SIG.

Fuente: Tomado de (Datum, Geoide, & Elipsoide, 2016)

Datum

Cuando utilizamos el elipse general se sabe que tanto su centro de gravedad como su plano ecuatorial coinciden con los de la Tierra, pero cuando esto no sucede y se trabaja con una elipse local se deben hacer adaptaciones por lo que surge el concepto de datum, el cual es el conjunto conformado por un elipsoide y un punto que permite la unión del elipsoide con el geoide.(Olaya, 2014)

Al datum también se le conoce como punto astronómico fundamental o punto fundamental; en este punto la altura geoidal la cual corresponde al espacio entre el geoide y el elipsoide es por consiguiente cero al tratarse de un punto de unión.

Proyecciones Cartograficas

Cuando se requiere analizar características cartográficas es común que se haga mediante un sistema de coordenadas X y Y y la utilización de un pliego de papel o pantallas según el dispositivo electrónico que se emplee, por ejemplo, cuando se requiere analizar la superficie de la tierra, la cual no posee una forma plana es necesario realizar proyecciones en planos para así generar un sistema 2D de la tierra.

Para clasificar estas proyecciones existen diferentes formas de hacerlo, entre ellas las siguientes: Para clasificarlas existen diferentes formas de hacerlo las cuales se mencionan a continuación.

Clasificación por proyección geométrica

Para realizarla se utilizan varios planos dispuestos de distintas formas geométricas que permitan realizar una proyección adecuada según la característica u la ubicación que mejor se adapte al punto que se requiera analizar.

Entre los tipos de proyecciones empleados encontramos los siguientes:

Cónicas

Es una superficie en forma de cono la cual se orienta secante o tangente en dos paralelos a la superficie de la elipsoide. Este tipo es útil para abarcar áreas poco extensas.

Cilíndricas

Es una proyeccion cartográfica que utiliza un cilindro cuya proyección genera que se mantengan

las dimensiones cercanas al Ecuador. De esta proyección es de la que procede la proyección utilizada en Costa Rica la transversa de Mercator (CRTM05).

Plana o Azimutales

La superficie por desarrollar es un plano que depende de la posición del punto de fuga.

Gnómica o central

El punto de observación o salida se ubica en el centro del elipsoide.

Clasificación por propiedad geométrica

Existen otra forma de clasificar las proyecciones cartográficas y se refiere a las propiedades geométricas que se requiere determinar en la proyección. Al realizar una proyección sucede el fenómeno de anamorfosis, en el cual ciertas propiedades geométricas se pierden y se mantienen otras, por lo que según el requisito, así va a ser el tipo de proyección por utilizar.

Los siguientes son los tipos de proyecciones según el aspecto geométrico que se requiera:

Equiárea

Este tipo de clasificación se refiere a que la escala no varía ya que la relación de área real es igual al área proyectada sin importar la localización. Lo cual la hace de utilidad si lo que se requiere está relacionado con la comparación de superficies.

Conformes

Este tipo mantiene la forma de los objetos, por lo tanto conserva los ángulos. El inconveniente en este tipo de proyección es que las distancias y áreas se ven afectadas, por lo que algunos de los objetos se ven más grandes de lo que son en algunos sectores.

Equidistantes

Son las proyecciones que mantienen las distancias de los objetos. Es de gran utilidad para cuando se requiere conocer las longitudes de determinadas regiones o distancias de separación.

Modelos de representación

Para representar superficies es necesario tener un sistema que permita que se compile las características de una manera finita, en la cual la visualización de la información se dé de una manera clara, específica y, separando las propiedades de los modelos geográficos; por lo que es usual también que a los modelos de representación se les conozca también como modelos de datos.

Para representar distintos tipos de información se puede hacer por representación vectorial o la representación ráster.

Ráster

La representación ráster se compone de celdas que comúnmente son cuadradas, y que contienen los valores de las propiedades que se requiera representen, por lo que para una celda específica se tiene un único valor. Este comportamiento no permite ambigüedad, razón que implica una falla en este sistema ya que una celda puede contener más de un valor pero sólo puede representar al dominante, por lo que se anula la otra propiedad lo que implica pérdida de representatividad.

Vectorial

La representación vectorial trata sobre una serie de formas geométricas con características constantes. Esta representación está compuesta por puntos, líneas y polígonos que sirven para modelizar el espacio geográfico.

El empleo de uno u otro depende de la utilidad que se requiera obtener. Sin embargo, en la

actualidad se tienen programas que permiten contener ambos sistemas haciendo que el análisis de información sea más completo y representativo.

Sistemas de información Geográfica (SIG) en Costa Rica

El sistema nacional de coordenadas CRTM05 es el marco de referencia para todos los temas referentes al ordenamiento territorial del país. El sistema de coordenadas CR05 está vinculado al Marco de Referencia Terrestre Internacional, realización del 2000 (ITRF00, por sus siglas en inglés), reducido a la época 2005.83, que es la época de definición del sistema. (Lobo-Hernández, 2010)

Los parámetros de este nuevo sistema son el datum horizontal CR05, datum vertical nivel medio del mar, proyección transversa de mercator para Costa Rica CRTM05 y elipsoide WGS84. (Lobo-Hernández, 2010)

El sistema CR05 está materializado por una red de 34 estaciones GPS denominada red de primer orden, medidas con tecnología GPS, que se sitúan dentro de todo el país.

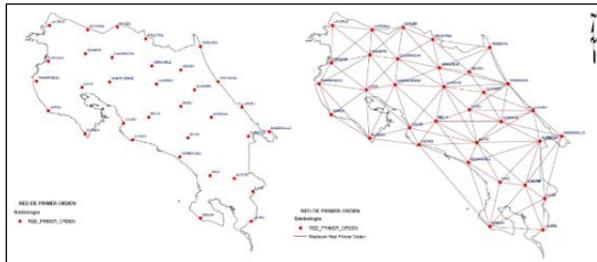


Figura 91. Red de Primer Orden
Fuente: Obtenido de (Lobo-Hernández, 2010)

1. Información sobre programas computacionales utilizados

El uso de programas o software facilita la obtención de información en casos donde dicha información puede ser difícil de obtener o un método posee alta complejidad para el desarrollo de los resultados que se requieren.

Por otra parte, reduce los tiempos de cálculo ya que poseen la cualidad de realizar procesamientos

de manera inmediata eliminando el tiempo que se requeriría la solución de las formulas manualmente por el usuario.

Google Earth Pro

Es un programa que muestra el globo terráqueo proporcionando una múltiple cartografía en base a fotografías satelitales.

Es un producto de Google de libre acceso que facilita la búsqueda geográfica y permite a la vez el poder importar la información obtenida en el programa hacia otros programas, lo cual es de gran utilidad cuando se trabaje con programas que requieran de la ubicación de ciertas zonas.

HEC-HMS 4.0

El modelo HEC-HMS 4.0 (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) fue diseñado para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas. Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Este programa fue desarrollado por el cuerpo de ingeniería de la armada de los Estados Unidos y su función principal es la de simular la respuesta hidrológica de una cuenca.

El desarrollo del programa se basa en la realización de modelos meteorológicos, modelos de cuenca, especificaciones de control y datos de entrada. Realizando así la combinación de dichos modelos y parámetros para llevar a cabo una corrida o varias corridas; donde se detalla de manera gráfica en el mapa de la cuenca tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total.

Otra función importante es que permite generar los gráficos de hietogramas e hidrogramas para evidenciar el comportamiento de la cuenca a lo largo del tiempo en que se estima se desarrollen las precipitaciones.

HEC-RAS 5.0.5

HEC-RAS 5.0.5 es un software que al igual que el HEC-HMS 4.0 es desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos y cuya utilidad es realizar simulaciones hidráulicas para varias obras de ingeniería en donde se considera la relación existente entre estas y la topografía del cauce del río, el volumen del agua y sedimentos transportados. Uno de sus resultados principales es establecer el tirante o altura de la lámina de agua de un caudal dado, además permite ver condiciones de inundabilidad en el cauce de un río o quebrada.

Este modelo unidimensional se enfoca en dos condiciones de flujo el gradualmente variado (FGV) y el rápidamente variado (FRV). Para el FGV se plantea una ecuación de energía en una dimensión, mientras que para el FRV que se puede presentar en saltos hidráulicos se tiene la ecuación de momentum del flujo.

ArcGIS 10.5

Este es un programa desarrollado por la empresa ESRI la cual es una empresa dedicada al desarrollo de trabajos de consultoría del territorio la cual tiene su centro de operaciones en California, Estados Unidos y es una de las empresas líderes en el desarrollo de sistemas de información geográfica.

ArcGIS 10.5 es una serie de programas de software y herramientas que permiten realizar trabajo SIG profesional. Además, ArcGIS 10.5 emplea sistemas de información geográfica facilitando las tareas de recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información que se requiere para poder realizar un estudio sea cual sea el área de ciencia que se desee llevar a cabo.

Permite el desarrollo de sistemas de representación tanto tipo ráster como vectoriales para la representación de las características que se necesiten obtener.

Mediante este programa se puede realizar la ubicación de la cuenca según el sistema de proyección que se utilice en la zona de ubicación de la cuenca en común ya que al ser un programa

que emplea el GPS como herramienta de localización permite ubicación de puntos a lo largo del planeta. Además realiza la separación de la cuenca a través de la divisoria de aguas.