UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO PARA LOS PUENTES EN ZONAS DE INUNDACIÓN GENERADAS POR EL PROYECTO "PACALORI".

Tesis Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Civil.

AUTOR:

MATEO SEBASTIÁN CENTENO DÁVILA

DIRECTOR:

ING. CRISTIAN IVÁN COELLO GRANDA, MSc.

CUENCA-ECUADOR
2015

RESUMEN

El presente tema consta de un análisis hidrológico e hidráulico para el sistema de drenaje de obras de arte mayor en el proyecto PACALORI, del sistema Calabí, con el propósito de establecer parámetros y criterios de diseño en los puentes que serán afectados por el proyecto. Dentro del análisis intervienen aspectos hidrometeorológicos, morfológicos, hidrológicos e hidráulicos, referentes al drenaje, flujo y socavación general.

Con el programa HEC-HMS se determinaron caudales máximos para un período de retorno de 100 años para las diversas cuencas, con valores de 33.8m^3/s hasta los 2548.7m^3/s, tomando como referencia la cuenca más pequeña y la cuenca más grande.

Aplicando el programa HEC-RAS se aprecia el desbordamiento de los cauces en los puentes de los ríos Paján y Las Tablas. Además, se determinaron parámetros hidráulicos referentes a los calados máximos que varían entre 1.98m a 5.58m; las velocidades fluctúan entre 1.01m/s a 6.26m/s y en la mayoría de los ríos el tipo de flujo, es subcrítico a excepción del río Las Tablas, que presenta un cambio de régimen a flujo supercrítico.

Para el análisis de socavación se utilizaron los método de Lischtvan-Levediev y Einstein, con los resultados se obtuvo un promedio, determinándose socavaciones que varían entre 0.63m a 3.11m, a excepción del río Paján que no presenta socavación.

Esta investigación concluye, que las condiciones de ubicación para los puentes del río Lagarto y Lechugal son favorables, no así, para los puentes del río Paján y Las Tablas al ser estos inundados; pero habiendo una posible solución de emplazar un nuevo puente aguas abajo, en el río Las Tablas.

PALABRAS CLAVES: (Morfología, Hidrometeorología, Precipitación, Hidrología, Hietograma, HEC-HMS, Hidrograma, Hidráulica, HEC-RAS, Escorrentía, Caudal, Socavación)

ABSTRACT

This theme consists of a hydrologic and hydraulic analysis for the drainage of major art works in the project PACALORI at Calabi system, in order to set parameters and design criteria for bridges to be affected by the project. Hydrometeorological, morphological, hydrological and hydraulic aspects are involved in the analysis, concerning the drainage flow and generally undermining.

With the HECS-HMS program, peak flows were determined for basins with values of 33.8 m3 / s up to 2548.7 m3 / s, taking as reference the smallest and largest watershed.

By applying the HEC-RAS program, are shown overflows in channels at the bridges belonging to the rivers Pajan and Las Tablas. In addition, hydraulic parameters about the maximum drafts which vary between 5.58m and 1.98m were determined; the speeds fluctuate between 1.01m/s to 6.26m/s the flow in most rivers is subcritical except in Las Tablas river, which presents a regime change to supercritical flow

For analysis of scour were used the Lischtvan-Levediev and Einstein methods, with the results an average was obtained, determined undercuts varying between 3.11mand 0.63 m, except the Pajan river which does not present scour.

This research concludes that the location of the bridges is favorable for Lagarto and Lechugal rivers, except for the bridges over Pajan and Las Tablas rivers because these are flooded; however exists a possible solution to deploy a new bridge downstream at Las Tablas river.

KEYWORDS: (Morphology, Hydrometeorology, Rainfall, Hydrology, Hyetograph, HEC-HMS, Hydrograph, Hydraulic, HEC-RAS, Runoff, Streamflow, Scour).

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 13
2. ANTECEDENTES 14
2.1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO 14
2.1.1. OBJETIVO GENERAL 14
2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
2.2. ALCANCE 15
2.3. JUSTIFICACIÓN 15
3. MATERIALES Y MÉTODOS 15
3.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO 15
3.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE 17
3.2.1. CARTOGRAFÍA 17
3.2.2. TOPOGRAFÍA 17
3.2.3. HIDROGRAFÍA 17
3.2.4. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA 17
3.2.5. RESULTADOS GENERALES DEL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA DEL PROYECTO RESCATADOS PARA LA INVESTIAGACIÓN 18
3.3. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS AFECTADOS DEL PROYECTO 22
3.4. DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS 24
3.4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS 24
3.5. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y USOS DE SUELO 29
3.5.1. DETERMINACÍON DE USOS DE SUELO 29
3.6. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS 31
3.6.1. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN 31
3.6.2. TIEMPO DE RETARDO 31
3.6.3. NÚMERO DE CURVA 32
3.6.4. RESUMEN DE LOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS 36
3.7. RESPUESTA LLUVIA-ESCORRENTÍA 36
3.8. PRECIPITACIÓN EFECTIVA 37
3.8.1. MÉTODO DE LA SOIL CONSERVATION SERVICE PARA ABSTRACCIONES (SCS) 37
4. RESULTADOS 38
4.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO 38

4.1.1. ELABORACIÓN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS 38
4.1.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON HEC-HMS PARA DETERMINAR LOS HIDROGRAMAS DE DISEÑO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS 41
4.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO: MODELACIÓN MATEMÁTICA EN HEC-RAS 52
4.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO HEC-RAS 54
4.2.2. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE PUENTES PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO 54
4.2.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE DISEÑO 54
4.3. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN GENERAL 75
4.3.1. MÉTODO DE LISCHTVAN-LEVEDIEV 76
4.3.2. MÉTODO DE EINSTEIN 78
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 89
5.1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS E ÍNDICES HIDROLÓGICOS .. 89
5.2. HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA 92
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 95
7. BIBLIOGRAFÍA 98
8. ANEXOS 100
8.1. TABLAS 100
8.1.1. HIETOGRAMAS DE DISEÑO 100
8.2. REGISTRO TOPOGRÁFICO 105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Ilustración 3.1. Representación Gráfica del Proyecto PACALORI. 16
Ilustración 3.2. Isolíneas de intensidades máximas de lluvias de 24 horas en las cuencas de los ríos Quevedo y Zapotal para 100 años de periodo de retorno. 20
Ilustración 3.3. Puntos de Interés afectados del proyecto. 23
Ilustración 3.4. Delimitación y Ubicación de las Cuenca Hidrográficas. 25
Ilustración 3.5. Mapa de Usos de Suelo para la cuenca del río Quevedo. 30
Ilustración 4.1. Hietograma de la estación de Pichilingue con duración de 24hrs. 41

Ilustración 4.2. Especificación del tipo de precipitación utilizado en el programa HEC-HMS..... 45
Ilustración 4.3. Especificaciones de Control para la simulación del programa HEC-HMS..... 45
Ilustración 4.4. Hietograma de Diseño para la simulación del programa HEC-HMS. 46
Ilustración 4.5. Datos de Series de Tiempos para la simulación del programa HEC-HMS..... 47
Ilustración 4.6. Ejecución del Programa. 47
Ilustración 4.7. Hidrograma de Diseño para la Cuenca SN. 49
Ilustración 4.8. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lechugalito. 49
Ilustración 4.9. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca La Muralla. 49
Ilustración 4.10. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lagarto. 49
Ilustración 4.11. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Paján. 49
Ilustración 4.12. Hidrograma de Diseño para la Cuenca La Muralla. 49
Ilustración 4.13. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Las Tablas. 50
Ilustración 4.14. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Chojampe. 50
Ilustración 4.15. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Hondo..... 50
Ilustración 4.16. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Las Tablas..... 50
Ilustración 4.17. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Abras de Mantequilla. 50
Ilustración 4.18. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Lechugal. 50
Ilustración 4.19. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lechugal..... 51
Ilustración 4.20. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Quevedo..... 51
Ilustración 4.21. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Alta. 51
Ilustración 4.22. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Media. 51
Ilustración 4.23. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Baja. 51
Ilustración 4.24. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Quevedo producto de la subcuenca alta, subcuenca media y subcuenca baja. 51
Ilustración 4.25. Franja Topográfica y Secciones Transversales. 55
Ilustración 4.26. Datos Geométricos de Secciones Transversales..... 57
Ilustración 4.27. Parámetros de Flujo No Permanente. 58
Ilustración 4.28. Hidrograma de Flujo..... 59

Ilustración 4.29. Condiciones Iníciales. 60
Ilustración 4.30. Secciones Transversales en los sitios de Puentes. 61
Ilustración 4.31. Hidrogramas de Diseño para un periodo de retorno de 100 años. 62
Ilustración 4.32. Pendiente de Ficción. 63
Ilustración 4.33. Flujo Base. 63
Ilustración 4.34. Corrida del programa para Flujo No Permanente. 64
Ilustración 4.35. Resultados de Modelación del Río Lagarto. 65
Ilustración 4.36. Resultados de Modelación del Río Paján. 67
Ilustración 4.37. Resultados de Modelación del Río Las Tablas. 70
Ilustración 4.38. Resultados de Modelación del Río Lechugal. 73
Ilustración 4.39. Perfil de Socavación del Río Lagarto. 80
Ilustración 4.40. Perfil de Socavación del Río Paján. 82
Ilustración 4.41. Perfil de Socavación del Río Las Tablas. 84
Ilustración 4.42. Perfil de Socavación del Río Las Tablas (Posible Solución). . 86
Ilustración 4.43. Perfil de Socavación del Río Lechugal. 88

Tabla 3.1. Descripción de las estaciones meteorológicas empleadas para los diferentes puntos de interés del proyecto. 18
Tabla 3.2. Intensidades máximas diarias para diferentes períodos de retorno en mm/h. 18
Tabla 3.3. Porcentaje de lluvia caída en un tiempo t con relación al 100% caído en 24 horas. 21
Tabla 3.4. Descripción de los Puntos afectos del proyecto. 22
Tabla 3.5. Parámetros Morfométricos que presentan las diferentes cuencas hidrográficas. 27
Tabla 3.6. Determinación de los Índices de Compacidad, de Forma, Densidad de Drenaje y de Relación de Elongación. 29
Tabla 3.7. Condiciones de Humedad publicada por la Soil Conservation Service (SCS). 32

Tabla 3.8. Número de Curva para condiciones antecedentes de humedad II e Ia=0.2S, según (UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). 34
Tabla 3.9. Número de Curva que presentan las cuencas hidrológicas de interés. 35
Tabla 3.10. Determinación de los Índices Hidrológicos. 36
Tabla 3.11. Parámetros del método de la Soil Conservation Service para abstracciones (SCS). 38
Tabla 4.1. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 24 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm. 40
Tabla 4.2. Descripción de los Parámetros del Modelo de la cuenca para el programa HEC-HMS. 42
Tabla 4.3. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (1 de 3). 43
Tabla 4.4. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (2 de 3). 43
Tabla 4.5. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (3 de 3). 44
Tabla 4.6. Caudales máximos de las diferentes cuencas hidrográficas. 48
Tabla 4.7. Diámetro de Partículas del Río Lechugal. 61
Tabla 4.8. Parámetros Hidráulicos necesarios para analizar la Socavación General en puentes. 75
Tabla 4.9. Coeficiente de Frecuencia "$\boldsymbol{\beta}$". 77
Tabla 4.10. Factor de Corrección por Contracción "$\boldsymbol{\mu}$". 77
Tabla 4.11. Análisis de Socavación General del Río Lagarto. 79
Tabla 4.12. Análisis de Socavación General del Río Paján. 81
Tabla 4.13. Análisis de Socavación General del Río Las Tablas. 83
Tabla 4.14. Análisis de Socavación General del Río Las Tablas (Posible Solución). 85
Tabla 4.15. Análisis de Socavación General del Río Lechugal. 87

CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR

Yo, **Mateo Sebastián Centeno Dávila**, autor de la tesis "**ANALISIS HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO PARA LOS PUENTES EN ZONAS DE INUNDACIÓN GENERADAS POR EL PROYECTO "PACALORI""**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniero Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Marzo del 2015

Mateo Sebastián Centeno Dávila

C.I: 010394075-5

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Mateo Sebastián Centeno Dávila, autor de la tesis "**ANALISIS HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO PARA LOS PUENTES EN ZONAS DE INUNDACIÓN GENERADAS POR EL PROYECTO "PACALORI**"", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Marzo del 2015

Mateo Sebastián Centeno Dávila

C.I: 010394075-5

DEDICATORIA

El presente trabajo dedico a todos quienes me apoyaron en este largo camino por la Universidad y fueron mi soporte para no decaer en esta etapa importante de mi vida. A mis padres Fausto y Lorena por su apoyo incondicional, por haber sido mis guías y por haberme enseñado a luchar por mis sueños, a mi hermana María del Cisne por sus consejos y comprensión. A mi familia y amigos que forman parte de mi vida, por todo su cariño y su apoyo para ser cada día una mejor persona.

Mateo.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sentido de gratitud en primer lugar a Dios; a mi Director de tesis, el Ing. Cristian Coello, ya que con su conocimiento y experiencia colaboró con el desarrollo del presente trabajo, a más de su apoyo y tiempo dedicado. A los Profesores de la Facultad, ya que gracias a sus conocimientos impartidos he podido culminar este proyecto y a todas las personas que intervinieron en la ejecución de este trabajo.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO PARA LOS PUENTES EN ZONAS DE INUNDACIÓN GENERADAS POR EL PROYECTO "PACALORI".

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto "PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DE AGUA, DE LA PROVINCIA DE LOS RÍOS-PACALORI" ejecutado por el Programa para el Manejo del Agua y Suelo "PROMAS" de la Universidad de Cuenca, prevé el diseño de trece presas y dos trasvases ubicados en los ríos Quevedo y Calabí, con el fin de dotar agua para riego a una superficie aproximada de 110.000ha del cual se verán beneficiadas más de 100.000 personas.

La región que abarca el proyecto cuenta con una red vial extensa que permite la comunicación entre su población, beneficiándose los sectores de producción agrícola, haciendo que la actividad económica dependa fundamentalmente de la vialidad y su sistema.

Con el proyecto se pretende incrementar vías de comunicación, sean estos accesos a los diferentes puntos de interés como lo son las obras hidráulicas y obras de control a través de la readecuación de vías que se verán afectadas por los embalses que se producirían con las presas del proyecto, en el cual se ve intervenido los sistemas de drenaje tanto de obras de arte mayor como las obras de arte menor.

Por medio de este estudio se pretende hacer un análisis hidrológico e hidráulico del sistema de drenaje de obras de arte mayor, que se verán afectados por el proyecto dentro del trasvase del río Calabí, estableciendo parámetros y criterios de diseño con la ayuda de sistemas informáticos como HEC-HMS y HEC-RAS para los diferentes puntos de interés del proyecto afectados principalmente por la formación de los embales previstos de cada presa, así como, también por crecientes que se producen con frecuencia en ríos principales de la región.

Se debe mencionar que para el desarrollo de este tema se cuenta con información básica completa y consta de los resultados del estudio de Hidrología de la fase de factibilidad del proyecto elaborado por "PROMAS"

Universidad de Cuenca, el cual permitirá llevar a cabo un estudio más integrado y que para su ejecución cuenta con inspecciones de campo, levantamiento de información especializada y la base cartográfica-topográfica esencial para la ejecución de este tema de tesis.

2. ANTECEDENTES

2.1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio hidrológico-hidráulico para el sistema de drenaje de obras de arte mayor en zonas de inundación del Trasvase Calabí, dentro del Proyecto “PACALORI” ubicado en la Provincia de los Ríos.

2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis espacial de cuencas hidrográficas importantes hacia puntos del diseño del drenaje vial principal.
- Realizar un análisis hidrológico y determinación de parámetros morfométricos e hidrológicos en puntos de interés.
- Aplicar el método SCS para la generación de parámetros de diseño.
- Realizar la modelación hidrológica del sistema mediante la aplicación del modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) y determinación de hidrogramas de diseños en ríos y quebradas principales.
- Desarrollar un estudio hidráulico de sitios específicos, análisis topográfico del tramo de interés, secciones transversales, rugosidad del lecho y modelación hidráulica con HEC-RAS para obtención de parámetros hidráulicos característicos.
- Realizar un análisis de socavación general aplicando métodos recomendados por el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Publicas del Ecuador).
- Analizar y discutir los resultados obtenidos.

- Establecer recomendaciones y conclusiones de la investigación.

2.2. ALCANCE

El tema de estudio que se va a llevar acabo, pretende dar parámetros y criterios técnicos para el diseño del sistema de drenaje de obras de arte mayor como los puentes que atraviesan las zonas inundadas del proyecto, basándose en normativas de diseño y con la ayuda de programas informáticos como HEC-HMS y HEC-RAS que permitan modelar por medio de parámetros hidrológicos e hidráulicos la dinámica fluvial de los ríos, para con ello establecer criterios y garantizar el buen funcionamiento de estas estructuras ante la ocurrencia de eventos extremos.

2.3. JUSTIFICACIÓN

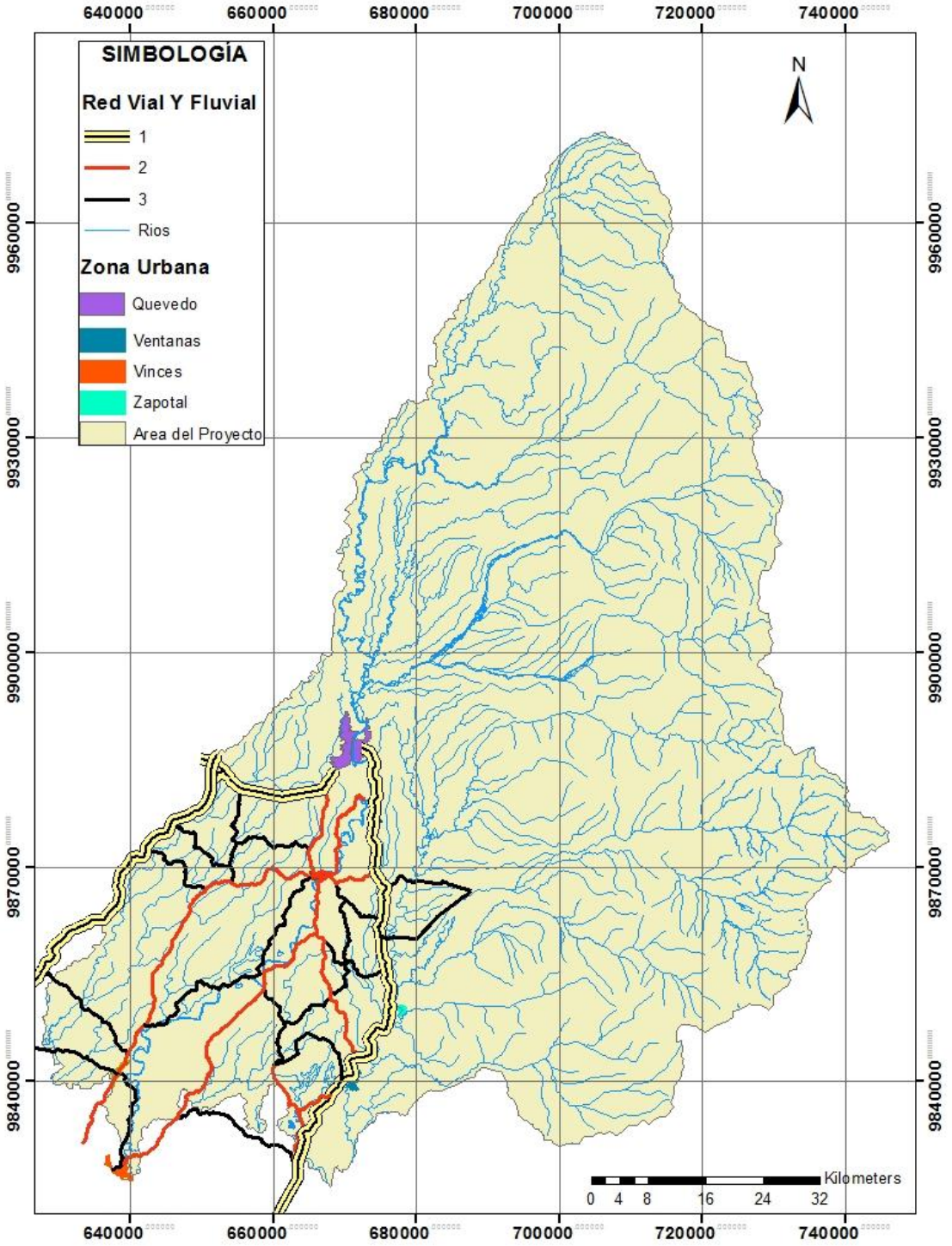
El presente tema fue seleccionado debido al interés y requerimiento del proyecto PACALORI en evaluar los puentes existentes que atraviesan por la zona de influencia del trasvase Calabí, de tal manera de disponer de recomendaciones técnicas sobre el estado actual de dichas obras a partir de un análisis desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, ya que en un proyecto de esta magnitud la vialidad debe contemplarse con un estudio completo y diseño de las estructuras de drenaje, con el fin de aportar y establecer los criterio de diseño de dichos sistemas y con ello garantizar el servicio y vida útil de las estructuras en sí, considerando adicionalmente el impacto ambiental que puedan ocasionar la ejecución de estas obras.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto PACALORI se encuentra ubicado en la Provincia de los Ríos, localizada en la región Costa del Ecuador, en la zona centro occidental del país. Cuenta con poblados como: Mocache, Aguas Frías de Mocache, San Carlos, Palenque, Zapotal, Recinto Lechugal, Puerto Pechiche, Ventanas y Pueblo Viejo (ver Ilustración 3.1).

Ilustración 3.1. Representación Gráfica del Proyecto PACALORI.



Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

El principal acceso al proyecto es a través de la vía primaria, que atraviesa la ciudad de Babahoyo, capital de la provincia (zona sur del proyecto) y la ciudad de Quevedo (zona norte del proyecto), y a su vez se ramifica en vías secundarias, terciarias y caminos vecinales que permiten el acceso a los diferentes puntos de interés.

3.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.2.1. CARTOGRAFÍA

Este proyecto cuenta con Cartografía Base del Instituto Geográfico Militar (IGM) tanto en formato digital como en cartográfica impresa a escala 1:50.000 y cartografía a detalle 1:1.000 correspondiente a información levantada en LIDAR

3.2.2. TOPOGRAFÍA

Con respecto al levantamiento topográfico, la información fue obtenida de un estudio levantado en LIDAR.

Para este estudio se contó con planos topográficos a diferente escala 1:1.000, 1:50.000 y 1:250.000, con separación de curvas de nivel, cada dos metros, cuarenta metros y doscientos metros.

3.2.3. HIDROGRAFÍA

Para la información hidrográfica fue impartida por el Instituto Geográfico Militar (IGM), a escala 1:50.000.

3.2.4. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

El Programa para el Manejo del Agua y Suelo *"*PROMAS*"* de la Universidad de Cuenca, cuenta con información existente de datos meteorológicos e hidrológicos de 30 estaciones, publicados anualmente por el INAMHI en su mayoría y otras entidades competentes en menor extensión.

Esta información se fundamentó en datos de lluvias máximas de 24 horas, lo suficientemente amplias como para poder realizar un análisis estadístico. A estos datos se han aplicado diferentes distribuciones probabilísticas (Gumbel, Frechet, Lognormal y Weibull) y se han escogido las distribuciones que mejor comportamiento guardan con las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov presentados en el informe de hidrología del proyecto. Luego, en función de las relaciones de lluvias intensas de tiempos cortos con las de 24 horas de duración para estaciones de las cuencas de los ríos Quevedo (Vinces) y Zapotal (Calabí-Catarama) según las ecuaciones del INAMHI, previamente rectificadas para unificar el rango de duraciones, se determinan

los porcentajes de lluvia caída en cada duración con relación al 100% caído en 24 horas, que se verá más adelante (PROMAS, 2014).

Para el análisis de este tema, de las 30 estaciones se escogió la estación de Pichilingue y la de Babahoyo, por ser las más cercanas a los diferentes puntos de estudio y las que poseen la mejor información de la zona tanto en calidad como en series de larga data. A continuación, en la Tabla 3.1 se describe la ubicación UTM de las dos estaciones meteorológicas antes mencionadas.

Tabla 3.1. Descripción de las estaciones meteorológicas empleadas para los diferentes puntos de interés del proyecto.

CÓDIGO	ESTACIÓN	UTM X (m)	UTM Y (m)	ALTITUD (msnm)
M006	Pichilingue	9878373	671167	79
M051	Babahoyo	9804716	663144	7

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

De estas dos estaciones, la estación de Pichilingue es la de mayor influencia debido a la corta distancia que presenta con respecto a los puntos de estudio, por esta razón se prestará mayor interés a dicha estación.

3.2.5. RESULTADOS GENERALES DEL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA DEL PROYECTO RESCATADOS PARA LA INVESTIAGACIÓN

A continuación se presentan las intensidades de lluvias máximas de 24 horas para las dos estaciones de interés rescatadas del estudio de Hidrología de la fase de Factibilidad del proyecto PACALORI.

Tabla 3.2. Intensidades máximas diarias para diferentes períodos de retorno en mm/h.

ESTACIÓN	Pichilingue	Babahoyo
CÓDIGO	M006	M051
n	47	13
T AÑOS	Wiebull	Lognormal
2	4.95	5.19
5	5.89	6.05
10	6.35	6.45
20	6.70	6.77
25	6.80	6.86
50	7.08	7.10
100	7.32	7.32

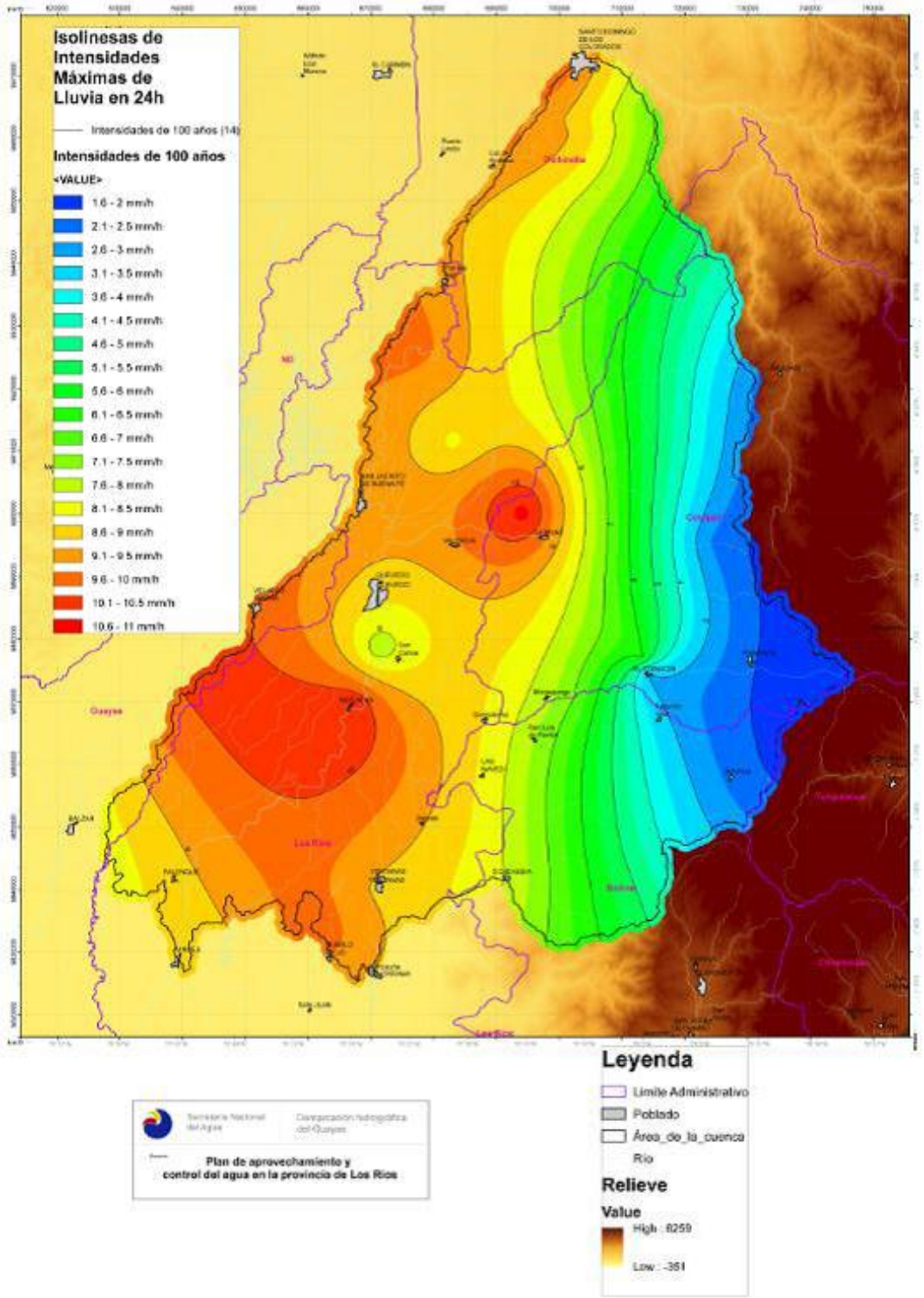
Elaborado por: Mateo Centeno Dávila
Fuente: (PROMAS, 2014)

A más de estas intensidades, se cuenta con mapas de isolíneas de intensidades máximas de diferente periodo de retorno, las de 5, 50 y 100 años. Para efectos de estudio se utilizará el mapa de isolíneas de 100 años de retorno (ver Ilustración 3.2).

Los porcentajes de lluvia caída en diferentes tiempos con relación a la lluvia caída en 24 horas, son presentados en la Tabla 3.3, tanto para la estación de Pichilingue como la estación de Babahoyo. Estos porcentajes corresponden al hietograma unitario esperado en la zona del proyecto que se verá más adelante.

En la Tabla 3.2 se puede apreciar que las intensidades de lluvia de la estación de Pichilingue y Babahoyo para un periodo de retorno de 100 años son las mismas, sin embargo los porcentajes de lluvia caída expuestos en la Tabla 3.3 difieren para las dos estaciones, por esta razón se utilizará las dos estaciones para cálculos posteriores.

Ilustración 3.2. Isolíneas de intensidades máximas de lluvias de 24 horas en las cuencas de los ríos Quevedo y Zapotal para 100 años de periodo de retorno.



Fuente:(PROMAS, 2014).

Tabla 3.3. Porcentaje de lluvia caída en un tiempo t con relación al 100% caído en 24 horas.

t (min)	LLUVIA (%)	
	Estación Pichilingue	Estación Babahoyo
5	7.73	9.76
10	14.20	17.63
15	19.72	24.13
20	24.48	29.60
25	28.63	34.26
30	32.30	38.29
35	35.56	41.82
40	38.48	44.93
45	41.11	47.69
50	43.51	50.17
55	45.69	52.40
60	47.69	54.43
70	51.23	57.96
80	54.27	60.96
90	56.93	63.53
100	59.26	65.76
110	61.34	67.72
120	63.20	69.46
140	66.41	72.42
160	69.09	74.85
180	71.36	76.88
185	71.88	77.34
210	74.22	79.40
240	76.58	81.44
270	78.57	83.15
300	80.28	84.60
360	83.11	86.95
420	85.36	88.79
480	87.21	90.28
540	88.78	91.53
600	90.14	92.59
720	92.38	94.33
840	94.19	95.71
960	95.70	96.84
1080	96.99	97.80
1200	98.11	98.63
1320	99.11	99.35
1440	100.00	100.00

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila
Fuente:(PROMAS, 2014).

3.3. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS AFECTADOS DEL PROYECTO

El proyecto al estar conformado por un área relativamente grande y por ende con una gran cantidad de accesos viales (Ilustración 3.1), cuenta con varios puntos de drenaje, pero por motivos de estudio se seleccionó: sitios con mayor riesgo de inundación, lugares donde existe la presencia de obras de arte mayor como puentes o cajones, y que hidrológicamente representan un área de drenaje con gran capacidad de escurrimiento superficial.

Este estudio cuenta con un total de veinte y cinco puntos afectados indicados en la Tabla 3.4, de los cuales se pondrá mayor interés en puentes cuya ubicación se identifica en la Ilustración 3.3**.**

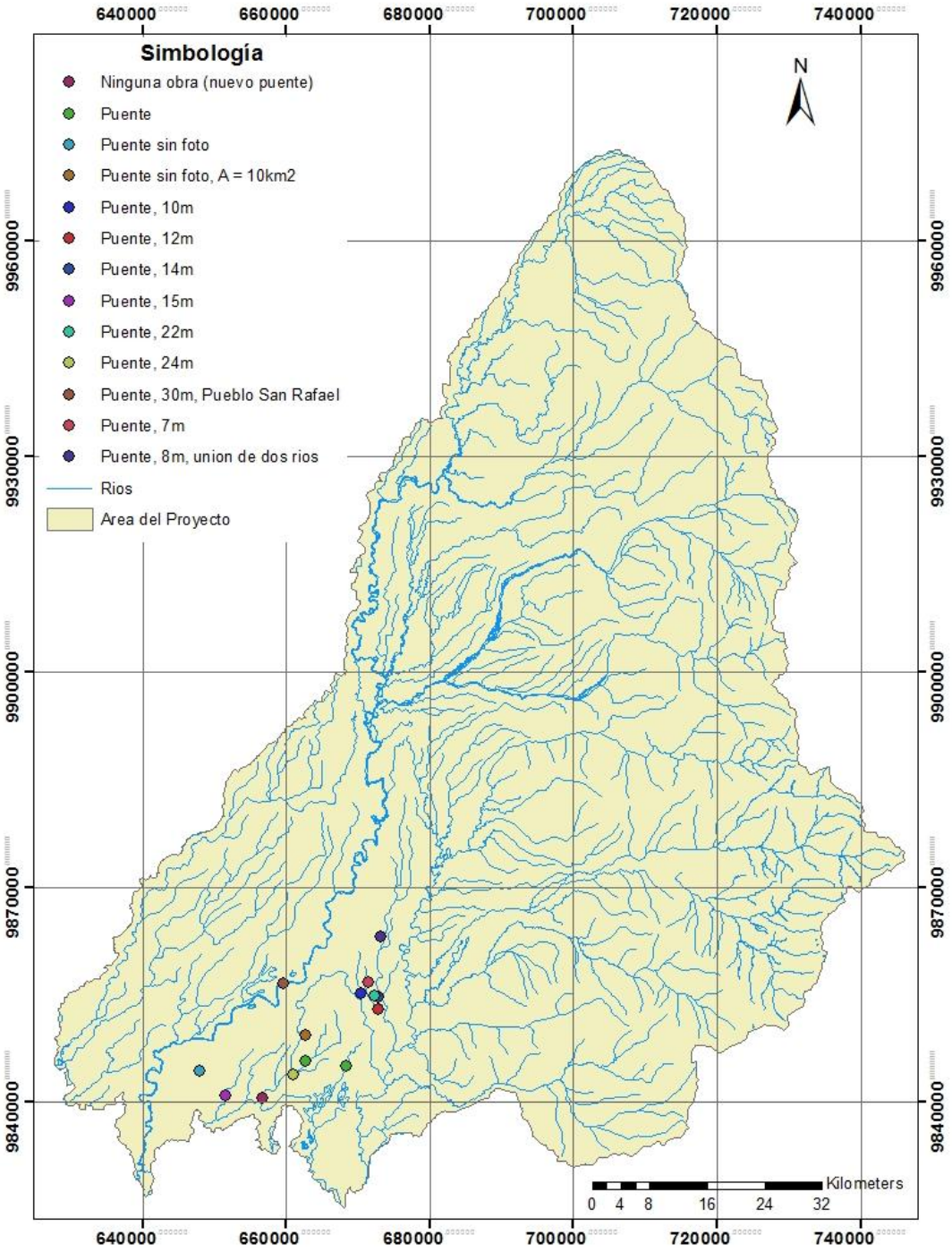
Tabla 3.4. Descripción de los Puntos afectos del proyecto.

ID	UTM X (m)	UTM Y (m)	OBSERVACIONES
1	668234	9845013	Puente
2	667598	9845697	Cajón
3	667243	9845857	Cajón
4	666469	9845865	Cajón
5	662669	9845669	Puente
6	660900	9843757	Puente, 24m
7	660047	9840449	Cajón doble de 2x2, vía asfaltada
8	656537	9840602	Ninguna obra (nuevo puente)
9	655905	9841745	Alcantarilla
10	654129	9840175	Cajón doble de 2x2
11	651383	9840835	Puente, 15m
12	648825	9838414	Triple Alcantarilla, Φ=3m, vía asfaltada
13	650076	9841062	Cajón doble de 2x2
14	651278	9842335	Alcantarilla
15	647887	9844416	Puente
16	662647	9849316	Puente, A = 10km^2
17	673055	9863024	Puente, 8m, unión de dos ríos
18	672811	9854652	Puente, 14m
19	673309	9854738	Alcantarilla
20	672252	9854761	Puente, 22m
21	671304	9856689	Puente, 7m
22	659537	9856531	Puente, 30m, Pueblo San Rafael
23	670307	9855150	Puente, 10m
24	672811	9852976	Puente, 12m
25	672917	9851313	Alcantarilla

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

La Tabla 3.4 describe los diferentes puntos seleccionados del proyecto ya sean estructuras de arte menor o de arte mayor, junto con sus respectivas coordenadas UTM-WGS 84.

Ilustración 3.3. Puntos de Interés afectados del proyecto.



Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

La toma de coordenadas de datos (puntos de interés) se lo realizó por medio del GPS diferencial (Global Position System) y con la ayuda de la cartografía en formato digital utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.1.

3.4. DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

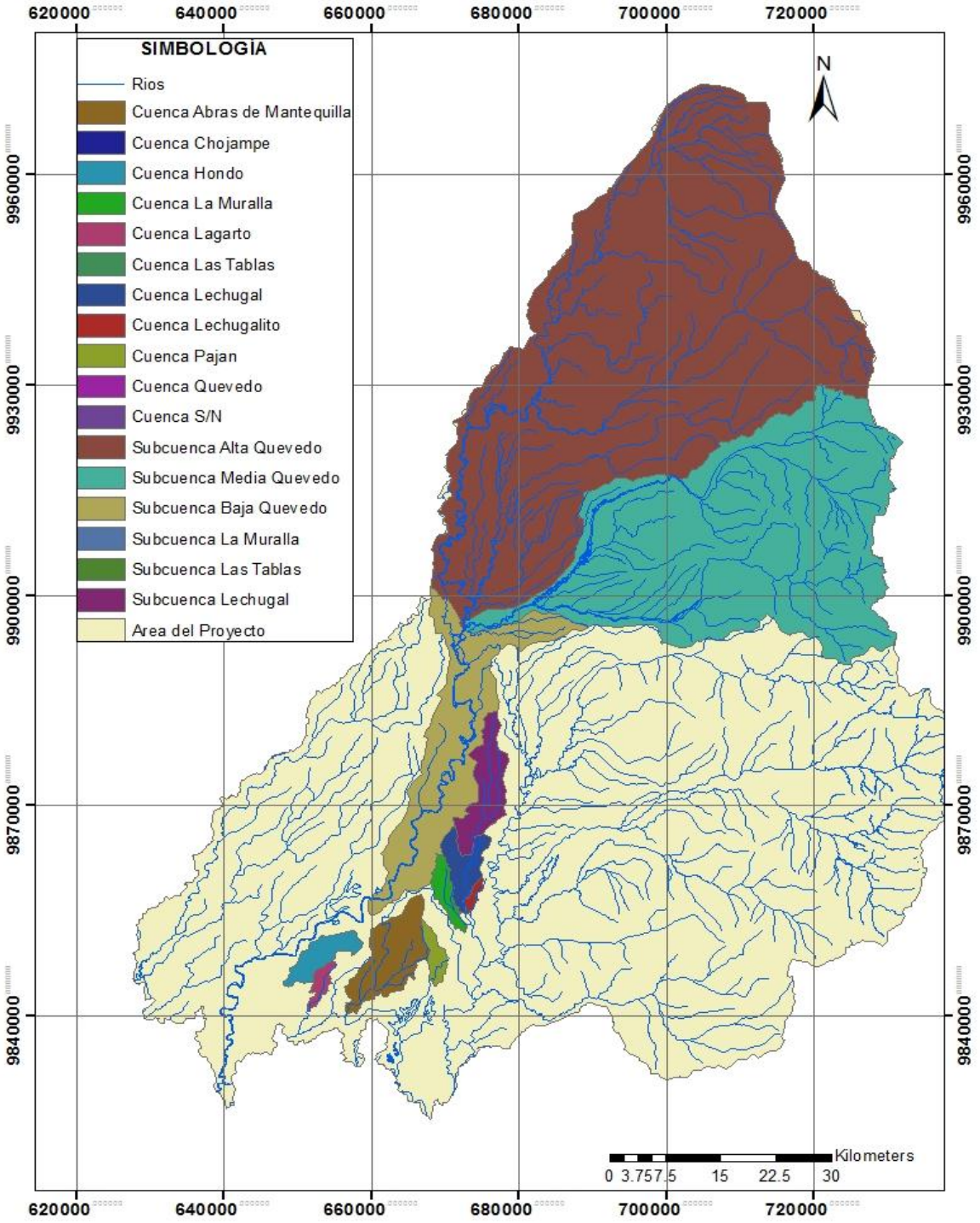
3.4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Al existir diferentes puntos de drenaje en el proyecto, se tendrán varias cuencas hidrográficas por estudiar, algunas de estas cuencas serán parte de otras llegando a conformar subcuencas, para dar un total de catorce cuencas hidrográficas (Ilustración 3.4).

Para la cuenca del río Quevedo se optó por dividir en tres subcuencas: la subcuenca alta Quevedo, la subcuenca media Quevedo y la subcuenca baja Quevedo con el propósito de proyectar el tránsito de la crecida en este río y con ello obtener mejores resultados al momento de realizar los estudios hidrológicos.

Las cuencas hidrográficas fueron determinadas por medio de la topografía disponible en formato digital empleando el programa ArcGIS 10.1; utilizando el formato “Shapefile” de tipo polígono, y con el comando “Straight Segment” delimitar la cuenca siguiendo el parteaguas o divisoria de la cuenca.

Ilustración 3.4. Delimitación y Ubicación de las Cuenca Hidrográficas.



Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

3.4.1.1. ÁREA Y PERÍMETRO DE LA CUENCA

El área de la cuenca (A) se define como la superficie en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (APARICIO MIJARES, 1992). Y el perímetro de la cuenca (P) se define como la longitud del contorno de la cuenca hidrográfica.

Por medio del GIS se determinaron las diferentes áreas de drenaje, al igual que el perímetro que conforman las cuencas, utilizando la opción “Calculate Geometry” ubicado en la Tabla de Atributos que contiene la capa de las cuencas de interés. El resultado de estos parámetros se expone en la Tabla 3.5.

3.4.1.2. LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL

La longitud del cauce (L) representa la distancia horizontal en metros del río principal, entre un punto aguas arriba donde la tendencia general del cauce corte la línea de contorno de la cuenca y otro punto aguas abajo (punto de aforo).

Para las cuencas hidrográficas del proyecto, la longitud del cauce principal se obtuvo por medio del comando “Measure” ubicada en la Barra de Herramientas del GIS. Estos valores se presentan en la Tabla 3.5.

3.4.1.3. DESNIVEL ALTITUDINAL

El desnivel altitudinal (Δh), consiste en la diferencia entre la cota más alta y la cota más baja de la cuenca, representada en metros.

La determinación del desnivel altitudinal se lo realizó a través de la topografía existente, ubicando de manera manual la cota más alta y menos baja de las respectivas cuencas, estos resultados se indican en la Tabla 3.5.

3.4.1.4. PENDIENTE MEDIA

La pendiente media (m), refleja la tasa de cambio de elevación con respecto a la distancia a lo largo del flujo principal (McCUEN, 1998).

La pendiente media se determinó a través del GIS, utilizando un Modelo de Elevación Digital que debe contener un archivo vectorial de la cuenca (formato shape) y un archivo tipo Raster (Tiff), para con ello crear un mapa de pendientes que permitirá interpolar las curvas de nivel existentes en el área de estudio por medio del comando “Slope” e “Interpolate Shape” respectivamente. Por último, realizar un promedio estadístico de todas las pendientes que

comprenden dicha área a través del comando “Zonal Estatistics as Table” para tener como resultado la pendiente promedio de la cuenca.

En la Tabla 3.5 se encuentran representadas las pendientes promedios expresadas en porcentaje para las diferentes cuencas.

Tabla 3.5. Parámetros Morfométricos que presentan las diferentes cuencas hidrográficas.

# Cuenca	A	P	Δh	L	m
	(km^2)	(km)	(m)	(m)	(%)
SN	2.4	8.6	32	2259	42.97
Lechugalito	5.6	13.5	40	5952	27.49
S. La Muralla	12.5	21.2	44	9966	7.28
Lagarto	11.8	21.6	20	8676	14.79
Paján	16.4	22.9	32	8649	20.00
La Muralla	21.1	30.6	54	15560	8.84
S. Las Tablas	21.1	24.3	34	11045	16.55
Chojampe	21.7	22.8	32	9802	19.54
Hondo	35.0	33.3	20	14536	13.42
Las Tablas	32.6	31.4	36	15193	14.24
Abras de Mantequilla	92.6	52.3	44	21500	7.72
S. Lechugal	70.2	54.4	62	24381	6.45
Lechugal	108.7	74.9	74	36874	8.82
Quevedo	3726.9	374.2	4050	216247	5.76
S. Alta Quevedo	2183.9	238.0	3080	143388	3.96
S. Media Quevedo	1208.0	196.2	4000	78455	13.32
S. Baja Quevedo	334.9	150.7	110	72859	1.76

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

3.4.1.5. ÍNDICES: COMPACIDAD, FORMA, DENSIDAD DE DRENAJE, RELACIÓN DE ELONGACIÓN

Existen índices o coeficientes que ayudan a entender el comportamiento de la red hidrográfica, los principales índices son:

Coeficiente de Compacidad (Cc): Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca, y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca hidrográfica, expresada por la ecuación 3.1.

$$C_C = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3.1)$$

Dónde:

C_C: Coeficiente de Compacidad

P: Perímetro de la cuenca, en metros

A: Área de la cuenca, en metros cuadrados

En el caso para $C_C = 1$ indica que la cuenca es de forma circular (simétrica) con lo que existe la posibilidad de producir avenidas superiores.

Índice de forma de Horton (Ff): Relación que existe entre el área de la cuenca (A), y el cuadrado de la longitud del cauce principal (L).

$$F_f = \frac{A(m^2)}{L^2(m)} \tag{3.2}$$

Para valores menores a la unidad indica cuencas alargadas, mientras que cercano a uno muestran formas redondeadas.

Densidad de Drenaje (Dd): Está definida como la relación entre la longitud total de todos los cauces de la cuenca en proyección horizontal $(\sum l_i)$, y la superficie total de la cuenca (A).

$$D_d = \frac{\sum l_i(m)}{A(m^2)} \tag{3.3}$$

Según (HERNÁNDEZ, 2006) para valores cercanos a $0.5km\ km^{-2}$ pertenece a una cuenca pobremente drenada, mientras que valores de $3.5km\ km^{-2}$ o mayores, indican una cuenca con drenaje eficiente.

Relación de Elongación (Re): Relación propuesta por (SHUMM, 1956) entre el diámetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca y la longitud máxima del cauce principal, expresado de la siguiente manera:

$$R_e = 1.128\frac{\sqrt{A}}{L_c} \tag{3.4}$$

Dónde:

R_e: Relación de Elongación

A: Área de la cuenca, en metros cuadrados

L_C: Longitud máxima del cauce principal, en metros

Valores próximos a la unidad indicaran formas redondeadas y cuanto más cerca a cero, serán más alargadas.

Los índices expuestos anteriormente se encuentran en la Tabla 3.6 para las diferentes cuencas que pertenecen al proyecto.

Tabla 3.6. Determinación de los Índices de Compacidad, de Forma, Densidad de Drenaje y de Relación de Elongación.

# Cuenca	Cc	Ff	Dd	Re
SN	1.573	0.462	1.952	0.767
Lechugalito	1.607	0.158	3.318	0.448
S. La Muralla	1.693	0.125	1.157	0.399
Lagarto	1.770	0.157	1.486	0.446
Paján	1.596	0.219	1.241	0.528
La Muralla	1.874	0.087	1.159	0.333
S. Las Tablas	1.493	0.173	1.085	0.469
Chojampe	1.378	0.226	0.805	0.537
Hondo	1.586	0.166	1.481	0.459
Las Tablas	1.550	0.141	1.959	0.424
Abras de Mantequilla	1.534	0.200	1.671	0.505
S. Lechugal	1.832	0.118	1.230	0.388
Lechugal	2.025	0.080	1.231	0.319
Quevedo	1.728	0.080	0.560	0.318
S. Alta Quevedo	1.436	0.106	0.520	0.368
S. Media Quevedo	1.592	0.196	0.602	0.500
S. Baja Quevedo	2.323	0.063	0.672	0.283

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Los índices referidos en la Tabla 3.6, al igual que los parámetros hidrológicos, también son calculados para las subcuencas de la cuenca del río Quevedo.

3.5. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y USOS DE SUELO

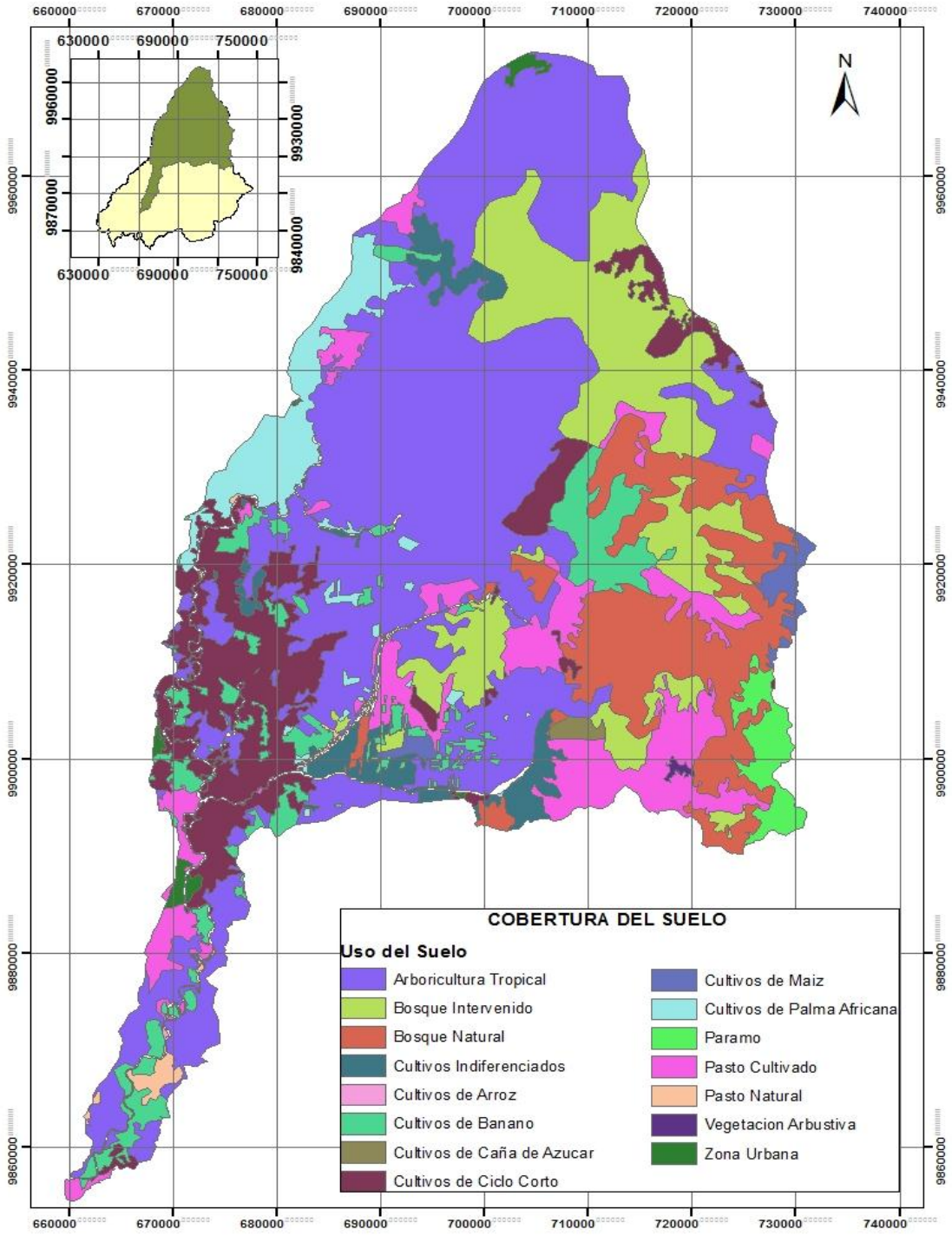
3.5.1. DETERMINACIÓN DE USOS DE SUELO

Para determinar los diferentes usos de suelo, se contó con información digital del mapa de usos de suelo existentes en la zona a escala 1:250000, con ello, por medio del programa ArcGIS 10.1 delimitar a través de polígonos los usos de suelo respectivos para cada cuenca utilizando el comando “Straight

Segment" y por consiguiente determinar las áreas respectivas de los suelos de manera similar a como se obtuvo las áreas de las cuencas.

A continuación en la Ilustración 3.5, como ejemplo, se presenta el mapa de usos de suelo para la cuenca del río Quevedo, por ser una cuenca representativa para la determinación de estos parámetros.

Ilustración 3.5. Mapa de Usos de Suelo para la cuenca del río Quevedo.



Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Los usos de suelo predominantes de la cuenca del río Quevedo son: la arboricultura tropical con un 43.10%; seguido de bosque intervenido y bosque natural con un 26.33%; los cultivos de arroz, cultivos de banano, cultivos de caña de azúcar, etc., representan un 22.00%; mientras que en menor cantidad se encuentra el pasto cultivado y pasto natural con un 8.57%.

3.6. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS

3.6.1. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Es el tiempo que tarda en llegar el agua desde el punto más alejado de la cuenca que produce escorrentía, al punto de desagüe o cierre de la cuenca.

Existen varios métodos para determinar el tiempo de concentración, pero el método que se empleó para este estudio fue el método de Kirpich debido a su sencillez y amplia utilización, descrito en la ecuación 3.5.

$$T_C = 0.0195 \times \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (3.5)$$

Dónde:

T_C: Tiempo de concentración, expresado en minutos.

L: Longitud del cauce principal, en metros

H: Desnivel altitudinal de la cuenca, en metros

Para las diferentes cuencas el tiempo de concentración se encuentra expuesto en la Tabla 3.10.

3.6.2. TIEMPO DE RETARDO

Es definido como la longitud de tiempo que existe entre el centroide de la precipitación neta y el pico máximo del Hidrograma Resultante (USACE, 2000), expresado en la ecuación 3.6.

$$t_r = \frac{2.587 \times L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{1900 \times H^{0.5}} \quad (3.6)$$

Dónde:

t_r: Tiempo de Retardo, en horas

L: Longitud de cauce principal, en metros

CN: Número de curva

H: Pendiente media de la cuenca, en porcentaje

Los tiempos de retardo que presentan las cuencas se encuentran detallados en la Tabla 3.10.

3.6.3. NÚMERO DE CURVA

El Número de Curva fue desarrollado como un índice que representa la combinación entre un grupo de suelo hidrológico, el uso de suelo y las condiciones de humedad (McCUEN, 1998).

Existen tres tipos de condiciones antecedentes de humedad, que dependen de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta expuestos en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Condiciones de Humedad publicada por la Soil Conservation Service (SCS).

CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE (ACM)	PRECIPITACIÓN TOTAL EN LOS 5 DÍAS PREVIOS AL EVENTO (cm)
I	0 - 3.30
II	3.50 - 5.25
III	Más de 5.25

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Para el caso de suelos secos se considera las condiciones de humedad antecedente de tipo I, para suelos con condiciones medias se considera un suelo tipo II y para suelos completamente saturados se considera las condiciones de humedad tipo III.

A más de las condiciones de humedad, la Soil Conservation Service define cuatro grupos de suelo:

Grupo A: Arena, limos, suelos profundos depositados por el viento con escaso potencial de escorrentía.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, potencial de escorrentía moderada.

Grupo C: Suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla, potencial de escorrentía medio.

Grupo D: Suelos expansivos, arcillas altamente plásticas con elevado potencial de escorrentía.

En la

Tabla 3.8 se muestran los números de curva aplicados para condiciones antecedentes de humedad media (ACM II).

Tabla 3.8. Número de Curva para condiciones antecedentes de humedad II e Ia=0.2S, según (UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972).

Uso de la tierra o cubierta	Tratamiento o práctica	Condiciones hidrológicas	Grupo hidrológico			
			A	B	C	D
Barbecho	en surco	deficientes	77	86	91	94
Cultivos en líneas	en surco	deficientes	72	81	88	91
	en surco	buenas	67	78	85	89
	en fajas a nivel	deficientes	70	79	81	88
	en fajas a nivel	buenas	65	75	82	86
	en fajas a nivel & terreno	deficientes	66	74	80	82
	en fajas a nivel & terreno	buenas	62	71	78	81
Cereales	en surco	deficientes	65	76	84	88
	en surco	buenas	63	75	83	87
	en fajas a nivel	deficientes	63	74	82	85
	en fajas a nivel	buenas	61	73	81	85
	en fajas a nivel & terreno	deficientes	61	72	79	82
	en fajas a nivel & terreno	buenas	59	70	78	81
Leguminosa muy densas o praderas en rotación	en surco	deficientes	66	77	85	89
	en surco	buenas	58	72	81	85
	en fajas a nivel	deficientes	64	75	83	85
	en fajas a nivel	buenas	55	69	78	83
	en fajas a nivel & terreno	deficientes	63	73	80	83
	en fajas a nivel & terreno	buenas	51	67	76	80
Pastos		deficientes	68	79	86	89
		regulares	49	69	79	84
		buenas	39	61	74	80
	en faja a nivel	deficientes	47	67	81	88
	en faja a nivel	regulares	25	59	75	83
	en faja a nivel	buenas	6	35	70	79
Praderas (permanentes)		Buenas	30	58	71	78
Bosques		deficientes	45	66	77	83
		regulares	36	60	73	79
		buenas	25	55	70	77
Granjas			59	74	82	86
Carreteras sin afirmar			72	82	87	89
Carreteras afirmadas			74	84	90	92

Para el proyecto, por tratarse de una superficie en donde las condiciones de humedad por lo general son medias, se asumirá las condiciones de tipo II y suelo tipo C, al ser un suelo con potencial de escorrentía moderado y según la muestra de suelos analizados en el proyecto.

Además, existen varios grupos de suelo que abarcan a las cuencas de estudio. Cada tipo de suelo tiene un valor diferente de número de curva, en el cual cada área debe comprender un solo valor que represente a toda la cuenca de interés; para ello el número de curva se determina mediante un promedio ponderado de todos los valores de número de curva existentes en esa área. En

la Tabla 3.9 se presenta los diferentes valores de número de curva que contiene cada área de estudio.

Tabla 3.9. Número de Curva que presentan las cuencas hidrológicas de interés.

# Cuenca	NÚMERO DE CURVA(CN)								
	Pasto Cultivado (ha)	CN	Cultivos (ha)	CN	Arboricultura (ha)	CN	Bosque (ha)	CN	CN PONDERADO
S/N	235.9	79							79.0
Lechugalito	559.4	79							79.0
S.La Muralla	1245.2	79							79.0
Lagarto	106.0	79	1073.0	84					83.6
Paján	536.0	79	994.0	84	107.0	73			81.7
La Muralla	2112.6	79							79.0
S.Las Tablas	190.0	79	1918.7	84					83.5
Chojampe	536.0	79	1542.8	84	95.0	73			82.3
Hondo	1560.0	79	1944.8	84					81.8
Las Tablas	300.0	79	2964.2	84					83.5
Abras de Mantequilla	2876.2	79	6287.1	84	94.9	73			82.3
S. Lechugal	60.0	79	125.0	84	6831.9	73			73.2
Lechuga	60.0	79	173.0	84	10641.2	73			73.2
Quevedo	31938.0	79	81988.3	84	160639.0	73	98120.0	73	75.9
S. Alta Quevedo	5224.5	79	61608.9	84	113282.0	73	38279.2	73	76.2
S. Media Quevedo	22137.4	79	23263.0	84	15557.3	73	59840.8	73	76.2
S. Baja Quevedo	5896.4	79	13428.8	84	14164.1	73			78.5

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Como se puede apreciar en la Ilustración 3.5, existe una gran variedad de usos de suelo en la cuenca del río Quevedo, y de igual manera para las demás cuencas del proyecto, pero para poder utilizar la

Tabla 3.8 muchos de estos suelos tendrán que ser clasificados en cuatro grupos que abarquen a toda esta clasificación, como lo indica la Tabla 3.9, es decir, todos los suelos como: cultivos de ciclo corto, cultivos de maíz, cultivos de arroz, etc., serán clasificados como “cultivos”; para los suelos como pastos cultivados se clasificarán como “pastos” y los suelos de bosques naturales, bosques intervenidos, arboricultura o vegetación arbustiva se asumirán como “bosques”.

A continuación en la Tabla 3.10 se presenta un resumen de los índices hidrológicos que contienen las cuencas hidrográficas.

3.6.4. RESUMEN DE LOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Tabla 3.10. Determinación de los Índices Hidrológicos.

# CUENCA	Tc (min)	Tr (min)	CN PONDERADO
SN	38.40	14.895	79.0
Lechugalito	107.89	40.423	79.0
S. La Muralla	188.62	118.641	79.0
Lagarto	217.72	64.301	83.6
Paján	181.03	58.772	81.7
La Muralla	291.63	153.768	79.0
S. Las Tablas	234.57	73.816	83.5
Chojampe	209.18	64.396	82.3
Hondo	395.15	108.292	81.8
Las Tablas	331.63	102.733	83.5
Abras de Mantequilla	458.43	191.724	82.3
S. Lechugal	464.52	305.090	73.2
Lechugal	699.75	363.652	73.2
Quevedo	1156.20	693.72	75.9
S. Alta Quevedo	799.31	479.59	76.2
S. Media Quevedo	360.19	216.11	76.2
S. Baja Quevedo	1319.07	1204.40	78.5

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

3.7. RESPUESTA LLUVIA-ESCORRENTÍA

La respuesta lluvia-escorrentía consiste en calcular la escorrentía que se va a generar cuando se suscita una precipitación determinada, para ello se debe separar de la precipitación total la lluvia neta o precipitación efectiva, que es la precipitación que va a producir el escurrimiento superficial.

Para calcular los caudales esperados en sitios de interés, se debe evaluar la tormenta de diseño que regirá el comportamiento hidrológico, y con ello poder determinar los hidrogramas de diseño.

Existen modelos informáticos que permiten analizar el comportamiento lluvia-escorrentía, en donde se introducen parámetros físicos a más de los datos de precipitación, siendo uno de estos y recomendado mundialmente el modelo matemático HEC-HMS.

3.8. PRECIPITACIÓN EFECTIVA

3.8.1. MÉTODO DE LA SOIL CONSERVATION SERVICE PARA ABSTRACCIONES (SCS)

Este método se desarrolló en 1972 por el Soil Conservation Service donde la escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la precipitación total P, y consiste en el momento que la escorrentía comienza, en el cual el agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a la retención potencial máxima S y que además existe una cantidad de agua que se infiltra o se encharca conocido como abstracción inicial I_a, la cual no produce escorrentía. Siendo la escorrentía potencial igual a la precipitación total P menos la abstracción inicial I_a (CHOW, 1988).

La hipótesis de este método se basa en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, expresadas en las siguientes ecuaciones.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \tag{3.7}$$

Basado en el principio de continuidad se tiene que:

$$P = P_e + I_a + F_a \tag{3.8}$$

Por lo tanto, la escorrentía directa P_e puede escribirse como:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \tag{3.9}$$

A partir de varios estudios realizados en cuencas experimentales se determinó que las abstracciones iníciales representan un 20% de la retención potencial máxima, es decir:

$$I_a = 0.2 \times S \tag{3.10}$$

Donde la retención potencial máxima está relacionada con el Número de Curva *CN*, por la siguiente relación expresada en milímetros:

$$S = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1\right) \tag{3.11}$$

Para este estudio los parámetros que tendrán interés son las abstracciones iníciales y la retención potencial máxima, presentadas en la tabla siguiente.

Tabla 3.11. Parámetros del método de la Soil Conservation Service para abstracciones (SCS).

# CUENCA	CN	S (mm)	I_a (mm)
S/N	79.0	67.52	13.50
Lechugalito	79.0	67.52	13.50
Sub .La Muralla	79.0	67.52	13.50
Lagarto	83.6	49.89	9.98
Paján	81.7	57.04	11.41
La Muralla	79.0	67.52	13.50
Sub .Las Tablas	83.5	50.01	10.00
Chojampe	82.3	54.68	10.94
Hondo	81.8	56.61	11.32
Las Tablas	83.5	50.04	10.01
Abras de Mantequilla	82.3	54.48	10.90
Sub. Lechugal	73.2	92.77	18.55
Lechuga	73.2	92.96	18.59
Quevedo	75.9	80.50	16.10
Sub. Alta Quevedo	76.2	79.13	15.83
Sub. Media Quevedo	76.2	79.26	15.85
Sub. Baja Quevedo	78.5	69.70	13.94

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Los valores de las abstracciones iníciales (I_a) según la Tabla 3.11 son bajos, debido a la consideración del número de curva (CN) y el tipo de suelo, esto conlleva a tener resultados, que estarán del lado de la seguridad.

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

4.1.1. ELABORACIÓN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

Para la elaboración del Hietograma de diseño se contó con información existente de los porcentajes de lluvia caídos en diferentes tiempos con relación a la lluvia caída en 24 horas de las estaciones de Pichilingue y Babahoyo (ver Tabla 3.3), al ser las más representativas para el proyecto. La estación de Pichilingue abarca a la gran mayoría de las cuencas, a excepción de la cuenca Lagarto y Abras de Mantequilla, que son representadas por la estación de Babahoyo.

Al tener la información de la lluvia caída en porcentajes se utilizó las intensidades máximas diarias para un periodo de retorno de 100 años de las estaciones de Pichilingue y Babahoyo (Tabla 3.2), a más del mapa de isolíneas de intensidades máximas para los mismos 100 años (usada en la subcuenca media del río Quevedo al estar situada en zonas con menores rangos de intensidades de 5.58mm como lo indica la Ilustración 3.2) y con ello determinar los hietogramas respectivos.

Este proyecto al estar conformado por diferentes cuencas hidrológicas que varían tanto en su tamaño como en sus parámetros hidrológicos; principalmente el tiempo de concentración (t_c), al ser este tiempo el que define a los periodos del hietograma, hace que se amplíen varios hietogramas, que a su vez producen un mejor resultado al momento de determinar los hidrogramas de diseño y caudales máximos. Los hietogramas contienen periodos de 1 hora, 6 horas, 12 horas y 24 horas tanto para la estación de Pichilingue como la estación de Babahoyo, con la excepción de que la estación de Babahoyo no se tomó en cuenta el hietograma con periodo de 1 hora, debido a que las cuencas que representa esta estación son áreas relativamente grandes con tiempos de concentración mayores a una hora como para ser analizadas con un periodo de esta magnitud. Como ejemplo se presenta en la

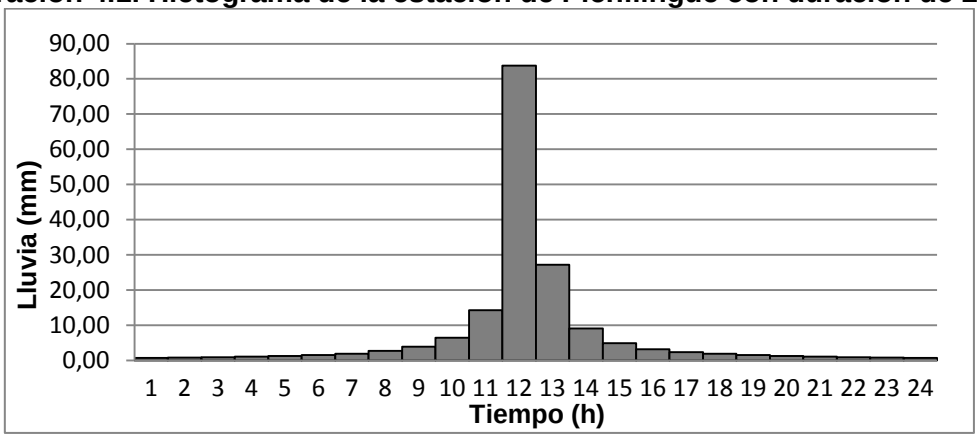
Tabla 4.1 los valores del hietograma de 24 horas para la estación de Pichilingue junto con su respectiva gráfica en la Ilustración 4.1.

Tabla 4.1. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 24 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido (mm)
60	83.78	0.78
120	111.03	0.88
180	125.37	0.98
240	134.54	1.13
300	141.04	1.33
360	146.01	1.59
420	149.96	1.97
480	153.21	2.76
540	155.97	3.95
600	158.36	6.50
660	160.33	14.34
720	162.29	83.78
780	163.88	27.25
840	165.47	9.17
900	166.80	4.97
960	168.13	3.25
1020	169.26	2.39
1080	170.39	1.97
1140	171.38	1.59
1200	172.36	1.33
1260	173.24	1.13
1320	174.12	0.98
1380	174.90	0.88
1440	175.68	0.78
PRECIPITACIÓN TOTAL		175.68

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Ilustración 4.1. Hietograma de la estación de Pichilingue con duración de 24hrs.



Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Los demás hietogramas calculados para las diferentes cuencas hidrográficas se presentan en Anexos.

4.1.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON HEC-HMS PARA DETERMINAR LOS HIDROGRAMAS DE DISEÑO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

El sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de los sistemas de cuencas. A demás, está diseñado para ser aplicado en un amplio rango de áreas geográficas para la solución de la más amplia gama de problemas, los resultados se pueden utilizar para el estudio de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observaciones de flujo, análisis de eventos extremos, etc. (USACE, 2000).

4.1.2.1. COMPONENTES DE HEC-HMS

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el programa HEC-HMS cuenta con los siguientes componentes: modelos de cuenca (cuenca de drenaje), modelos meteorológicos, especificaciones de control, y series de tiempo para el análisis de crecientes.

MODELO DE LA CUENCA

El modelo de la cuenca representa la cuenca física, de los cuales utilizaremos la subcuenca como elemento hidrológico, caracterizando a cada una de ellas. Los parámetros utilizados para el programa de modelación son los siguientes:

Tabla 4.2. Descripción de los Parámetros del Modelo de la cuenca para el programa HEC-HMS.

SUBBASIN (CUENCA)		
Area (km^2)	Área	Superficie de la cuenca
Loss Method	Método de Perdidas	SCS Curve Number: Separa la Pneta de la Ptotal
Transform Method	Método de Transformación	SCS Unit Hydrograph: Convertir la Pneta en Escorrentía
Baseflow Method	Método del Flujo Base	Recesión: Suma el caudal base al Hidrograma Resultante
LOSS (PERDIDAS)		
Initial Abstraction (mm)	Abstracciones Iniciales	I_a: Representa el 20% de la Retención Potencial Máxima (S)
Curve Number	Número de Curva	CN
Impervios (%)	Impermeabilidad	Rango entre (0 a 5)%: Para un valor de 5% indica ser muy impermeable (Roca)
TRANSFORM (HIDROGRAMA)		
Graph Type	Tipo de Gráfico	Standard: Aplicable para cualquier área. Delmarva: Áreas planas con excesiva precipitación.
Lag Time (mim)	Tiempo de Retardo	t_r
BASEFLOW (FLUJO BASE)		
Initial Discharge (m^3/s)	Descarga Inicial	Caudal Base
Recession Constant	Constante de Recesión	Disminución del Caudal Base cada día. El rango de valores comprende de (0.1-0.99)
Threshold Type	Umbral de escurrimiento	Ratio to Peak: Caudal Umbral a partir del cual el programa comienza a computar una nueva recesión
Ratio	Proporción	Referente al Ratio to Peak. Rango entre (0-1). Ej: 0.1=10% del Caudal de Punta

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Con los parámetros expuestos en la Tabla 4.2 aplicamos para las diferentes cuencas del proyecto, indicadas a continuación.

Tabla 4.3. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (1 de 3).

	CUENCA					
Subbasin	**SN**	**Lechugalito**	**S. La Muralla**	**Lagarto**	**Paján**	**La Muralla**
Area (km^2)	2.36	5.59	12.45	11.79	16.37	21.13
Loss Method	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number
Transform Method	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph
Loss						
I_a (mm)	13.50	13.50	13.50	9.98	11.41	13.50
CN	79.0	79.0	79.0	83.6	81.7	79.0
Imper (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transform						
GraphType	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva
T_r (mim)	14.895	40.423	118.641	64.301	58.772	153.768
Baseflow						
I. Discharg (m^3/s)	2	5	5	5	6	8
Recession Constant	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Threshold Type	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak
Ratio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Tabla 4.4. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (2 de 3).

	CUENCA					
Subbasin	**S. Las Tablas**	**Chojampe**	**Hondo**	**Las Tablas**	**Abras de Mantequilla**	**S. Lechugal**
Area (km^2)	21.09	21.74	35.05	32.64	92.58	70.17
Loss Method	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number
Transform Method	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph
Loss						
I_a (mm)	10.00	10.94	11.32	10.01	10.90	18.55
CN	83.5	82.3	81.8	83.5	82.3	73.2
Imper (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transform						
GraphType	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva	Delmarva
Tr (mim)	73.816	64.396	108.292	102.733	191.724	305.090
Baseflow						
I.Discharg (m^3/s)	8	8	12	12	15	13
Recession Constant	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Threshold Type	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak
Ratio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Tabla 4.5. Parámetros de los Modelos de las Cuencas utilizados en el programa HEC-HMS (3 de 3).

	CUENCA				
Subbasin	**Lechugal**	**Quevedo**	**S. Alta Quevedo**	**S. Media Quevedo**	**S. Baja Quevedo**
Area (km^2)	108.74	3726.85	2183.95	1207.98	334.89
Loss Method	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number	SCS Curve Number
TransformMethod	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph
Loss					
Ia (mm)	18.59	16.10	15.83	15.85	13.94
CN	73.2	75.9	76.2	76.2	78.5
Imper (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transform					
GraphType	Delmarva	Standard	Standard	Standard	Delmarva
Tr (mim)	363.652	1713.910	1474.485	496.692	1204.406
Baseflow					
I. Discharge (m^3/s)	15	30	20	10	30
RecessionConstant	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ThresholdType	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak	Ratio To Peak
Ratio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila.

Para la gran mayoría de las cuencas, el tipo de gráfico empleado para la modelación fue el método Delmarva al presentar el proyecto áreas planas con una excesiva precipitación en la zona y con evidencia de inundaciones, mientras la cuenca de Quevedo, Subcuenca Alta Quevedo y Subcuenca Media Quevedo se utilizó el grafico Standard.

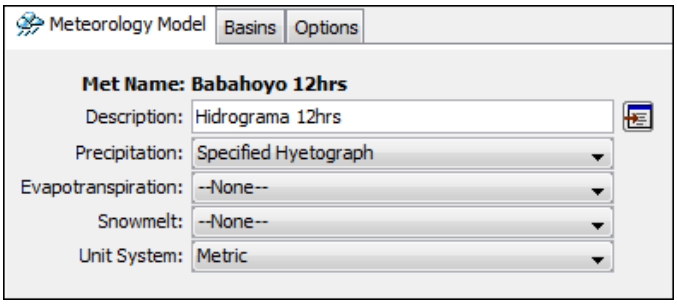
MODELOS METEOROLÓGICOS

El propósito principal es preparar las condiciones de contorno meteorológicas para subcuencas. Un modelo meteorológico puede ser usado en varios modelos de cuenca (USACE, 2000).

Dentro de los modelos meteorológicos podemos especificar el tipo de precipitación, métodos para la evapotranspiración y para el deshielo. Sin embargo para esta modelación solo indicamos el tipo de precipitación (ver Ilustración 4.2) en el cual se ingresa los datos del Hietograma (Specified Hyetograph). Los modelos meteorológicos se crean previamente y se

introducen sus datos en la opción de Datos de Series de Tiempo (Times Series Data).

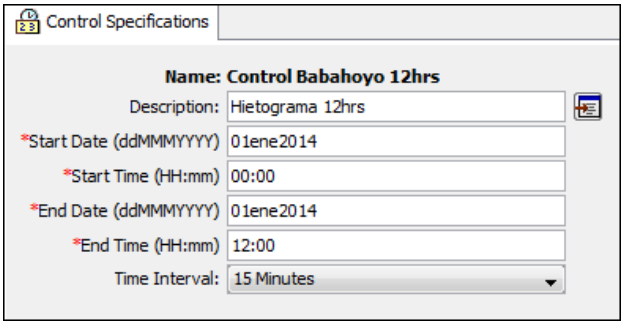
Ilustración 4.2. Especificación del tipo de precipitación utilizado en el programa HEC-HMS.



ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Consiste en indicar cuándo debe empezar y terminar la simulación correspondiente al día que se quiere reproducir un evento real sucedido previamente, de lo contrario, se puede identificar cualquier fecha para una predicción, junto con el incremento de tiempo (Time Interval) que determina cada cuanto tiempo debe realizar el cálculo del hidrograma resultante. A continuación se indica como ejemplo las Especificaciones de Control para la simulación de 12 horas y con un intervalo de tiempo de 15 minutos.

Ilustración 4.3. Especificaciones de Control para la simulación del programa HEC-HMS.



DATOS DE SERIES DE TIEMPO

Una gran porción de los datos, son las mediciones de las condiciones atmosféricas, como la precipitación, temperatura y la radiación solar (USACE, 2000). Existen diferentes tipos de registro de datos (medidores de precipitación, medidores de descarga, medidores de temperatura, etc.), pero para el

programa se utilizara los medidores de precipitación. Dentro de esta componente se debe ingresar el hietograma de diseño antes calculado para la cuenca respectiva (ver Ilustración 4.4), indicando además el intervalo de tiempo con el que están registrados los datos.

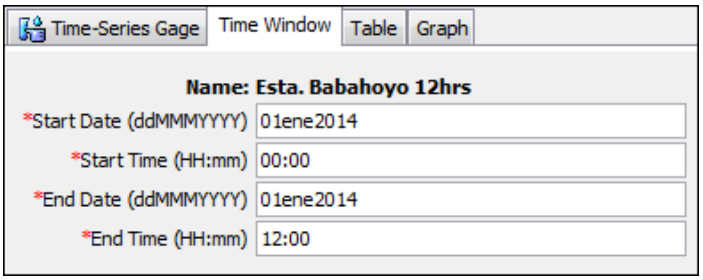
Ilustración 4.4. Hietograma de Diseño para la simulación del programa HEC-HMS.

Time-Series Gage | Time Window | Table | Graph

Time (ddMMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (MM)
01ene2014, 00:00	
01ene2014, 00:30	0.76
01ene2014, 01:00	0.76
01ene2014, 01:30	0.93
01ene2014, 02:00	1.10
01ene2014, 02:30	1.31
01ene2014, 03:00	1.62
01ene2014, 03:30	2.06
01ene2014, 04:00	3.00
01ene2014, 04:30	4.43
01ene2014, 05:00	6.52
01ene2014, 05:30	15.99
01ene2014, 06:00	67.27
01ene2014, 06:30	28.35
01ene2014, 07:00	10.42
01ene2014, 07:30	6.52
01ene2014, 08:00	3.58
01ene2014, 08:30	2.55
01ene2014, 09:00	2.06
01ene2014, 09:30	1.62
01ene2014, 10:00	1.31
01ene2014, 10:30	1.10
01ene2014, 11:00	0.93
01ene2014, 11:30	0.76
01ene2014, 12:00	0.76

Es importante mencionar que para este componente se debe insertar los mismos periodos de simulación utilizados en la componente de Especificaciones de Control. Como referencia del ejemplo de la Ilustración 4.3 se indica en la Ilustración 4.5 el periodo de tiempo utilizado en los datos de serie de 12 horas.

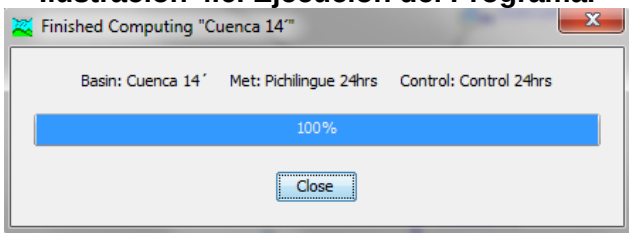
Ilustración 4.5. Datos de Series de Tiempos para la simulación del programa HEC-HMS.



EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Una vez establecidas las componentes del modelo hidrológico, se realiza la simulación o corrida del programa (ver Ilustración 4.6), para ello se debe escoger el modelo de cuenca, el modelo meteorológico, y las especificaciones de control para la cuenca que se desee determinar los hidrogramas.

Ilustración 4.6. Ejecución del Programa.



4.1.2.2. RESULTADOS: HIDROGRAMAS DE DISEÑO

A partir de la modelación en el programa HEC-HMS se detallan los caudales máximos de diseño resultantes con periodo de retorno de 100 años en la Tabla 4.6 para las diferentes cuencas del proyecto.

Tabla 4.6. Caudales máximos de las diferentes cuencas hidrográficas.

# Cuenca	CAUDALES (m^3/s)					
	METODO STANDARD			METODO DELMARVA		
	6hrs	12hrs	24hrs	6hrs	12hrs	24hrs
SN	44.3			33.8		
Lechugalito	76.5			50.0		
S. La Muralla	88.3			53.7		
Lagarto	158.9			97.5		
Paján	196.3			121.1		
La Muralla	137.9			82.4		
S. Las Tablas	232.7			141.4		
Chojampe	247.4			153.4		
Hondo		341.7			183.8	
Las Tablas		309.3			185.7	
Abras de Mantequilla			697.2			332.7
S. Lechugal			231.2			135.5
Lechugal			309.4			180.2
Quevedo			2841.6			1639.0
S. Alta Quevedo			1931.7			
S. Media Quevedo			1900.9			
S. Baja Quevedo						223.8
Caudal total producido por las subcuencas de la cuenca del río Quevedo = **2548.7** m^3/s						

Elaborado por: Mateo Centeno Dávila

Los caudales referidos en la Tabla 4.6 están determinados por el tipo de gráfico Standard y tipo Delmarva, con el propósito de revelar una disminución del caudal al aplicar el método Delmarva.

Para la cuenca del río Quevedo, el caudal total aplicando el tránsito se obtiene a partir de la suma de los tres hidrogramas correspondientes a cada subcuenca, es decir, en primera instancia se calcula el “hidrograma A” producto de la suma de la subcuenca alta y la subcuenca media, para luego, por medio del tránsito de hidrogramas simular como si fuera un canal en donde el volumen se mantiene constante pero sufre un efecto de retardo correspondiente al recorrido del agua a lo largo del canal para posteriormente, a este “hidrograma B” producto del tránsito, sumar el “hidrograma C” de la subcuenca baja para obtener como resultado final el hidrograma total.

En las siguientes ilustraciones se muestran los hidrogramas de diseño para las cuencas del proyecto.

Ilustración 4.7. Hidrograma de Diseño para la Cuenca SN.

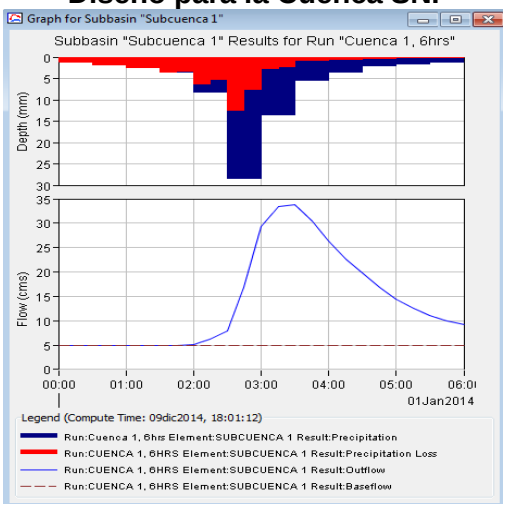


Ilustración 4.8. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lechugalito.

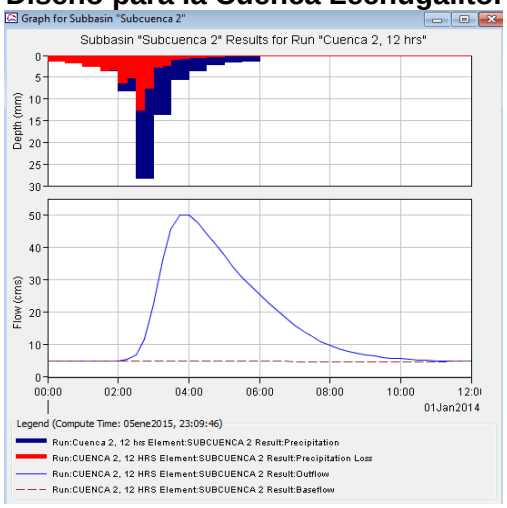


Ilustración 4.9. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca La Muralla.

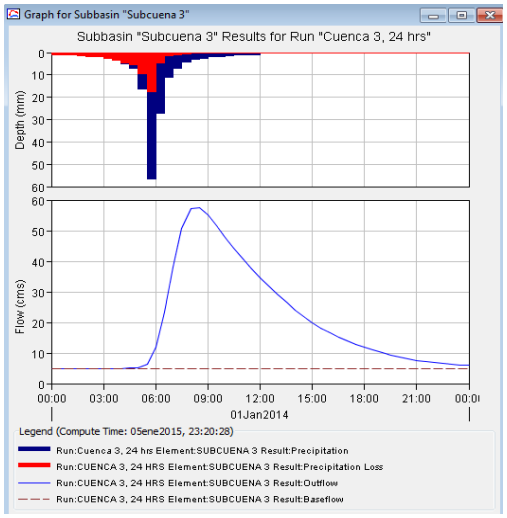


Ilustración 4.10. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lagarto.

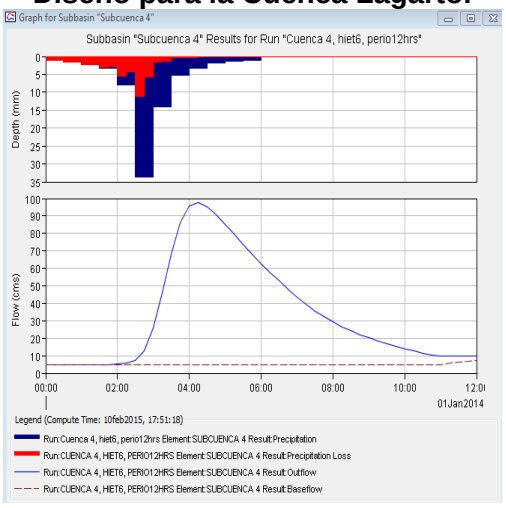


Ilustración 4.11. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Paján.

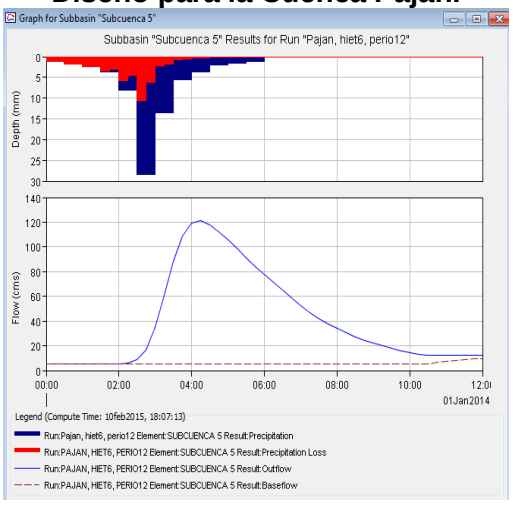


Ilustración 4.12. Hidrograma de Diseño para la Cuenca La Muralla.

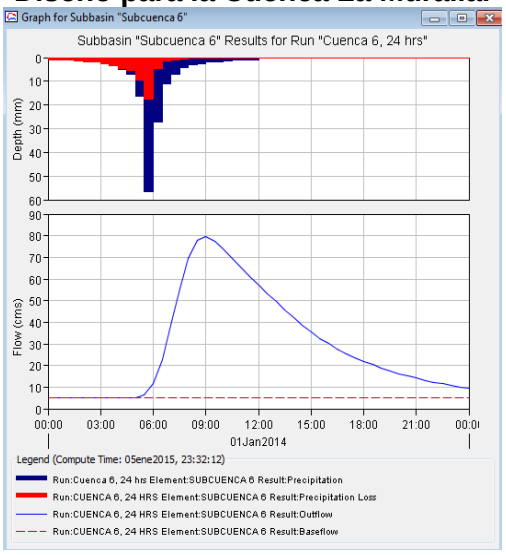


Ilustración 4.13. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Las Tablas.

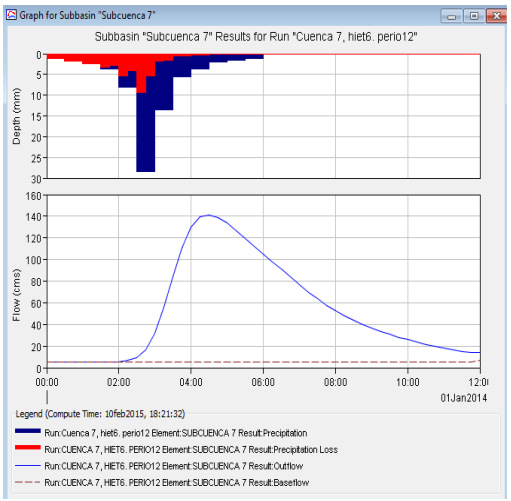


Ilustración 4.14. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Chojampe.

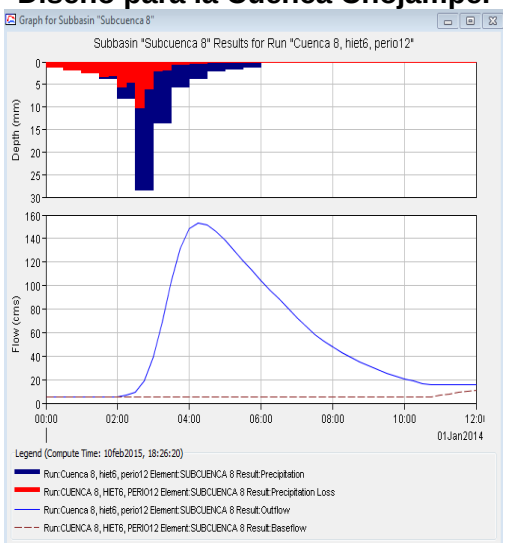


Ilustración 4.15. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Hondo.

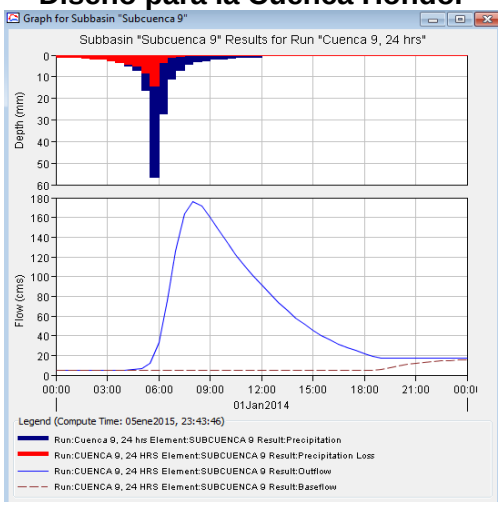


Ilustración 4.16. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Las Tablas.

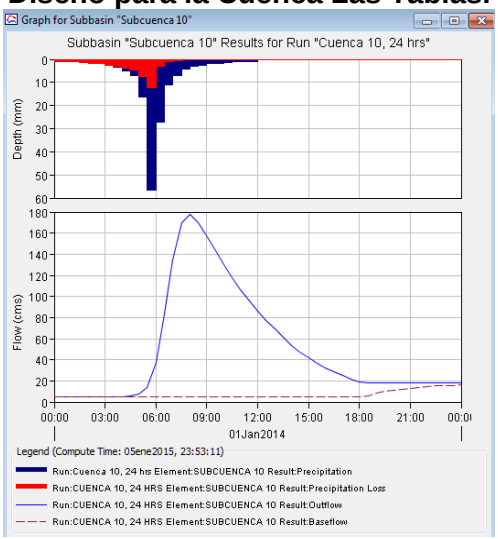


Ilustración 4.17. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Abras de Mantequilla.

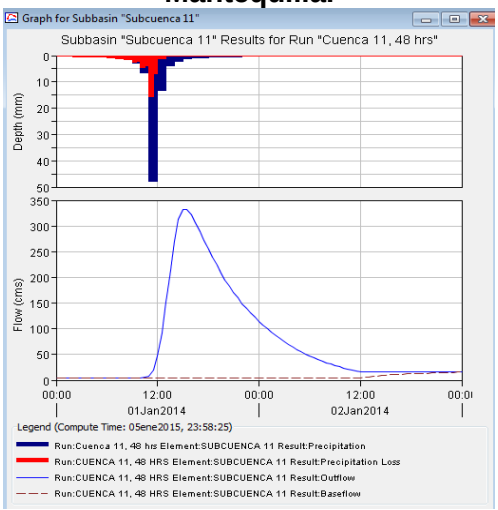


Ilustración 4.18. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Lechugal.

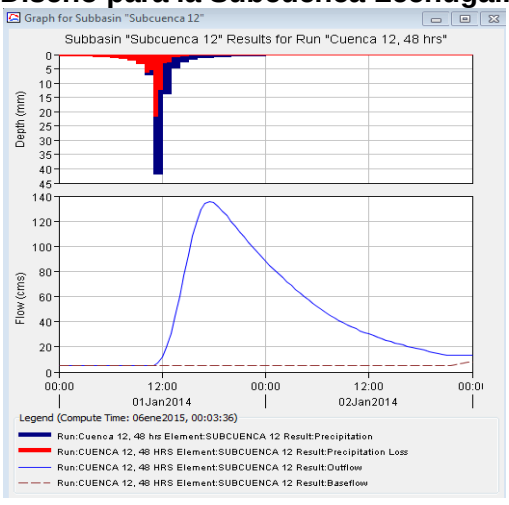


Ilustración 4.19. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Lechugal.

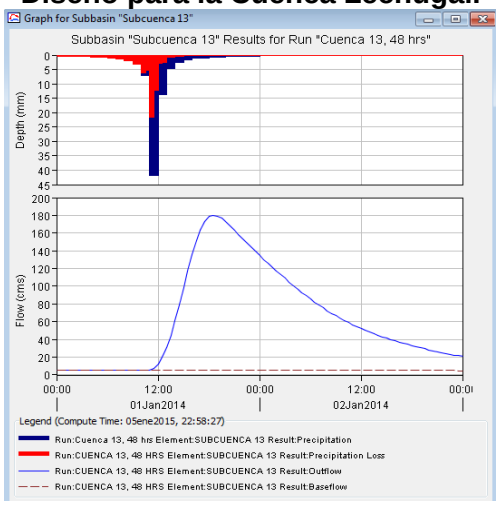


Ilustración 4.20. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Quevedo.

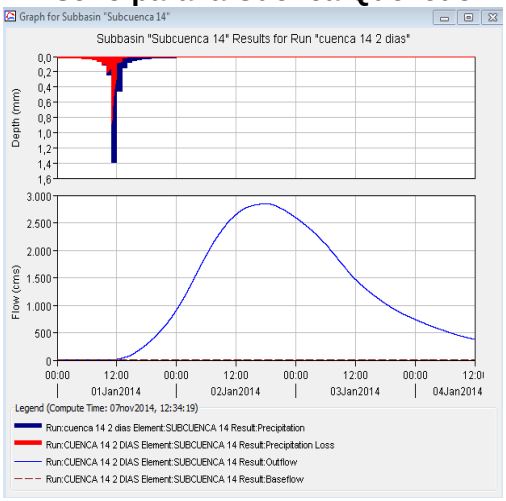


Ilustración 4.21. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Alta.

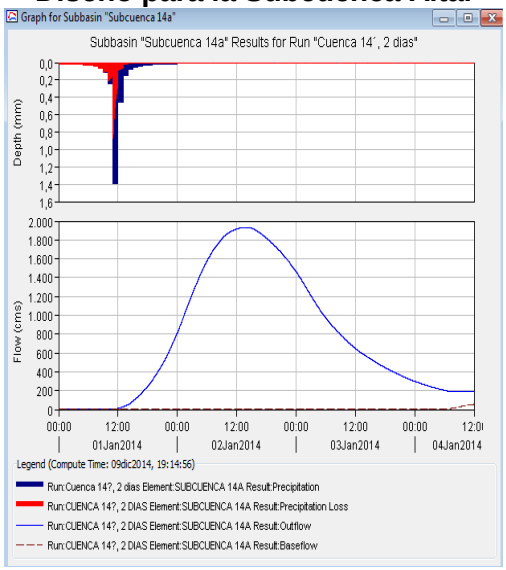


Ilustración 4.22. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Media.

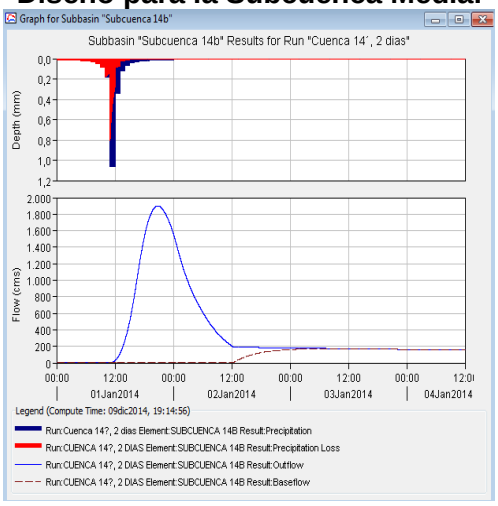


Ilustración 4.23. Hidrograma de Diseño para la Subcuenca Baja.

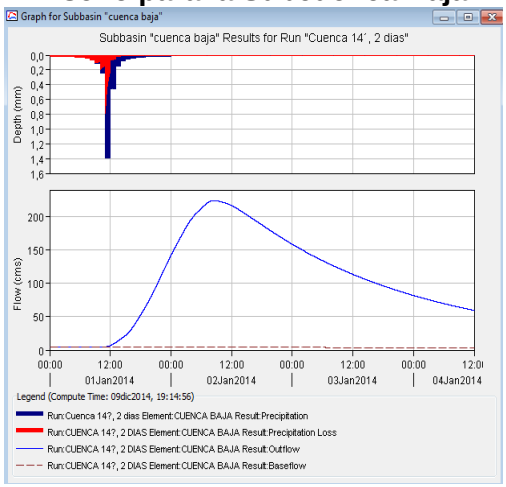
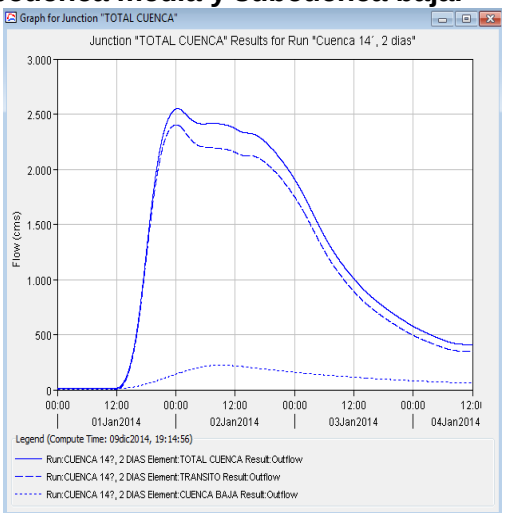


Ilustración 4.24. Hidrograma de Diseño para la Cuenca Quevedo producto de la subcuenca alta, subcuenca media y subcuenca baja.



Los hidrogramas fueron determinados utilizando el método Delmarva al presentar áreas planas que se inundan por un exceso de precipitación, a excepción de la cuenca Quevedo (sin tránsito), la subcuenca alta Quevedo y la subcuenca media Quevedo que emplearon el gráfico Standard por representar cuencas con pendientes pronunciadas.

Observando los hidrogramas de las cuencas, claramente se puede apreciar que en la mayoría de estas gráficas no presentan ser curvas simétricas al existir un rápido crecimiento del caudal antes de llegar al caudal máximo y a partir de este caudal, la recesión demuestra tener tiempos más largos de desfogue, evidenciando la asimetría de estos hidrogramas. Por lo contrario, la cuenca del río Quevedo (sin el efecto del tránsito) y la subcuenca alta del rio Quevedo presenta una curva más simétrica, con tiempos de crecidas y tiempos de recesiones casi semejantes.

Además, tanto la Ilustración 4.20 como la Ilustración 4.24 muestran el hidrograma de la cuenca del río Quevedo, pero con la diferencia que la Ilustración 4.24 representa un hidrograma producto del tránsito de la crecida de las tres subcuencas, estableciendo un valor más real.

4.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO: MODELACIÓN MATEMÁTICA EN HEC-RAS

Para el análisis hidráulico, existen programas de computación que permiten modelar el comportamiento de los perfiles hidráulicos de un río, así como también, parámetros hidráulicos propios del río.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos ha desarrollado el programa conocido como HEC-RAS que permite modelar el flujo del agua en ríos, el cual será utilizado en este proyecto para obtener los parámetros hidráulicos en los diferentes sitios de interés.

El modelo utiliza las ecuaciones de “Saint Venant” de la continuidad y momentum para generar los sistemas de ecuaciones que son resueltos por métodos implícitos de diferencias finitas.

HEC-RAS no implementa directamente las ecuaciones de Saint Venant en su forma tradicional, sino las adapta a la forma típica del cauce y en una llanura de inundación formada por la creciente.

Las ecuaciones de Saint Venant se describen a continuación:

ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD:

Forma conservativa: $$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \quad (4.1)$$

Forma no conservativa: $$V\frac{\partial y}{\partial x}+y\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial t}=0 \quad (4.2)$$

ECUACIÓN DE MOMENTUM:

Forma conservativa: $$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+g\frac{\partial y}{\partial x}-g(S_o-S_f)=0 \quad (4.3)$$

Forma no conservativa: $$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\frac{\partial y}{\partial x}-g(S_o-S_f)=0 \quad (4.4)$$

Dónde:

- Q: Caudal ($m^3\ s^{-1}$)
- A: Área del flujo (m^2)
- V: Velocidad promedio del flujo ($m\ s^{-1}$)
- y: Calado del flujo (m)
- S_o: Pendiente longitudinal del fondo del lecho del canal.
- S_f: Pendiente de fricción.
- g: Aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$)
- x: Distancia en la dirección del flujo (m)
- t: Intervalo de tiempo (s)

En estas ecuaciones no se considera el flujo lateral, fuerza cortante por viento, pérdidas por turbulencia.

Para llegar a la expresión de las ecuaciones de debe partir de las siguientes hipótesis

- Las líneas de corrientes son aproximadamente paralelas, es decir que la distribución de presiones es hidrostática.
- La pendiente del lecho es pequeña, por tanto la profundidad media perpendicular al canal es prácticamente la misma que la medida verticalmente.
- La distribución de velocidades del flujo es uniforme en cada sección, despreciando las variaciones transversales de velocidad dentro de la misma.
- Solo se considera la velocidad en la dirección de alineación del curso del agua.
- Las pérdidas de energía se representan con las mismas expresiones de régimen permanente, como las ecuaciones de Manning o Chezy.

4.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO HEC-RAS

Las principales características del programa son:

- Realizar el cálculo hidráulico sobre el comportamiento de ríos, canales, etc.
- Permite la edición gráfica de secciones transversales de ríos, canales, etc.
- Permite la visualización gráfica de datos y resultados.
- Permiten la modelación hidráulica en régimen permanente y no permanente de ríos y canales.

4.2.2. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE PUENTES PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO

Una vez establecida las condiciones hidrológicas de las cuencas de interés, importantes para la selección de los puentes a analizar, se optó por escoger cuatro ríos: El río Lagarto, el río Paján, el río Las Tablas y el río Lechugal, seleccionados por disponer de la mejor información topográfica de la zona.

4.2.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE DISEÑO

Para la modelación en HEC-RAS se debe disponer de datos geométricos (secciones transversales), hidrológicos (caudales) e hidráulicos (número de Manning). A continuación se describen estos parámetros.

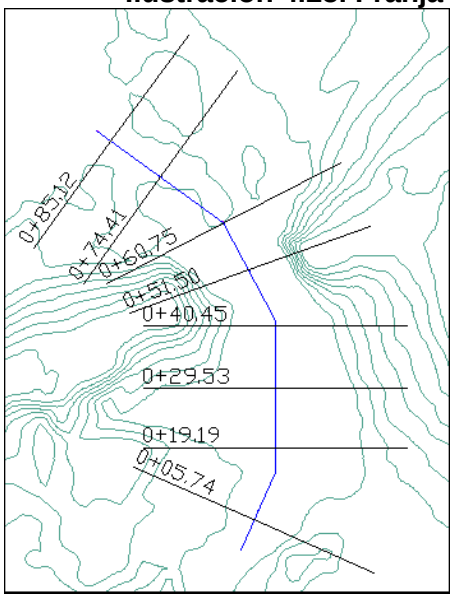
4.2.3.1. SECCIÓN TRANSVERSAL

Las secciones transversales que conforman a lo largo de un cauce son obtenidas a partir de la topografía existente, la cual debe conformar por pares ordenados en el eje “y” (cotas) y en el eje “x” (abscisas), separadas cada una por una distancia determinada.

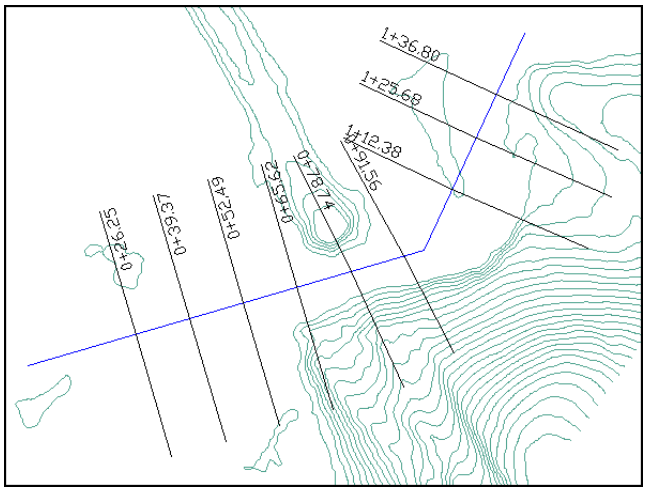
Las secciones transversales se determinaron por medio del programa computacional Civil 3D, el cual consiste en hacer una franja topográfica a partir de las curvas de nivel, para con ello, por medio del comando “Alignment” formar un alineamiento o eje del cauce, que sirve para establecer las secciones transversales empleando el comando “Sample Lines” que caracteriza el ancho y la separación de las secciones.

En la Ilustración 4.25 se muestran las diferentes franjas topográficas para cada punto de interés que contiene el eje del río y las secciones transversales vistas en planta.

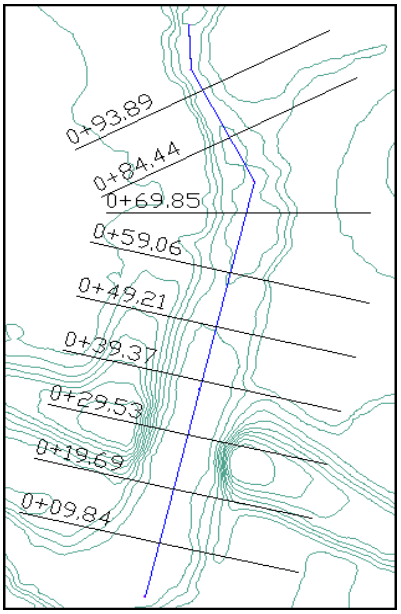
Ilustración 4.25. Franja Topográfica y Secciones Transversales.



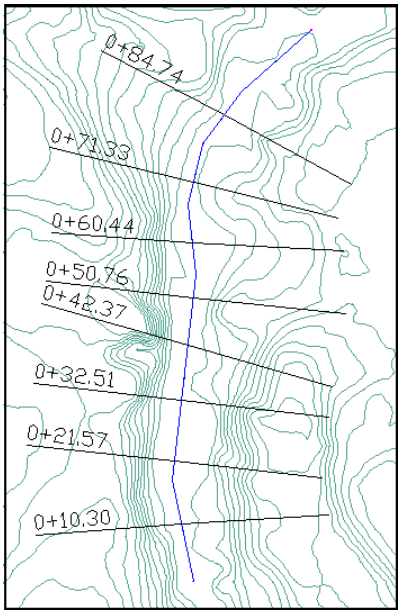
a) Franja Topográfica Río Lagarto



b) Franja Topográfica Río Paján



c) Franja Topográfica Río Las Tablas

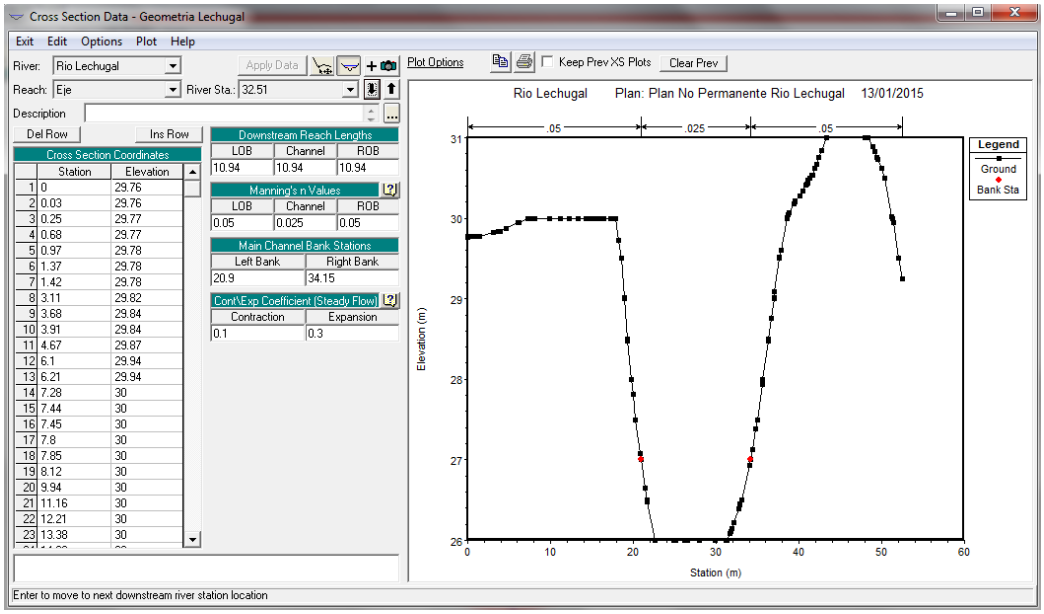


d) Franja Topográfica Río Lechugal

En la Ilustración 4.25: (a) el puente se encuentra emplazado en la abscisa 0+51.50, (b) el puente está situado en la abscisa 0+78.74, (c) el puente está ubicado en la abscisa 0+49.21 y (d) el puente se sitúa en la abscisa 0+42.37.

Con las secciones transversales determinadas en Civil 3D, los pares ordenados de los puntos que conforman las secciones transversales son exportados al programa HEC-RAS a través de la herramienta “Export to HEC RAS” que contiene el Civil 3D. Una vez exportada las secciones al programa HEC-RAS se comienza a editar dichas secciones como lo indica la Ilustración 4.26 expuesta a continuación.

Ilustración 4.26. Datos Geométricos de Secciones Transversales.



Los datos a configurar en la geometría de las secciones son: las coordenadas de los puntos que describen a la sección (Cross Section Coordinates), la distancia hasta la siguiente sección aguas abajo (Downstream Reach Lenghts), el valor de Manning, acotación del canal principal (Main Channel Bank Stations) y el coeficiente de contracción y expansión (Cont\Exp Coefficient) recomendado 0.1 para contracción y 0.3 para expansión (USACE, 2010).

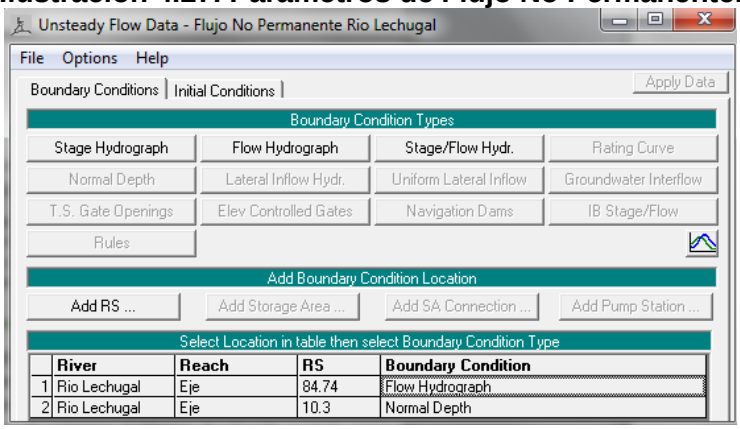
4.2.3.2. ANÁLSIS DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

El flujo gradualmente variado se presenta en canales irregulares en donde la descarga no varía con el tiempo, y además existen cambios graduales en el tirante o la sección. El tirante del flujo se calcula a partir de datos conocidos de la descarga, las dimensiones y la rugosidad del canal. Este tipo de flujo el área, la rugosidad, la pendiente del fondo y el radio hidráulico varían muy poco a lo largo del canal (VICTOR L. STREETER, E. BENJAMIN WYLIE, 1988).

Dentro de HEC-RAS existe la opción de modelar en flujo no uniforme o régimen variable (Unsteady Flow Data), el cual contiene: hidrograma de flujo aguas arriba, condiciones de flujo iníciales, y condiciones de frontera aguas abajo (USACE, 2010), que serán mencionados más adelante.

A continuación en la Ilustración 4.27 se presenta los parámetros que contiene este tipo de flujo.

Ilustración 4.27. Parámetros de Flujo No Permanente.



Los principales parámetros que dominan este tipo de flujo son: condiciones de frontera y condiciones iníciales.

4.2.3.3. CONDICIONES DE FRONTERA Y CONDICIONES INÍCIALES

El programada HEC-RAS al permitir modelar en régimen permanente y no permanente, dispone condiciones de frontera muy diferentes para los dos casos. Este estudio pondrá interés al régimen de tipo no permanente y por ende, las condiciones de frontera serán referentes a este régimen.

CONDICIONES DE FRONTERA PARA RÉGIMEN NO PERMANENTE

Existen diferentes condiciones de frontera que puede utilizar el usuario: hidrograma de flujo, flujo por etapa, hidrograma de flujo y etapa, curva de gasto, profundidad normal, etc. Para este análisis se utilizará las condiciones de frontera de “Hidrograma de Flujo” y de “Profundidad Normal” descritas a continuación.

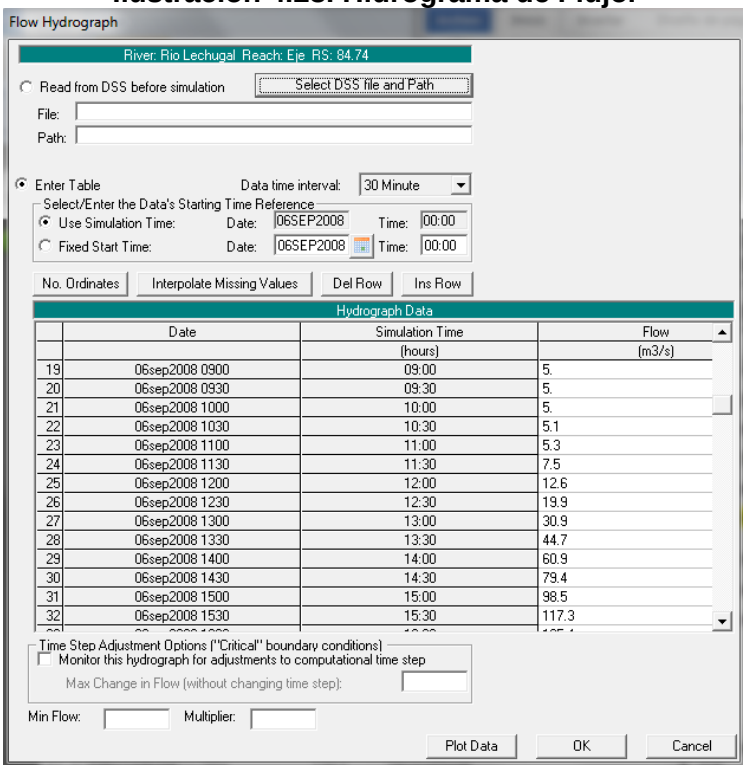
- FLOW HYDROGRAPH: (Hidrograma de Flujo)

El usuario ingresa un hidrograma de flujo conocido, para ser usado internamente como una condición de frontera (USACE, 2010). Esta condición comúnmente suele ser aplicada aguas arriba del cauce, en la estación del río más alta como lo indica la Ilustración 4.27.

Para ingresar el hidrograma de flujo conocido se debe configurar el intervalo de tiempo que contiene este hidrograma junto con el tiempo de simulación de

inicio. En la Ilustración 4.28 se indica los datos antes mencionados que se deben configurar.

Ilustración 4.28. Hidrograma de Flujo.

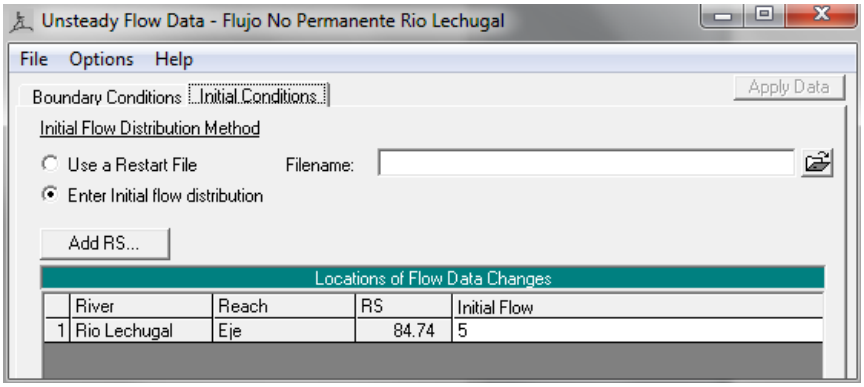


- NORMAL DEPTH: (Profundidad Normal)

Para usar este método es necesario ingresar una pendiente de fricción para el alcance en la región de las condiciones de frontera. La pendiente de la superficie del agua es a menudo una buena estimación de la pendiente de fricción (USACE, 2010). La Profundidad Normal debe ser solo aplicada aguas abajo del cauce, en la estación del río más baja (ver Ilustración 4.27).

Las condiciones iníciales consiste en la información del flujo para cada sección transversal, correspondiente al flujo base del hidrograma ingresado como la condición de frontera aguas arriba mostrada en la Ilustración 4.29.

Ilustración 4.29. Condiciones Iníciales.



4.2.3.4. RUGOSIDAD DE MANNING

La rugosidad de Manning se obtiene a partir de la granulometría del material del río. De una manera preliminar el coeficiente de Manning se determinara utilizando la ecuación 4.3, conocida como la expresión de Strickler.

$$n = 0.047 d^{1/6} \tag{4.3}$$

Donde n es el coeficiente de Manning y d es el diámetro de la partícula del lecho (D_{50}) expresada en metros.

Este valor de Manning esta propenso a modificaciones o calibraciones debido a las irregularidades que presenta el río, la vegetación, la rugosidad superficial, tamaño de las partículas, etc.

El proyecto consta con un estudio granulométrico realizado por el (PROMAS, 2014) de los ríos Quevedo, Macul, Maculillo, Bobo, Vinces, Chipe, Calabí, Lechugal y Zapotal, siendo el más representativo para el proyecto el río Lechugal por su gran similitud del tipo de material existente en la zona con relación a los ríos a analizar en este tema.

A continuación se presentan los tamaños de partículas del río Lechugal para diferentes diámetros de Tamiz.

Tabla 4.7. Diámetro de Partículas del Río Lechugal.

Diámetro/Mes	Muestra 1	Muestra 2	Diámetro medio (mm)
D50	24.3	21.03	22.67
D90	58.08	52.88	55.48
D35	10.33	10.89	10.61
D40	14.77	14.75	14.76

Fuente: (PROMAS, 2014).

Con el resultado del diámetro de la partícula (D_{50}), y utilizando la ecuación 4.3 se consigue determinar el coeficiente de Manning, dando como resultado:

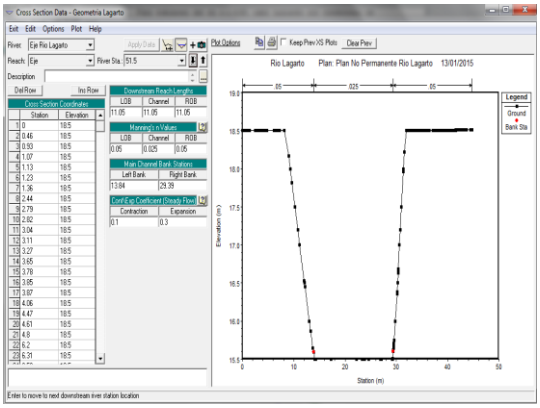
- Para el cauce principal $n = 0.025$, valor inicial obtenido por la ecuación 4.3.
- Para márgenes del río $n = 0.05$, valor supuesto por condiciones de vegetación, debido a una mayor rugosidad que presenta en las márgenes en comparación a la del fondo del cauce.

4.2.3.5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

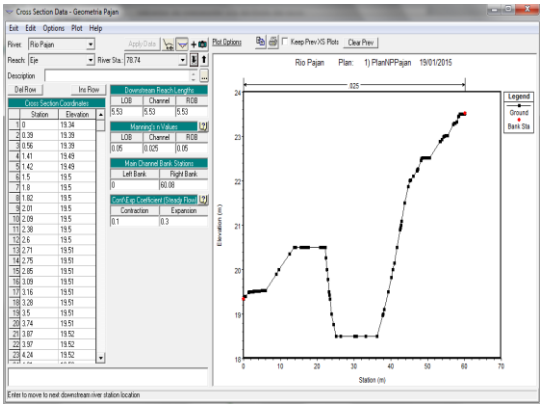
Con lo expuesto anteriormente, a continuación se realiza la implementación del modelo para los diferentes puntos de interés.

- ***SECCIONES TRANSVERSALES:***

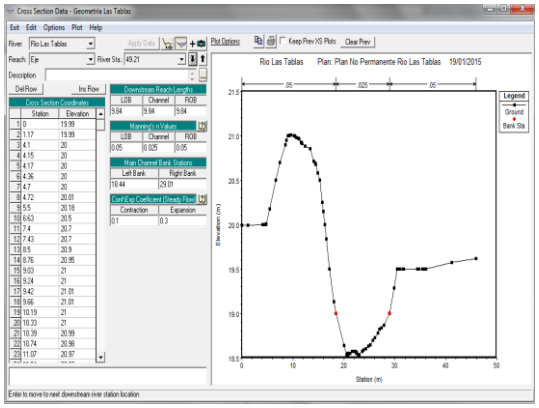
Ilustración 4.30. Secciones Transversales en los sitios de Puentes.



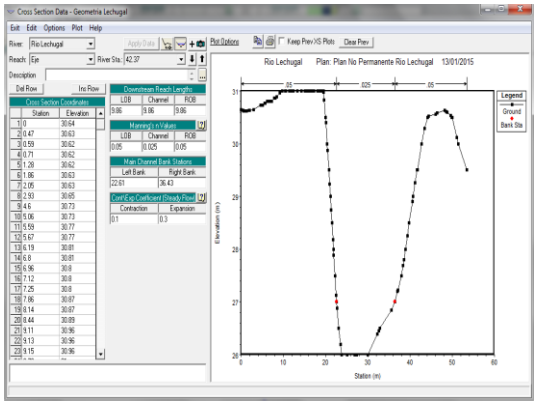
a) Río Lagarto
Abscisa: 51+50.



b) Río Paján
Abscisa: 78+74.



c) Río Las Tablas
Abscisa: 49+21.

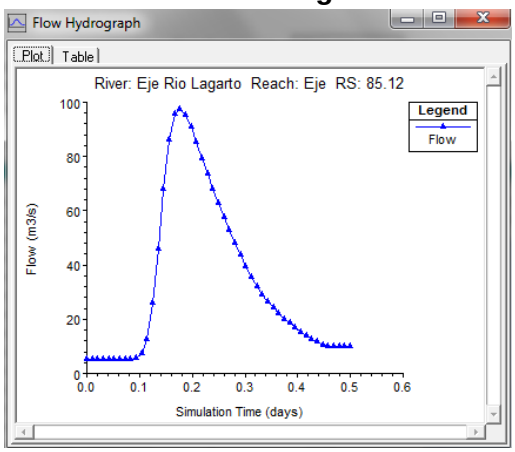


d) Río Lechugal
Abscisa: 42+37.

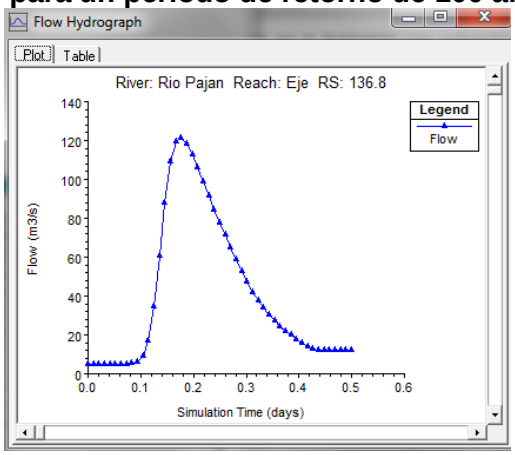
Las secciones transversales expuestas en la ilustración son referentes a las abscisas donde se sitúan los puentes.

- ***HIDROGRAMA DE FLUJO:***

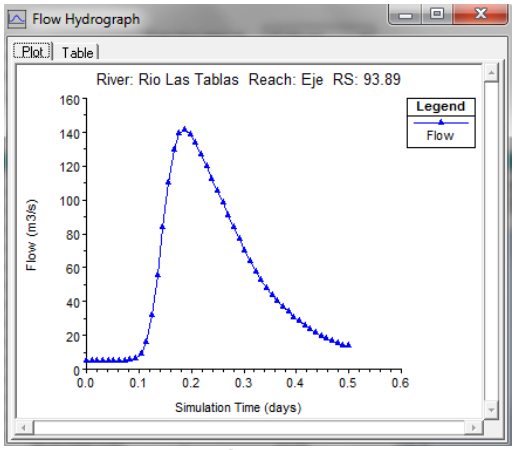
Ilustración 4.31. Hidrogramas de Diseño para un periodo de retorno de 100 años.



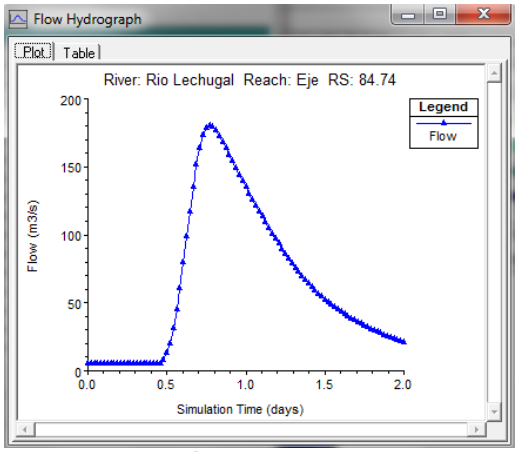
a) Río Lagarto
Caudal Máximo: 97.5m3/s



b) Río Paján
Caudal Máximo: 121.1m3/s



c) Río Las Tablas
Caudal Máximo: 141.4m3/s

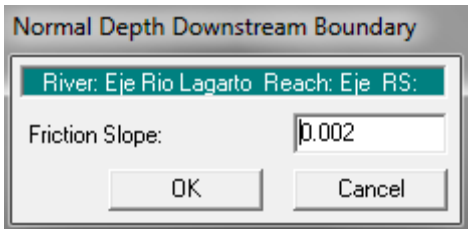


d) Río Lechugal
Caudal Máximo: 180.2m3/s

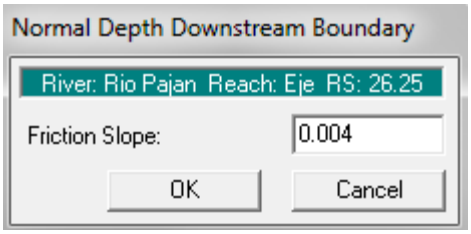
Los hidrogramas utilizados para el análisis de los puntos de interés son producto de los hidrogramas que se determinaron por el programa HEC-HMS.

- ***PROFUNDIDAD NORMAL:***

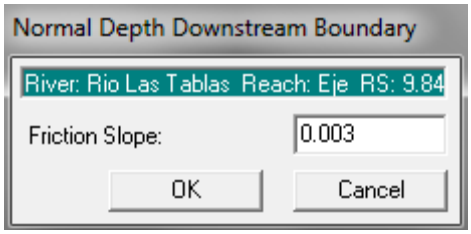
Ilustración 4.32. Pendiente de Ficción.



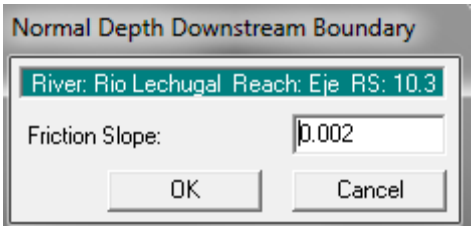
a) Río Lagarto



b) Río Paján



c) Río Las Tablas

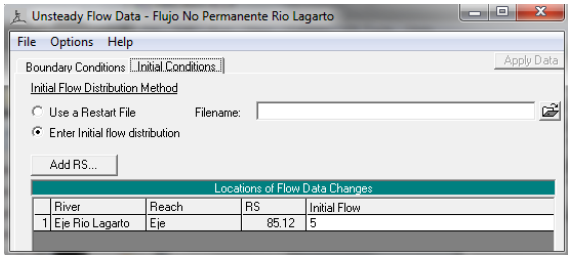


d) Río Lechugal

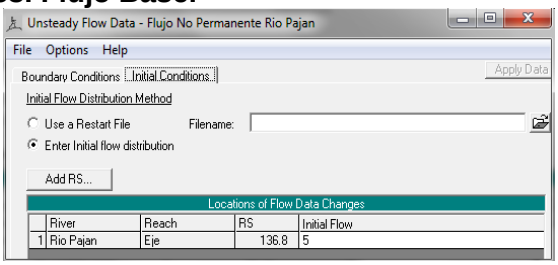
La pendiente de fricción son determinas por medio del desnivel de la cuenca (Δh) y la longitud del cauce (L) descritas en la Tabla 3.5. El valor de la pendiente se expresa en metros sobre metros.

- ***CONDICIONES INÍCIALES:***

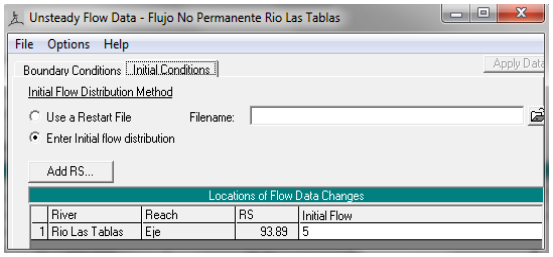
Ilustración 4.33. Flujo Base.



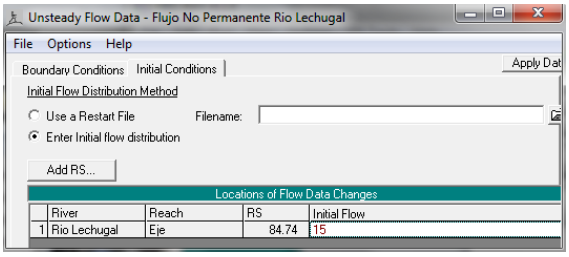
a) Río Lagarto



b) Río Paján



c) Río Las Tablas

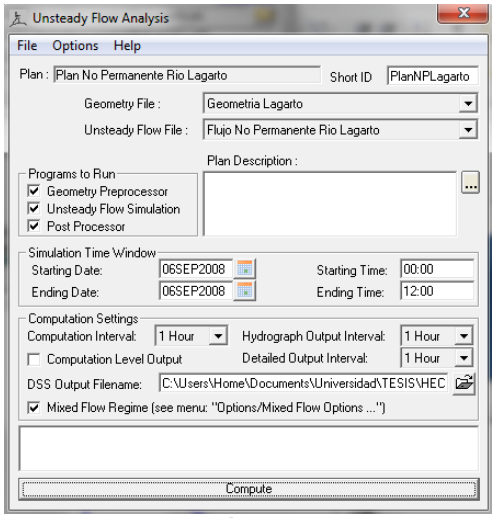


d) Río Lechugal

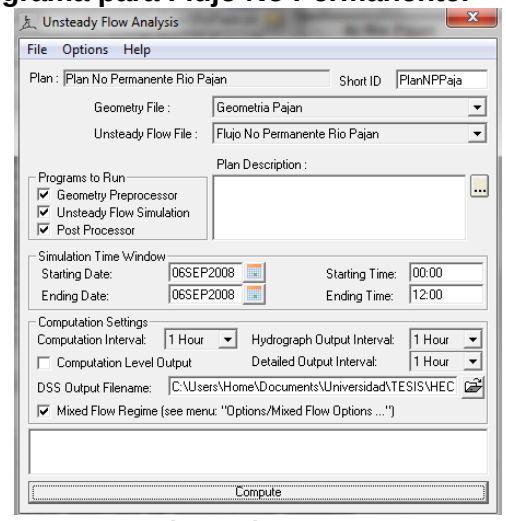
El flujo base que es utilizado para las condiciones iníciales son obtenidos a partir de la Tabla 4.3, Tabla 4.4, Tabla 4.5.

. ***EJECUCIÓN DEL MODELO:***

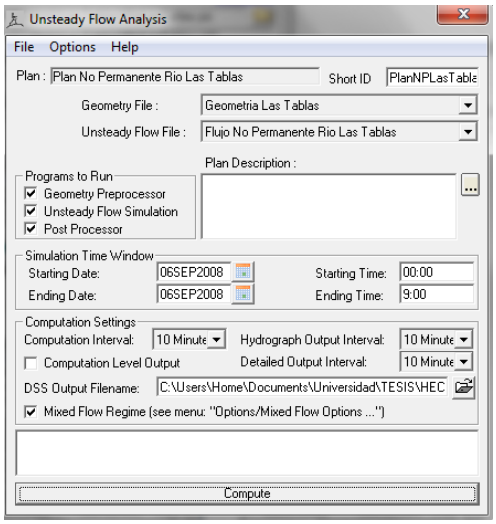
Ilustración 4.34. Corrida del programa para Flujo No Permanente.



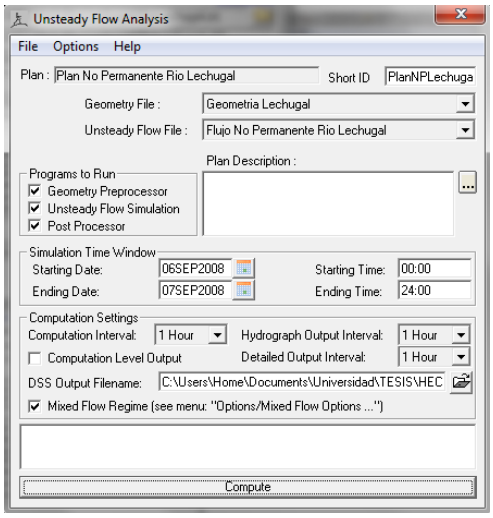
a) Río Lagarto



b) Río Paján



c) Río Las Tablas



d) Río Lechugal

Para la corrida del programa se utilizó un régimen de fluido mixto (Mixed Flow Regime) debido a la incertidumbre que existe al momento de simular el modelo, es decir, el programa se ejecutará en un modo tal que permitirá el flujo subcrítico, flujo supercrítico, saltos hidráulicos (USACE, 2010).

Además se debe tener en cuenta que los periodos de simulación del modelo estén sincronizados con los intervalos de tiempo de los hidrogramas antes utilizados.

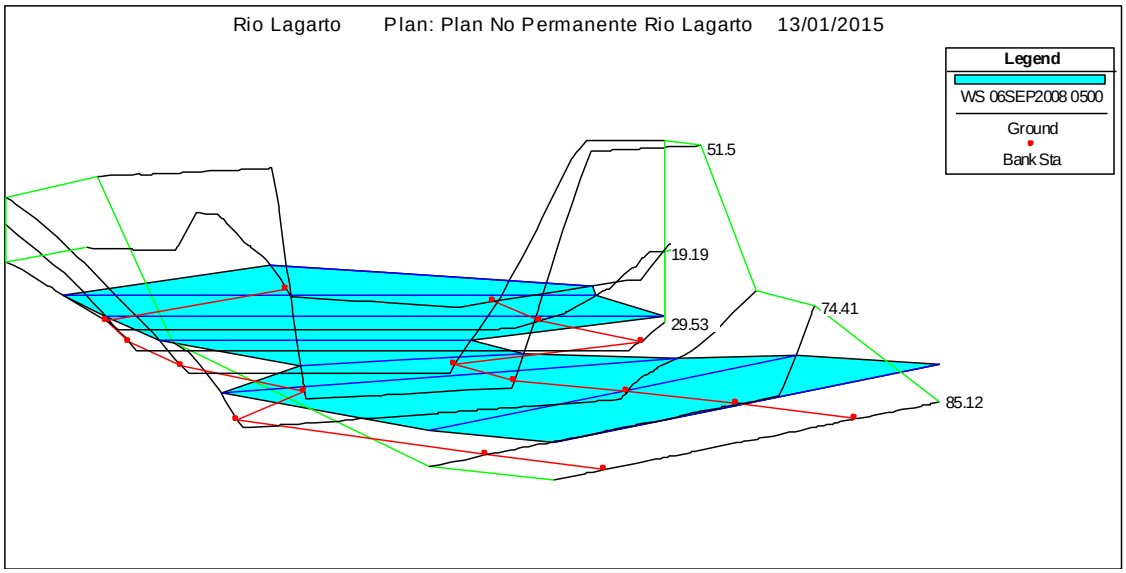
4.2.3.6. MODELACÍON HIDRÁULICA CON HEC-RAS

A continuación se presenta la modelización de los diferentes ríos que servirán para la obtención de los parámetros hidráulicos como: nivel máximo de agua, velocidades en el canal principal y márgenes, pendiente de energía, número de Froude, área hidráulica, número de Reynolds.

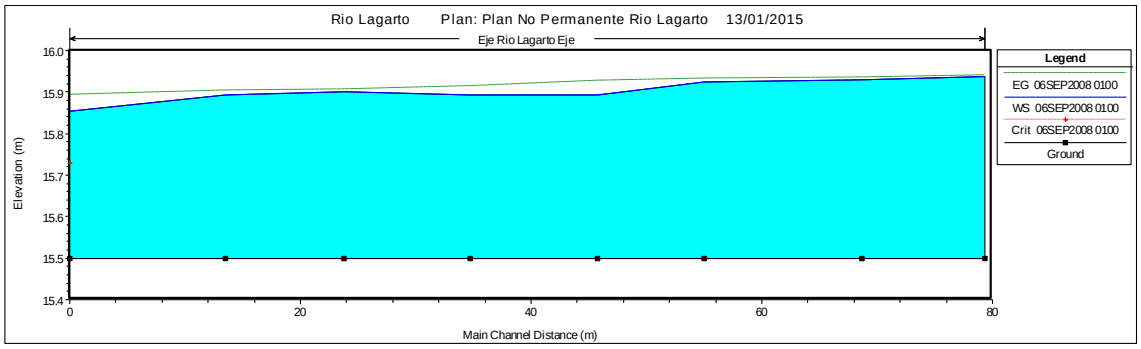
MODELACIÓN DEL RÍO LAGARTO:

El puente del río Lagarto se encuentra ubicado al sur-oeste del proyecto, presenta una luz de 15 metros, sobre el río se evidencia claramente en Anexos la presencia de Lechuguines y para un periodo de retorno de 100 años puede fluir por el lecho del río un caudal pico de 97.5m^3/s. Los resultados obtenidos a partir de la modelación se muestran en la Ilustración 4.35.

Ilustración 4.35. Resultados de Modelación del Río Lagarto.



a) Visualización Grafica en 3D de múltiples secciones transversales.



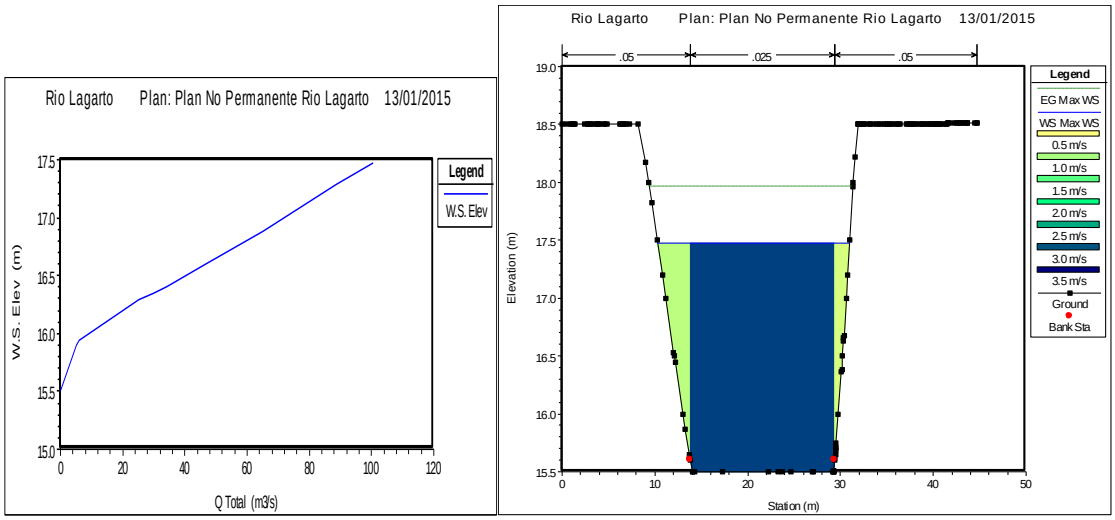
b) Visualización del Perfil Longitudinal del Cauce.

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: PlanNPLagarto River: Eje Rio Lagarto Reach: Eje Profile: Max WS

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Eje	85.12	Max WS	100.90	15.50	17.87		17.93	0.000266	1.16	108.91	45.93	0.24
Eje	74.41	Max WS	100.73	15.50	17.79		17.86	0.000305	1.21	103.01	45.93	0.26
Eje	60.75	Max WS	100.51	15.50	17.77		17.85	0.000343	1.28	94.19	45.93	0.27
Eje	51.5	Max WS	100.41	15.50	17.48		17.96	0.002479	3.13	35.73	20.66	0.71
Eje	40.45	Max WS	100.30	15.50	17.68		17.89	0.001007	2.13	59.97	37.11	0.46
Eje	29.53	Max WS	100.14	15.50	17.79		17.85	0.000279	1.16	96.58	45.93	0.24
Eje	19.19	Max WS	99.97	15.50	17.77		17.84	0.000339	1.27	95.84	45.93	0.27
Eje	5.74	Max WS	99.76	15.50	17.66	16.81	17.78	0.000795	1.88	83.01	45.93	0.41

c) Tabla de Parámetros Hidráulicos en todo el tramo del cauce.



d) Visualización de la Curva de Gasto y Sección Transversal en el sitio del Puente.

File Type Options Help

River: Eje Rio Lagarto Profile: Max WS

Reach Eje RS: 51.5 Plan: PlanNPLagarto

Plan: PlanNPLagarto Eje Rio Lagarto Eje RS: 51.5 Profile: Max WS

E.G. Elev (m)	17.96	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.48	Wt. n-Val.	0.050	0.025	0.050
W.S. Elev (m)	17.48	Reach Len. (m)	11.05	11.05	11.05
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	3.43	30.74	1.56
E.G. Slope (m/m)	0.002479	Area (m2)	3.43	30.74	1.56
Q Total (m3/s)	100.41	Flow (m3/s)	3.06	96.20	1.15
Top Width (m)	20.66	Top Width (m)	3.56	15.55	1.54
Vel Total (m/s)	2.81	Avg. Vel. (m/s)	0.89	3.13	0.74
Max Chl Dpth (m)	1.98	Hydr. Depth (m)	0.96	1.98	1.01
Conv. Total (m3/s)	2016.6	Conv. (m3/s)	61.5	1932.1	23.1
Length Wtd. (m)	11.05	Wetted Per. (m)	4.03	15.61	2.44
Min Ch El (m)	15.50	Shear (N/m2)	20.68	47.87	15.52
Alpha	1.19	Stream Power (N/m s)	2142.06	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.02	Cum Volume (1000 m3)	0.48	2.54	0.56
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)	0.31	1.14	0.41

e) Tabla de Parámetros Hidráulicos en la sección del Puente.

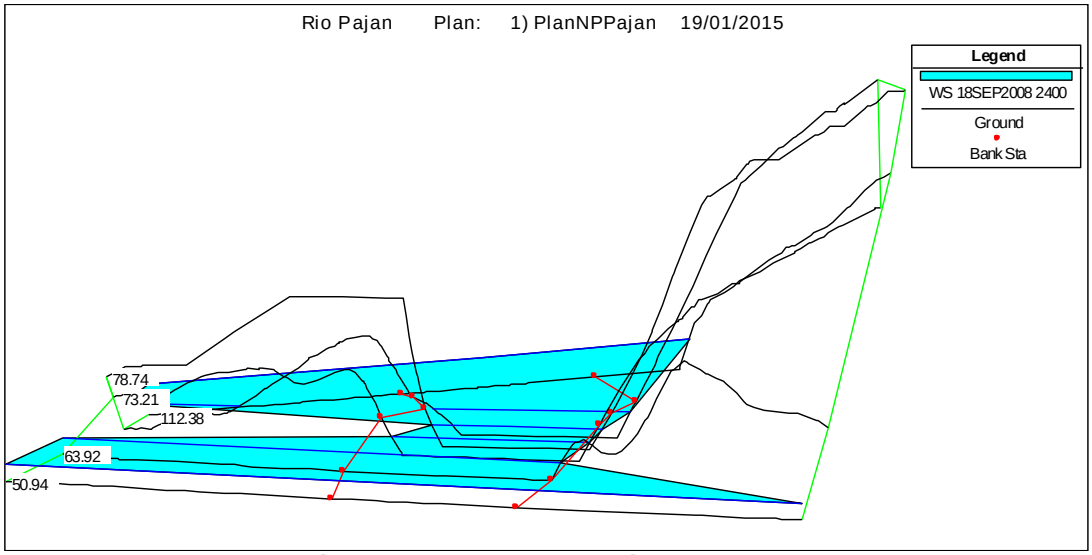
Observando los resultados de la modelación del río Lagarto, se puede evidenciar que el cauce del río desborda aguas arriba y aguas abajo por presentar un calado de agua mayor al desnivel existente entre el fondo del

cauce y la superficie del margen, a excepción de la sección donde se ubica el puente. Claramente se puede apreciar que no existe una gran pérdida de energía, el flujo presenta ser de tipo subcrítico en todo su tramo al tener valores de Froude menores a 1; siendo ser el máximo valor de 0.71 ubicado en la sección del puente debido a un cierto estrechamiento producto de los estribos del puente; las velocidades en todo el tramo varían de 1.16m/s a 3.13m/s, en la sección del puente la velocidad en los márgenes y en el centro del cauce son de 0.89m/s y 3.13m/s respectivamente.

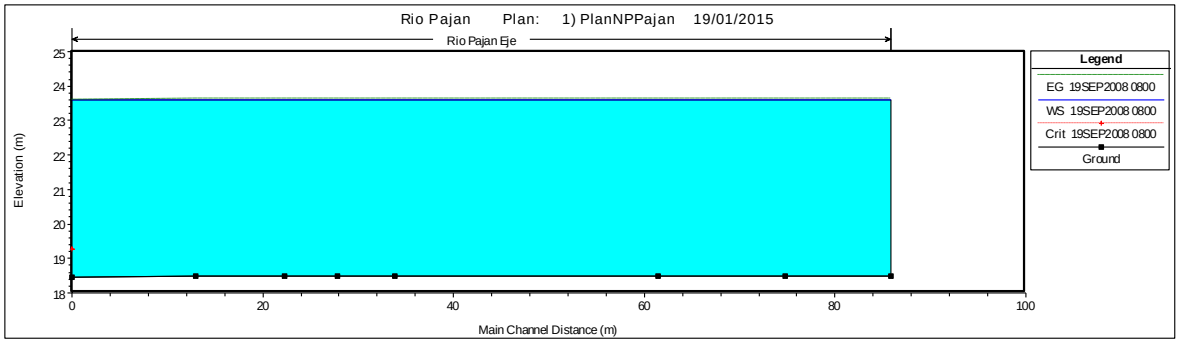
MODELACIÓN DEL RÍO PAJÁN:

El puente del río Paján se encuentra ubicado al este del proyecto, emplazado sobre una superficie de relleno, presenta una luz de 17 metros, existe la presencia de Lechiguines y para un periodo de 100 años el caudal máximo que puede fluir es de 121.1m^3/s. Los resultados obtenidos a partir de la modelación se indican en la Ilustración 4.36.

Ilustración 4.36. Resultados de Modelación del Río Paján.



a) Visualización Grafica en 3D de múltiples secciones transversales.



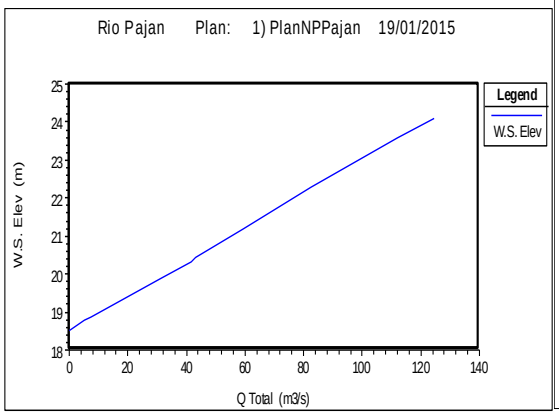
b) Visualización del Perfil Longitudinal del Cauce.

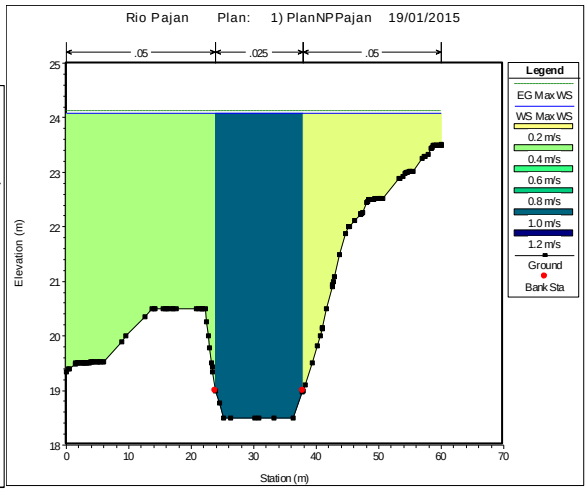
File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: PlanNPPajan River: Rio Pajan Reach: Eje Profile: 19SEP2008 0800 Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Eje	136.8	19SEP2008 0800	111.70	18.50	23.61		23.63	0.000034	0.69	284.18	61.45	0.10
Eje	125.68	19SEP2008 0800	111.79	18.50	23.61		23.63	0.000025	0.59	319.58	64.59	0.08
Eje	112.38	19SEP2008 0800	111.90	18.50	23.61		23.62	0.000029	0.64	298.86	62.98	0.09
Eje	84.83	19SEP2008 0800	112.11	18.50	23.60		23.63	0.000054	0.86	213.56	56.35	0.12
Eje	78.74	19SEP2008 0800	112.16	18.50	23.60		23.63	0.000079	1.03	190.29	60.08	0.15
Eje	73.21	19SEP2008 0800	112.20	18.50	23.60		23.63	0.000051	0.84	224.77	58.98	0.12
Eje	63.92	19SEP2008 0800	112.27	18.49	23.61		23.62	0.000032	0.68	284.75	60.00	0.10
Eje	50.94	19SEP2008 0800	112.38	18.47	23.58	19.26	23.60	0.000027	0.62	318.11	62.32	0.09

c) Tabla de Parámetros Hidráulicos en todo el tramo del cauce.





d) Visualización de la Curva de Gasto y Sección Transversal en el sitio del Puente.

File Type Options Help

River: Rio Pajan Profile: Max WS

Reach: Eje RS: 78.74 Plan: PlanNPPajan

Plan: PlanNPPajan Rio Pajan Eje RS: 78.74 Profile: Max WS

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	24.11	Wt. n-Val.	0.050	0.025	0.050
Vel Head (m)	0.03	Reach Len. (m)	5.53	5.53	5.53
W.S. Elev (m)	24.08	Flow Area (m2)	96.40	77.35	45.44
Crit W.S. (m)		Area (m2)	96.40	77.35	45.44
E.G. Slope (m/m)	0.000067	Flow (m3/s)	34.86	78.31	11.51
Q Total (m3/s)	124.69	Top Width (m)	23.86	14.00	22.22
Top Width (m)	60.08	Avg. Vel. (m/s)	0.36	1.01	0.25
Vel Total (m/s)	0.57	Hydr. Depth (m)	4.04	5.52	2.05
Max Chl Dpth (m)	5.58	Conv. (m3/s)	4269.9	9591.6	1410.0
Conv. Total (m3/s)	15271.6	Wetted Per. (m)	29.25	14.17	23.52
Length Wtd. (m)	5.53	Shear (N/m2)	2.15	3.57	1.26
Min Ch El (m)	18.50	Stream Power (N/m s)	2876.51	0.00	0.00
Alpha	2.12	Cum Volume (1000 m3)	3.26	2.43	2.54
Frctn Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	0.63	0.44	0.61
C & E Loss (m)					

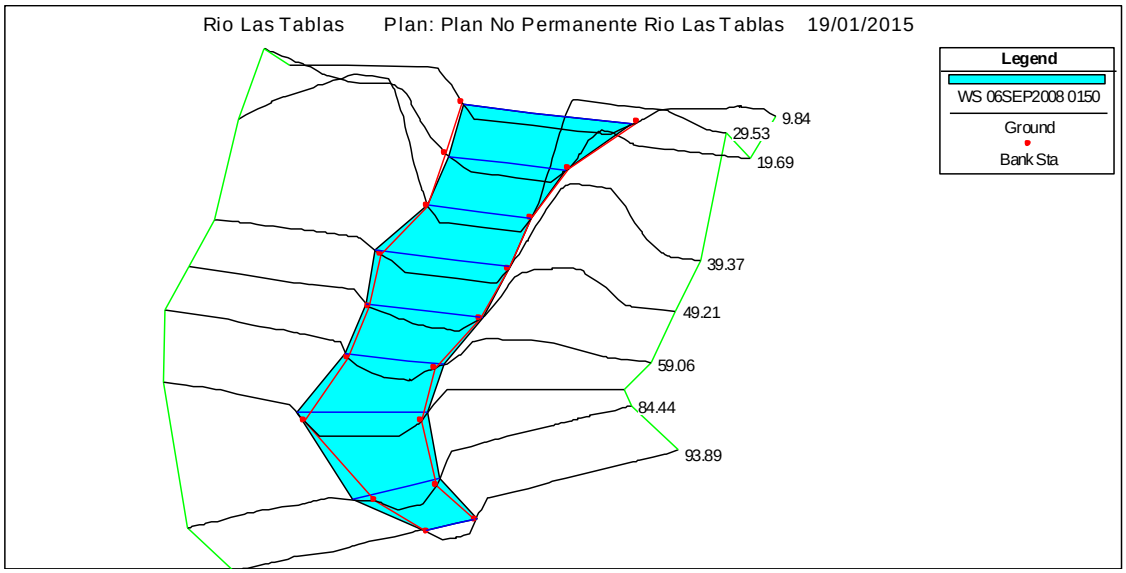
e) Tabla de Parámetros Hidráulicos en la sección del Puente.

Los resultados del río Paján muestran que el cauce desborda en todo el tramo del río, inclusive en la sección del puente, esto puede deberse a la topografía del sector al ser relativamente plana sin presentar una forma de cauce bien definida y, del reconocimiento de campo al estar construido sobre un relleno en una zona que durante todo el año es un humedal; por estas razones demuestra tener valores bajos en todo su tramo tanto de velocidades y de pendientes, fluctuando entre 0.59m/s a 1.03m/s y de 0.0025% a 0.0079%, respectivamente. Además se puede apreciar que en todo el tramo del cauce los valores de Froude son muy bajos y menores a la unidad producto de sus velocidades.

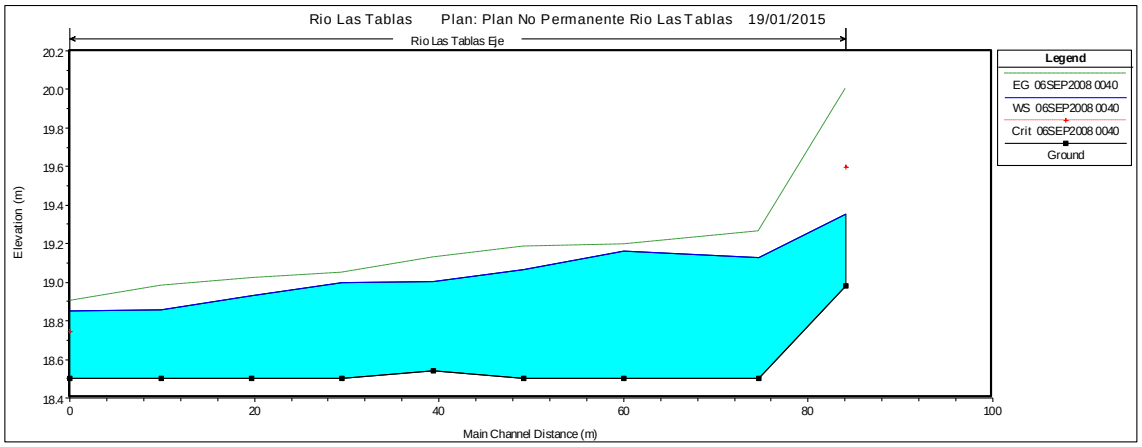
MODELACIÓN DEL RÍO LAS TABLAS:

El puente del río Las Tablas se ubica en el centro del proyecto, consta con una luz de 12 metros, el cauce del río presenta un caudal de 141.4m^3/s para un periodo de retorno de 100 años, en él se evidencia una cierta cantidad de Lechiguines mostrado en Anexos. Los resultados a partir de la modelación hidráulica se indican en la Ilustración 4.37.

Ilustración 4.37. Resultados de Modelación del Río Las Tablas.



a) Visualización Gráfica en 3D de múltiples secciones transversales.



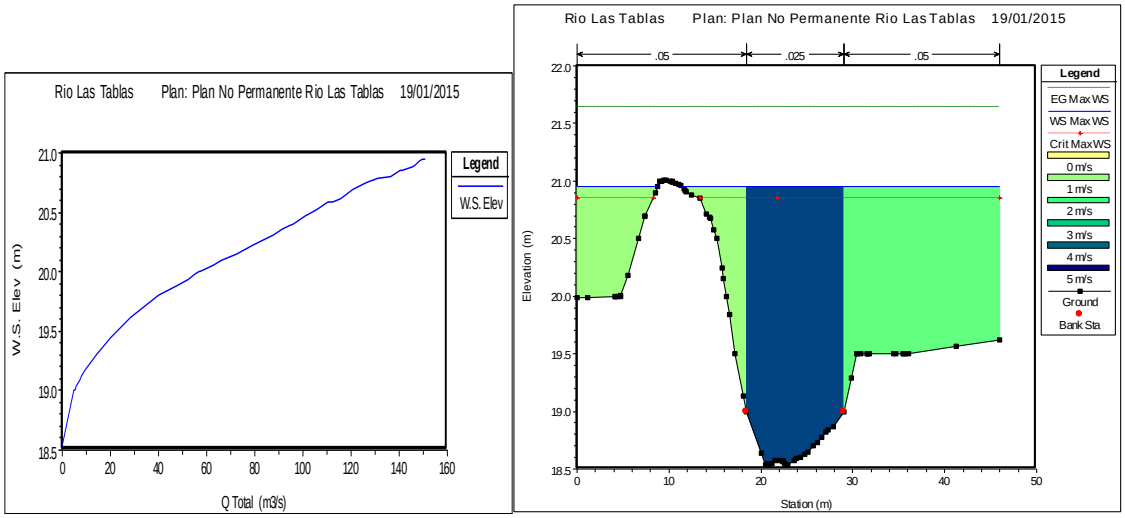
b) Visualización del Perfil Longitudinal del Cauce.

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: PlanNPLasTablas River: Rio Las Tablas Reach: Eje Profile: Max WS — Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Eje	93.89	Max WS	150.70	18.98	21.08	21.07	21.66	0.006790	5.12	62.54	45.93	1.16
Eje	84.44	Max WS	150.70	18.50	20.92	21.01	21.64	0.005602	5.09	61.28	45.93	1.08
Eje	69.85	Max WS	150.69	18.50	20.94	20.99	21.68	0.003892	4.39	57.75	42.24	0.91
Eje	59.06	Max WS	150.68	18.50	20.77	21.06	21.83	0.007244	5.56	51.77	45.93	1.22
Eje	49.21	Max WS	150.68	18.54	20.95	20.85	21.64	0.004048	4.35	58.90	43.31	0.93
Eje	39.37	Max WS	150.67	18.50	20.98		21.55	0.002933	3.85	61.01	37.30	0.79
Eje	29.53	Max WS	150.67	18.50	20.92	21.40	22.85	0.008004	6.26	26.96	13.41	1.30
Eje	19.69	Max WS	150.66	18.50	20.86	21.00	21.88	0.004976	4.84	45.09	32.74	1.03
Eje	9.84	Max WS	150.66	18.50	20.97	20.53	21.32	0.001710	2.95	76.42	45.93	0.61

c) Tabla de Parámetros Hidráulicos en todo el tramo del cauce.



d) Visualización de la Curva de Gasto y Sección Transversal en el sitio del Puente.

File Type Options Help

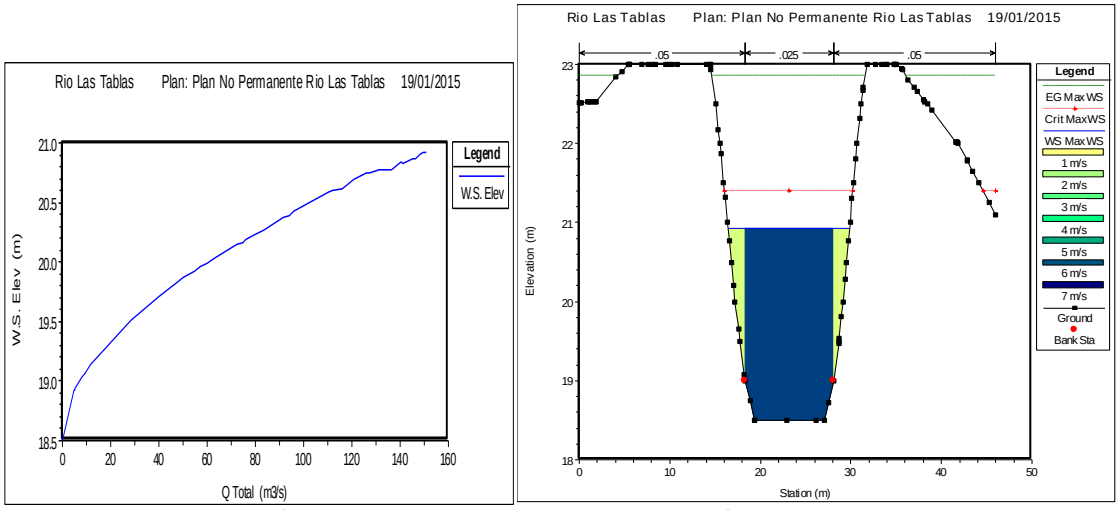
River: Rio Las Tablas Profile: Max WS

Reach Eje RS: 49.21 Plan: PlanNPLasTablas

Plan: PlanNPLasTablas Rio Las Tablas Eje RS: 49.21 Profile: Max WS

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	21.64	Wt. n-Val.	0.050	0.025	0.050
Vel Head (m)	0.69	Reach Len. (m)	9.84	9.84	9.84
W.S. Elev (m)	20.95	Flow Area (m2)	10.88	23.76	24.26
Crit W.S. (m)	20.85	Area (m2)	10.88	23.76	24.26
E.G. Slope (m/m)	0.004048	Flow (m3/s)	10.17	103.31	37.19
Q Total (m3/s)	150.68	Top Width (m)	15.83	10.57	16.92
Top Width (m)	43.31	Avg. Vel. (m/s)	0.94	4.35	1.53
Vel Total (m/s)	2.56	Hydr. Depth (m)	0.69	2.25	1.43
Max Chl Dpth (m)	2.41	Conv. (m3/s)	159.9	1623.7	584.6
Conv. Total (m3/s)	2368.2	Wetted Per. (m)	17.28	10.64	18.34
Length Wtd. (m)	9.84	Shear (N/m2)	25.00	88.63	52.52
Min Ch El (m)	18.54	Stream Power (N/m s)	2199.03	0.00	0.00
Alpha	2.08	Cum Volume (1000 m3)	0.38	1.09	0.51
Frctn Loss (m)	0.03	Cum SA (1000 m2)	0.42	0.46	0.37
C & E Loss (m)					

e) Tabla de Parámetros Hidráulicos en la sección del Puente.



f) Visualización de la Curva de Gasto y Sección Transversal en el sitio del posible emplazamiento de un nuevo Puente.

File Type Options Help

River: Rio Las Tablas Profile: Max WS

Reach Eje RS: 29.53 Plan: PlanNPLasTablas

Plan: PlanNPLasTablas Rio Las Tablas Eje RS: 29.53 Profile: Max WS

E.G. Elev (m)	22.85	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	1.93	Wt. n-Val.	0.050	0.025	0.050
W.S. Elev (m)	20.92	Reach Len. (m)	9.84	9.84	9.84
Crit W.S. (m)	21.40	Flow Area (m2)	1.98	23.21	1.77
E.G. Slope (m/m)	0.008004	Area (m2)	1.98	23.21	1.77
Q Total (m3/s)	150.67	Flow (m3/s)	2.87	145.33	2.47
Top Width (m)	13.41	Top Width (m)	1.90	9.80	1.71
Vel Total (m/s)	5.59	Avg. Vel. (m/s)	1.45	6.26	1.39
Max Chl Dpth (m)	2.42	Hydr. Depth (m)	1.04	2.37	1.04
Conv. Total (m3/s)	1684.1	Conv. (m3/s)	32.0	1624.4	27.7
Length Wtd. (m)	9.84	Wetted Per. (m)	2.71	10.03	2.58
Min Ch El (m)	18.50	Shear (N/m2)	57.24	181.67	53.98
Alpha	1.21	Stream Power (N/m s)	2199.03	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.06	Cum Volume (1000 m3)	0.24	0.57	0.14
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)	0.24	0.24	0.13

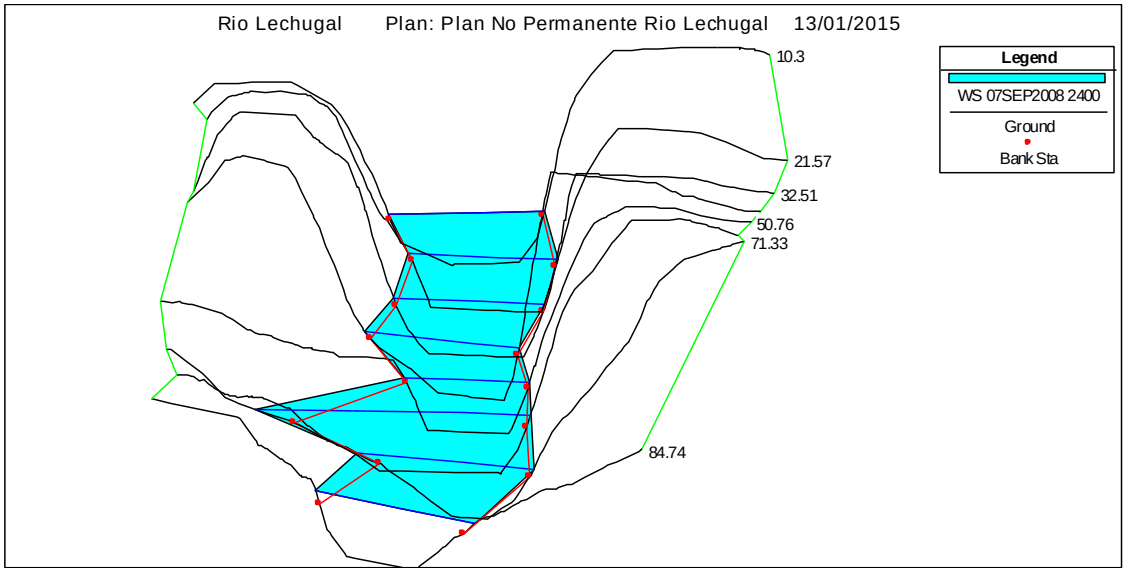
g) Tabla de Parámetros Hidráulicos en la sección del posible emplazamiento para un nuevo Puente.

Como resultado de la modelación del río Las Tablas, se puede apreciar que el cauce desborda en la sección del puente; ya que el calado del agua en esa zona es mayor al desnivel que presenta el fondo del cauce y la superficie en los márgenes, pero existe la posibilidad de emplazar un puente nuevo aguas abajo, donde se garantiza y se asegura que no va haber un desbordamiento ni inundación en ese sector. La velocidad entre la sección del puente existente y del puente nuevo varia, siendo más alta en la sección del nuevo puente con un valor de 6.26m/s a causa de un cierto estrechamiento de la sección; los valores de Froude varían, para el caso del puente construido presenta un valor de 0.93 muy cercano a ser un flujo crítico, mientras que en la sección del nuevo puente presenta un valor de 1.30, con lo que garantiza tener un flujo supercrítico debido a sus altas velocidades.

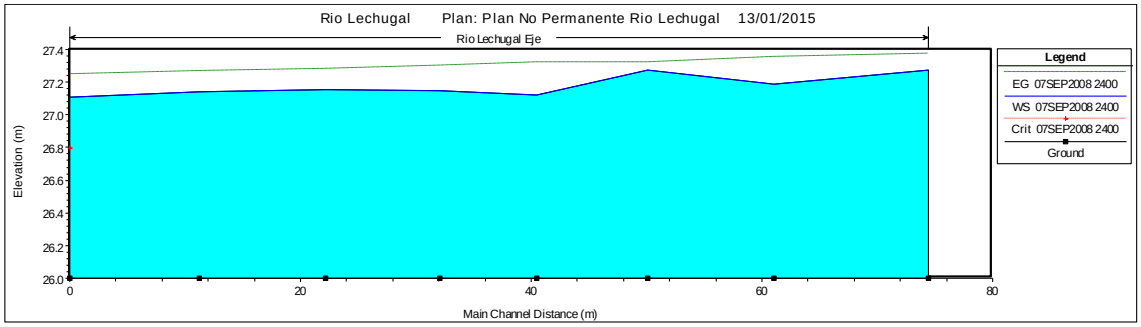
MODELACIÓN DEL RÍO LECHUGAL:

El río Lechugal consta de un puente ubicado en la parte nor-este del proyecto, presenta una luz de 22 metros, por el río fluye un caudal de 180.2m^3/s para un periodo de retorno de 100 años, en él se puede apreciar la existencia de vegetación principalmente en las márgenes del río y una escasa cantidad de Lechiguines sobre el cauce tal como se puede observar en Anexos. En la Ilustración 4.38 se indican los resultados obtenidos a partir de la modelación hidráulica.

Ilustración 4.38. Resultados de Modelación del Río Lechugal.



a) Visualización Grafica en 3D de múltiples secciones transversales.



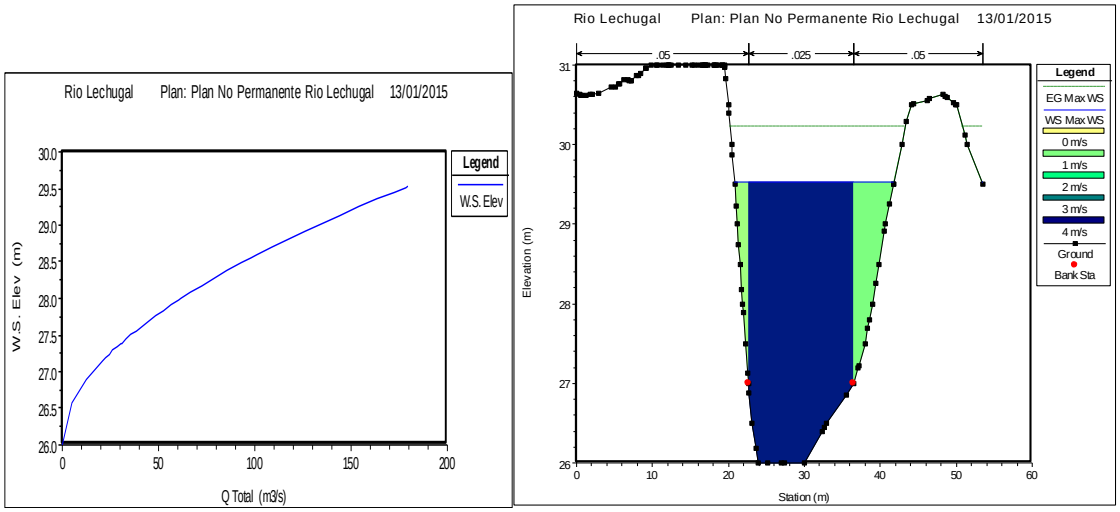
b) Visualización del Perfil Longitudinal del Cauce.

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: PlanNPLechugal River: Rio Lechugal Reach: Eje Profile: Max WS — Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Eje	84.74	Max WS	179.40	26.00	29.92		30.17	0.000725	2.53	112.76	49.97	0.42
Eje	71.33	Max WS	179.40	26.00	29.87		30.18	0.000954	2.82	96.89	40.91	0.48
Eje	60.44	Max WS	179.40	26.00	29.94		30.13	0.000465	2.04	109.84	36.70	0.34
Eje	50.76	Max WS	179.40	26.00	29.79		30.20	0.001292	3.29	87.23	37.37	0.55
Eje	42.37	Max WS	179.39	26.00	29.52		30.22	0.001958	3.80	54.45	21.07	0.67
Eje	32.51	Max WS	179.39	26.00	29.44		30.21	0.002106	3.97	50.99	19.28	0.70
Eje	21.57	Max WS	179.39	26.00	29.48		30.19	0.001934	3.83	55.92	22.76	0.67
Eje	10.3	Max WS	179.39	26.00	29.44	28.78	30.16	0.002001	3.84	53.28	21.60	0.68

c) Tabla de Parámetros Hidráulicos en todo el tramo del cauce.



d) Visualización de la Curva de Gasto y Sección Transversal en el sitio del Puente.

File Type Options Help

River: Rio Lechugal Profile: Max WS

Reach Eje RS: 42.37 Plan: PlanNPLechugal

Plan: PlanNPLechugal Rio Lechugal Eje RS: 42.37 Profile: Max WS

E.G. Elev (m)	30.22	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.70	Wt. n-Val.	0.050	0.025	0.050
W.S. Elev (m)	29.52	Reach Len. (m)	9.86	9.86	9.86
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	2.32	44.83	7.29
E.G. Slope (m/m)	0.001958	Area (m2)	2.32	44.83	7.29
Q Total (m3/s)	179.39	Flow (m3/s)	1.69	170.29	7.41
Top Width (m)	21.07	Top Width (m)	1.82	13.82	5.43
Vel Total (m/s)	3.29	Avg. Vel. (m/s)	0.73	3.80	1.02
Max Chl Dpth (m)	3.52	Hydr. Depth (m)	1.28	3.24	1.34
Conv. Total (m3/s)	4054.2	Conv. (m3/s)	38.3	3848.4	167.6
Length Wtd. (m)	9.86	Wetted Per. (m)	3.11	14.26	6.05
Min Ch El (m)	26.00	Shear (N/m2)	14.33	60.36	23.15
Alpha	1.27	Stream Power (N/m s)	2561.47	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.02	Cum Volume (1000 m3)	0.11	1.41	0.20
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)	0.09	0.43	0.16

e) Tabla de Parámetros Hidráulicos en la sección del Puente.

El río Lechugal no desborda a lo largo de su tramo, incluso en la sección del puente, sus velocidades se encuentran en el orden de 2.04m/s a 3.97m/s, los valores de Froude son menores a 1, gobernando el flujo de tipo subcrítico, las pendientes en todo el tramo varían de 0.04% a 0.21%. En la sección del puente, la velocidad en el margen izquierdo y derecho son de 0.73m/s y de 1.02m/s respectivamente, pudiendo ser más agresiva la erosión en el margen derecho, la velocidad en el centro del cauce es de 3.8m/s.

Con los resultados expuestos anteriormente, en la Tabla 4.8 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos necesarios para realizar el análisis de socavación general en los diferentes puntos de interés.

Tabla 4.8. Parámetros Hidráulicos necesarios para analizar la Socavación General en puentes.

Río	N. Max de Agua (msnm)	Rugosidad (n)			Velocidad (m/s)			Pendiente (m/m)
		M. Izquierd	Cauce Principal	M. Derecha	M. Izquierd	Cauce Principal	M. Derecha	
Lagarto	17.48	0.05	0.025	0.05	0.89	3.13	0.74	0.008
Paján	24.08	0.05	0.025	0.05	0.36	1.01	0.25	0.0001
Tablas	20.92	0.05	0.025	0.05	1.45	6.26	1.39	0.002
Lechugal	29.52	0.05	0.025	0.05	0.73	3.80	1.02	0.002

La Tabla 4.8 indica los parámetros hidráulicos ubicados en los sitios de los puentes a excepción del río Las Tablas, ya que estos parámetros se escogieron del lugar donde existe la posibilidad de construir un nuevo puente, ubicada en la abscisa 29+53 del tramo del cauce.

4.3. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN GENERAL

La socavación general se produce en cualquier parte del canal debido al paso de la corriente de agua, independientemente de que exista o no un puente. En el caso de que exista un puente el análisis se lo realiza en la sección transversal del emplazamiento y por lo general en épocas de avenida, donde exista una creciente que pueda aumentar la capacidad de corriente para arrastrar material de fondo.

Existen varios métodos empíricos que determinan la socavación general como: el método de Lischtvan-Levediev, el método de Einstein, método de Neil, método de Straub, etc. Siendo el método de Lischtvan-Levediev el más utilizado y recomendado por el Ministerio de Transporte y Obras Publicas del Ecuador (2013, Varios Volúmenes), el cual será empleado para este análisis junto con el método de Einstein para poder realizar un análisis comparativo.

4.3.1. MÉTODO DE LISCHTVAN-LEVEDIEV

El método permite calcular la socavación general incluyendo el caso de que exista la contracción de un puente. Se basa en el equilibrio que debe existir entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media erosiva.

El método tiene como hipótesis en suponer que el caudal unitario perteneciente a cada franja que divide al cauce natural permanece constante durante el proceso erosivo, pudiendo aplicar a suelos friccionantes o cohesivos, a suelos con fondo del cauce homogéneos o heterogéneos.

Para el proyecto, dado sus condiciones geológicas del material del cauce se utilizará la ecuación 4.4 de suelos cohesivos y homogéneos descritos a continuación.

$$H_s = \left[\frac{\alpha h^{5/3}}{0.6\beta\mu\varphi\gamma_s^{1.18}}\right]^{1/1+x} \tag{4.4}$$

Dónde:

H_s: Profundidad de socavación.

α: Coeficiente de Sección que depende de la pendiente hidráulica y el coeficiente de rugosidad de Manning. $\alpha = S^{0.5}/n$.

h: Profundidad del Flujo $[m]$.

β: Coeficiente de Frecuencia, Ver Tabla 4.9.

μ: Factor de Corrección por Contracción, Ver Tabla 4.10.

φ: Factor de Corrección por Forma de Transporte de Sedimentos.

γ_s: Peso Específico del sedimento del lecho $[t/m^3]$.

x: Exponente Variable que depende del peso específico del material cohesivo seco: $x = 0.892619 - 0.58073\gamma_m + 0.136275\gamma_m^2$.

El Factor de Corrección por Forma de Transporte de Sedimentos "φ" es igual a la unidad cuando $\gamma_m = 1.0\, t/m^3$ (Agua Clara), caso contrario si $\gamma_m > 1.0\, t/m^3$ (Lecho móvil, turbiedad), el factor viene dado por $\varphi = -0.54 + 1.5143\gamma_m$. Donde γ_m es el peso específico de la muestra agua sedimento. Este factor tiene como efecto de aumentar la profundidad de socavación.

El Coeficiente de Frecuencia "β" se puede calcular de la siguiente expresión: "$\beta = 0.7929 + 0.093Log\ (Tr)$, donde Tr es el periodo de retorno en años. Existe otra manera de determinar el Coeficiente de Frecuencia a partir de la Tabla 4.9 para diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.9. Coeficiente de Frecuencia "β".

PERIODO DE RETORO EN AÑOS	COEFICIENTE β
5	0.86
10	0.90
20	0.94
50	0.97
100	1.00
500	1.05

Para el Factor de Corrección por Contracción se determina por medio de la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Factor de Corrección por Contracción "μ".

V (m/s)	Luz libre (m)												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
<1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.0	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.5	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.0	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.5	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
>4.0	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

El Factor de Corrección por Contracción"μ" es igual a la unidad cuando no hay contracción, mientras que si es menor a la unidad contribuye al aumento de la profundidad de socavación.

Para el proyecto se considera un periodo de retorno de 100 años, con un peso específico del sedimento $\gamma_s = 2.6\, t/m^3$ y un peso específico agua sedimento $\gamma_m = 1.1\, t/m^3$. Dando como resultado un Coeficiente de Frecuencia $\beta = 1$, un Factor de Forma de transporte $\varphi = 1.13$ y un Exponente $x = 0.41$, que serán posteriormente utilizados para los respectivos cálculos de socavación.

4.3.2. MÉTODO DE EINSTEIN

El método se basa a partir de la teoría de Einstein sobre el transporte de sedimentos y que considera la intensidad del transporte Φ como nula, donde se tiene que la intensidad de flujo ψ toma un valor constante de 30 (GUTIÉRREZ, 1997) descrito en la ecuación 4.5:

$$\psi = 30 = \frac{D(S_s - 1)}{RS_e} \tag{4.5}$$

Dónde:

D: Diámetro medio de la partícula (m).
S_s: Densidad específica para arenas = 2,65.
R: Radio Hidráulico (m).
S_e: Pendiente de Energía.

Asumiendo que el canal es muy ancho, y simplificando los parámetros se llega a la expresión:

$$d_s = 0.222 {q_{max}}^{0.857} D^{-0.286} \tag{4.6}$$

Dónde:

q_{max}: Caudal unitario $m^3/s/m$.
d_s: Profundidad de socavación (m).

Los resultados que se han obtenido tanto para el método de Lischtvan-Levediev como el método de Einstein se encuentran descritos en las Tablas siguientes para los diferentes ríos del proyecto, junto con su respectiva gráfica del perfil de socavación.

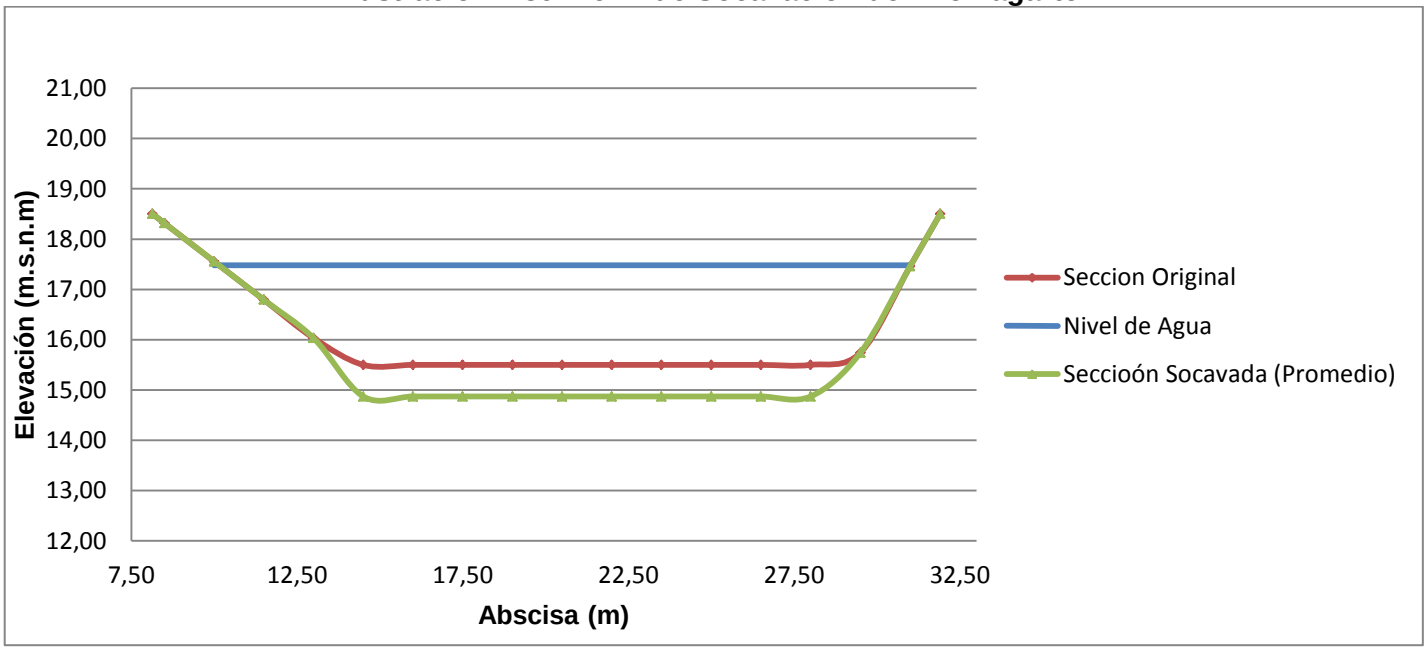
RÍO LAGARTO, LUGAR DEL PUENTE:

Tabla 4.11. Análisis de Socavación General del Río Lagarto.

												M. LISCHTVAN-LEVEDIEV			M. EINSTEIN			PROMEDIO
Abscisa	Cota Fondo (msnm)	Cota Max (msnm)	Calado (m)	Rugosidad n	Ancho (m)	Área (m^2)	Radio Hidra (m)	Velocidad (m/s)	# Froude	q (m^3/s)	qj (m^3/s/m)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	Cota Socavada (msnm)
8.14	18.50	17.48	0.00	0.050	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.50	0.00	0.00	18.50	18.50
8.50	18.32	17.48	0.00	0.050	0.36	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.32	0.00	0.00	18.32	18.32
10.00	17.56	17.48	0.00	0.050	1.50	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.56	0.00	0.00	17.56	17.56
11.50	16.79	17.48	0.69	0.050	1.50	1.03	0.36	0.89	0.34	0.92	0.61	0.36	0.00	16.79	0.43	0.00	16.79	16.79
13.00	16.03	17.48	1.45	0.050	1.50	2.17	0.49	0.89	0.24	1.93	1.29	0.88	0.00	16.03	0.81	0.00	16.03	16.03
14.50	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
16.00	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
17.50	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
19.00	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
20.50	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
22.00	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
23.50	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
25.00	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
26.50	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
28.00	15.50	17.48	1.98	0.025	1.50	2.97	0.54	3.13	0.71	9.30	6.20	2.09	0.11	15.39	3.13	1.15	14.35	14.87
29.50	15.74	17.48	1.74	0.050	1.50	2.61	0.52	0.74	0.18	1.93	1.29	1.09	0.00	15.74	0.81	0.00	15.74	15.74
31.00	17.46	17.48	0.02	0.050	1.50	0.03	0.02	0.74	1.59	0.02	0.02	0.01	0.00	17.46	0.02	0.00	17.46	17.46
31.91	18.50	17.48	0.00	0.050	0.91	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.50	0.00	0.00	18.50	18.50

Para obtener el valor del Factor de Corrección por Contracción "μ" se consideró una luz libre del puente de 16 metros con una velocidad promedio de 3.0m/s.

Ilustración 4.39. Perfil de Socavación del Río Lagarto.



La socavación general para los dos métodos difiere, el método de Lischtvan-Levediev presenta una socavación de 0.11m, mientras que el método de Einstein presenta un valor de 1.15m, existiendo una gran variación de resultados. Para mantener un resultado conservador, es decir que no sobreestime o subestime los resultados se optó por realizar un promedio de estos métodos, dando un valor de socavación igual a 0.63m. En la Ilustración 4.39 la socavación en las márgenes no existe ya que sus velocidades son bajas y la rugosidad de Manning es alta debido a la presencia de vegetación.

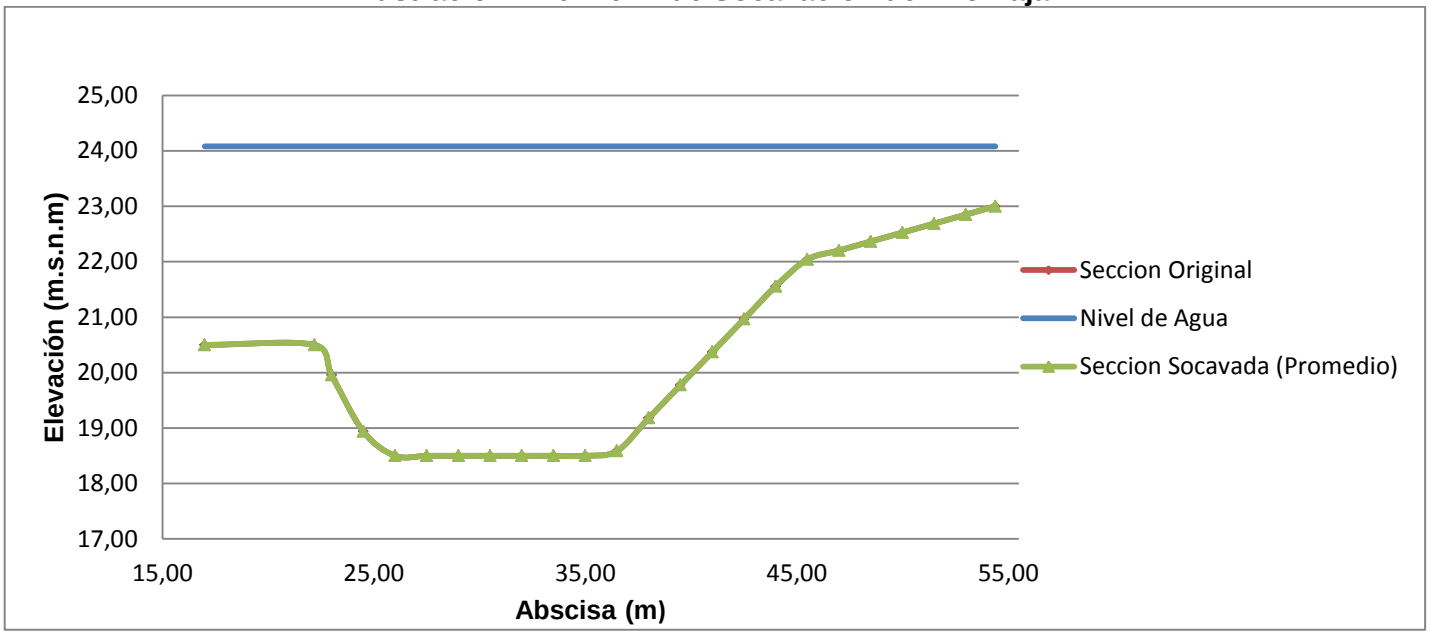
RÍO PAJÁN, LUGAR DEL PUENTE:

Tabla 4.12. Análisis de Socavación General del Río Paján.

												M. LISCHTVAN-LEVEDIEV			M. EINSTEIN			PROMEDIO
Abscisa	Cota Fondo (msnm)	Cota Max (msnm)	Calado (m)	Rugosidad n	Ancho (m)	Área (m^2)	Radio Hidra (m)	Velocidad (m/s)	# Froude	q (m^3/s)	qj ($m^3/s/m$)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	Cota Socavada (msnm)
23.00	19.95	24.08	4.13	0.050	0.81	3.34	0.37	0.36	0.06	1.20	1.49	1.05	0.00	19.95	0.92	0.00	19.95	19.95
24.50	18.94	24.08	5.14	0.025	1.50	7.71	0.65	1.01	0.14	7.79	5.19	2.23	0.00	18.94	2.69	0.00	18.94	18.94
26.00	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
27.50	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
29.00	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
30.50	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
32.00	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
33.50	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
35.00	18.50	24.08	5.58	0.025	1.50	8.37	0.66	1.01	0.14	8.45	5.64	2.45	0.00	18.50	2.89	0.00	18.50	18.50
36.50	18.59	24.08	5.49	0.025	1.50	8.24	0.66	1.01	0.14	8.32	5.55	2.41	0.00	18.59	2.85	0.00	18.59	18.59
38.00	19.18	24.08	4.90	0.500	1.50	7.35	0.65	0.25	0.04	1.84	1.22	0.25	0.00	19.18	0.78	0.00	19.18	19.18
39.50	19.77	24.08	4.31	0.500	1.50	6.46	0.64	0.25	0.04	1.61	1.08	0.22	0.00	19.77	0.70	0.00	19.77	19.77
41.00	20.37	24.08	3.71	0.500	1.50	5.57	0.62	0.25	0.04	1.39	0.93	0.18	0.00	20.37	0.61	0.00	20.37	20.37
42.50	20.96	24.08	3.12	0.500	1.50	4.68	0.60	0.25	0.05	1.17	0.78	0.15	0.00	20.96	0.53	0.00	20.96	20.96
44.00	21.56	24.08	2.52	0.500	1.50	3.79	0.58	0.25	0.05	0.95	0.63	0.11	0.00	21.56	0.44	0.00	21.56	21.56
45.50	22.04	24.08	2.04	0.500	1.50	3.06	0.55	0.25	0.06	0.76	0.51	0.09	0.00	22.04	0.37	0.00	22.04	22.04
47.00	22.20	24.08	1.88	0.500	1.50	2.82	0.54	0.25	0.06	0.70	0.47	0.08	0.00	22.20	0.34	0.00	22.20	22.20
48.50	22.36	24.08	1.72	0.500	1.50	2.57	0.52	0.25	0.06	0.64	0.43	0.07	0.00	22.36	0.32	0.00	22.36	22.36
50.00	22.53	24.08	1.55	0.500	1.50	2.33	0.51	0.25	0.06	0.58	0.39	0.06	0.00	22.53	0.29	0.00	22.53	22.53
51.50	22.69	24.08	1.39	0.500	1.50	2.09	0.49	0.25	0.07	0.52	0.35	0.06	0.00	22.69	0.27	0.00	22.69	22.69
53.00	22.85	24.08	1.23	0.500	1.50	1.84	0.47	0.25	0.07	0.46	0.31	0.05	0.00	22.85	0.24	0.00	22.85	22.85

Para obtener el valor del Factor de Corrección por Contracción "μ" se consideró una luz libre del puente de 16 metros con una velocidad promedio de 1.0m/s.

Ilustración 4.40. Perfil de Socavación del Río Paján.



El río Paján claramente no presenta ninguna socavación general tanto para el método de Lischtvan-Levediev como para el método de Einstein según la Ilustración 4.40, esto se debe a sus velocidades y pendientes bajas, asegurando una erosión casi nula o poco agresiva tanto en el cauce principal como en las márgenes del río.

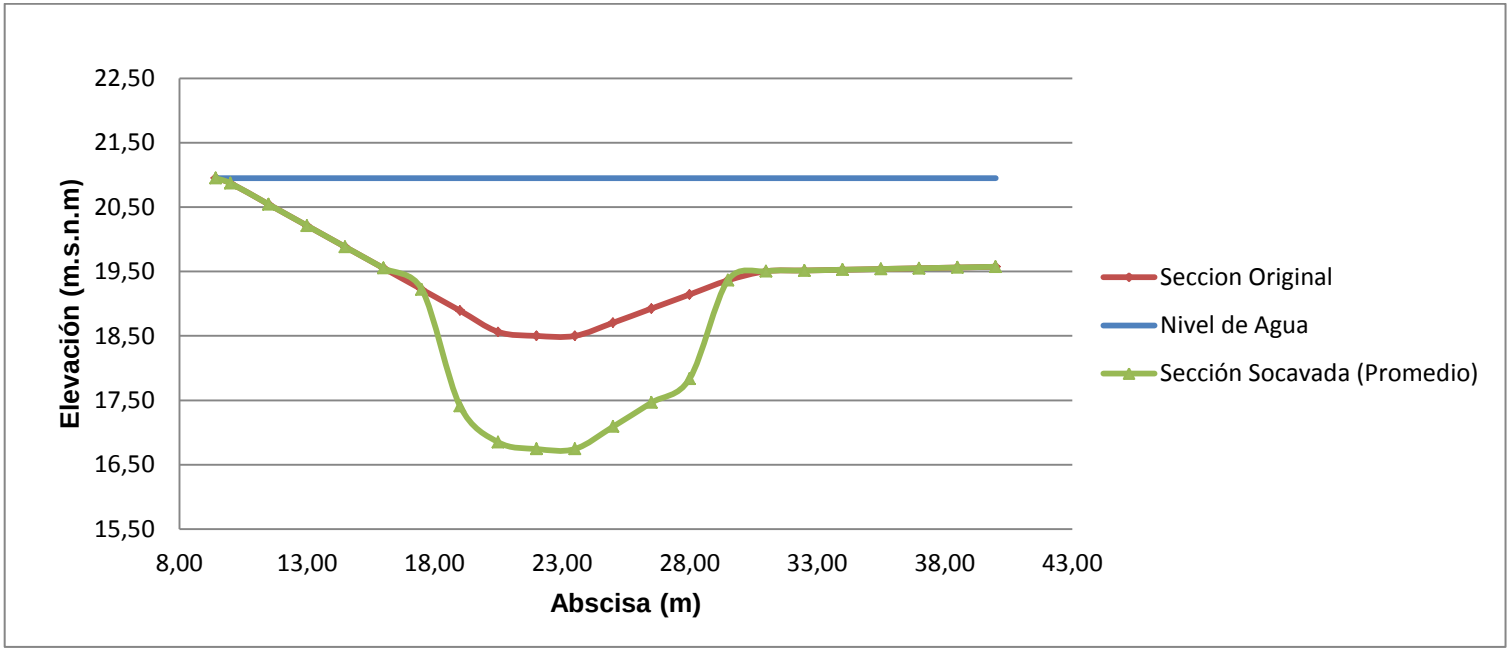
RÍO LAS TABLAS, LUGAR DEL PUENTE:

Tabla 4.13. Análisis de Socavación General del Río Las Tablas.

												M. LISCHTVAN-LEVEDIEV			M. EINSTEIN			PROMEDIO
Abscisa	Cota Fondo (msnm)	Cota Max (msnm)	Calado (m)	Rugosidad n	Ancho (m)	Área (m^2)	Radio Hidra (m)	Velocidad (m/s)	# Froude	q (m^3/s)	qj ($m^3/s/m$)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	Cota Socavada (msnm)
10.00	20.87	20.95	0.08	0.050	0.58	0.05	0.06	0.94	1.08	0.04	0.07	0.04	0.00	20.87	0.07	0.00	20.87	20.87
11.50	20.54	20.95	0.41	0.050	1.50	0.61	0.26	0.94	0.47	0.57	0.38	0.25	0.00	20.54	0.29	0.00	20.54	20.54
13.00	20.21	20.95	0.74	0.050	1.50	1.11	0.37	0.94	0.35	1.04	0.69	0.51	0.00	20.21	0.48	0.00	20.21	20.21
14.50	19.88	20.95	1.07	0.050	1.50	1.60	0.44	0.94	0.29	1.51	1.00	0.79	0.00	19.88	0.66	0.00	19.88	19.88
16.00	19.55	20.95	1.40	0.050	1.50	2.10	0.49	0.94	0.25	1.97	1.31	1.08	0.00	19.55	0.83	0.00	19.55	19.55
17.50	19.22	20.95	1.73	0.050	1.50	2.59	0.52	0.94	0.23	2.44	1.62	1.39	0.00	19.22	0.99	0.00	19.22	19.22
19.00	18.89	20.95	2.06	0.025	1.50	3.09	0.55	4.35	0.97	13.43	8.95	2.79	0.73	18.16	4.29	2.23	16.66	17.41
20.50	18.56	20.95	2.39	0.025	1.50	3.58	0.57	4.35	0.90	15.58	10.39	3.33	0.94	17.62	4.87	2.49	16.08	16.85
22.00	18.50	20.95	2.45	0.025	1.50	3.68	0.57	4.35	0.89	15.99	10.66	3.43	0.98	17.52	4.98	2.53	15.97	16.74
23.50	18.50	20.95	2.45	0.025	1.50	3.68	0.57	4.35	0.89	15.99	10.66	3.43	0.98	17.52	4.98	2.53	15.97	16.74
25.00	18.70	20.95	2.25	0.025	1.50	3.37	0.56	4.35	0.93	14.65	9.77	3.09	0.85	17.86	4.62	2.38	16.33	17.09
26.50	18.92	20.95	2.03	0.025	1.50	3.04	0.55	4.35	0.98	13.22	8.81	2.74	0.71	18.21	4.23	2.21	16.72	17.46
28.00	19.14	20.95	1.81	0.025	1.50	2.71	0.53	4.35	1.03	11.79	7.86	2.39	0.59	18.56	3.84	2.03	17.11	17.83
29.50	19.36	20.95	1.59	0.500	1.50	2.38	0.51	1.53	0.39	3.64	2.43	0.24	0.00	19.36	1.40	0.00	19.36	19.36
31.00	19.50	20.95	1.45	0.500	1.50	2.17	0.49	1.53	0.41	3.32	2.21	0.22	0.00	19.50	1.29	0.00	19.50	19.50
32.50	19.52	20.95	1.43	0.500	1.50	2.15	0.49	1.53	0.41	3.29	2.19	0.22	0.00	19.52	1.29	0.00	19.52	19.52
34.00	19.53	20.95	1.42	0.500	1.50	2.13	0.49	1.53	0.41	3.26	2.18	0.21	0.00	19.53	1.28	0.00	19.53	19.53
35.50	19.54	20.95	1.41	0.500	1.50	2.12	0.49	1.53	0.41	3.24	2.16	0.21	0.00	19.54	1.27	0.00	19.54	19.54
37.00	19.55	20.95	1.40	0.500	1.50	2.10	0.49	1.53	0.41	3.21	2.14	0.21	0.00	19.55	1.26	0.00	19.55	19.55
38.50	19.56	20.95	1.39	0.500	1.50	2.08	0.49	1.53	0.41	3.18	2.12	0.21	0.00	19.56	1.25	0.00	19.56	19.56
40.00	19.57	20.95	1.38	0.500	1.50	2.06	0.49	1.53	0.42	3.16	2.11	0.21	0.00	19.57	1.24	0.00	19.57	19.57

Para obtener el valor del Factor de Corrección por Contracción "μ" se consideró una luz libre del puente de 10 metros con una velocidad promedio de 4.35m/s.

Ilustración 4.41. Perfil de Socavación del Río Las Tablas.



La socavación en la sección del puente del río Las Tablas según el método del Lischtvan-Levediev es de 0.98m, mientras que para el método de Einstein es de 2.53m, haciendo un promedio de estos resultados se obtiene un valor de 1.76m con el motivo de mantener un valor conservador entre estos dos resultados. En la Ilustración 4.41 se puede distinguir que la socavación en el margen derecho es más pronunciada que en el margen izquierdo, esto se debe a que la velocidad en el margen derecho es más elevada que en el margen izquierdo.

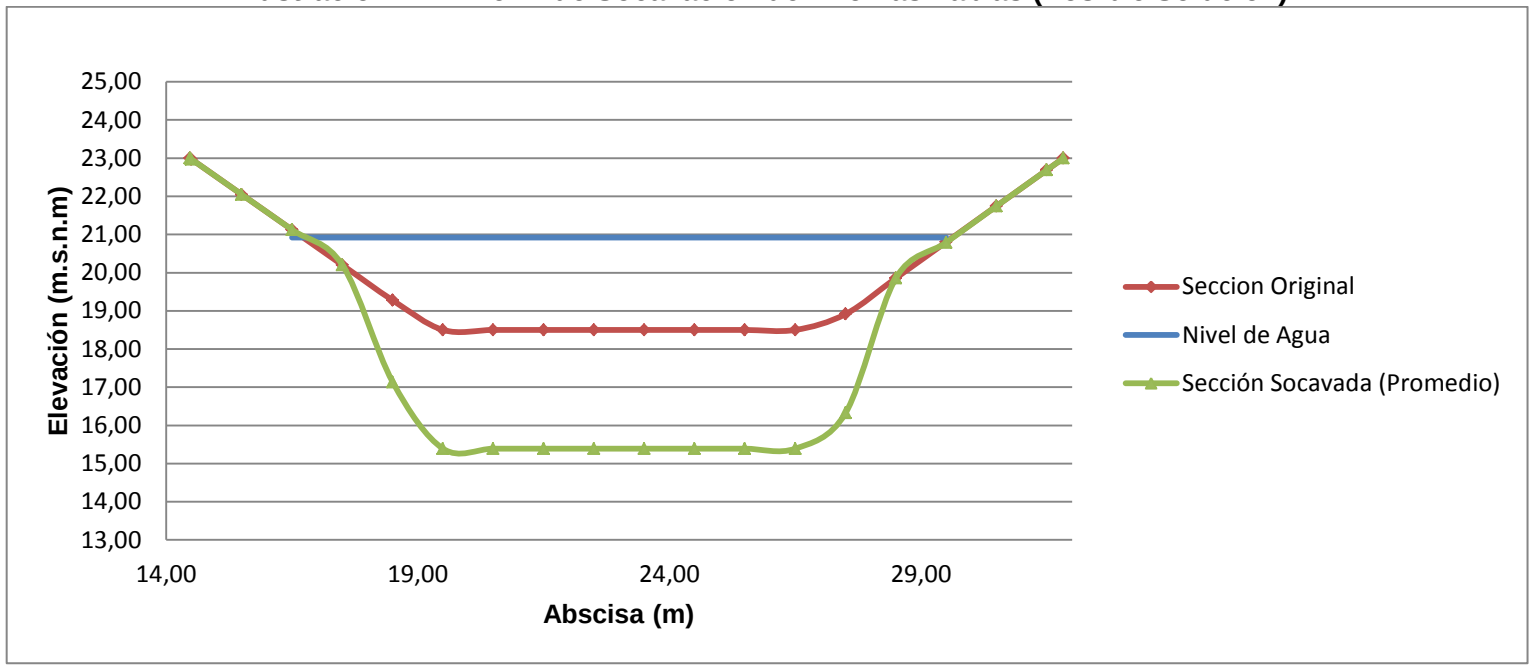
RÍO LAS TABLAS. LUGAR DEL POSIBLE NUEVO PUENTE:

Tabla 4.14. Análisis de Socavación General del Río Las Tablas (Posible Solución).

												M. LISCHTVAN-LEVEDIEV			M. EINSTEIN			PROMEDIO
Abscisa	Cota Fondo (msnm)	Cota Max (msnm)	Calado (m)	Rugosidad n	Ancho (m)	Área (m^2)	Radio Hidra (m)	Velocidad (m/s)	# Froude	q (m^3/s)	qj ($m^3/s/m$)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	Cota Socavada (msnm)
14.47	23.00	20.92	0.00	0.050	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.00	0.00	0	23.00	23.00
14.50	22.97	20.92	0.00	0.050	0.03	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.97	0.00	0.00	22.97	22.97
15.50	22.05	20.92	0.00	0.050	1.00	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.05	0.00	0.00	22.05	22.05
16.50	21.12	20.92	0.00	0.050	1.00	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.12	0.00	0.00	21.12	21.12
17.50	20.20	20.92	0.72	0.050	1.00	0.72	0.30	1.45	0.55	1.04	1.04	0.63	0.00	20.20	0.68	0.00	20.20	20.20
18.50	19.28	20.92	1.64	0.025	1.00	1.64	0.38	6.26	1.56	10.29	10.29	2.74	1.09	18.18	4.83	3.19	16.09	17.13
19.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
20.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
21.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
22.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
23.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
24.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
25.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
26.50	18.50	20.92	2.42	0.025	1.00	2.42	0.41	6.26	1.28	15.15	15.15	4.33	1.91	16.59	6.73	4.31	14.19	15.39
27.50	18.92	20.92	2.00	0.025	1.00	2.00	0.40	6.26	1.41	12.55	12.55	3.46	1.46	17.46	5.73	3.73	15.19	16.32
28.50	19.86	20.92	1.06	0.050	1.00	1.06	0.34	1.39	0.43	1.48	1.48	1.00	0.00	19.86	0.92	0.00	19.86	19.86
29.50	20.80	20.92	0.12	0.050	1.00	0.12	0.10	1.39	1.29	0.16	0.16	0.07	0.00	20.80	0.14	0.02	20.78	20.79
30.50	21.75	20.92	0.00	0.050	1.00	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.75	0.00	0.00	21.75	21.75
31.50	22.69	20.92	0.00	0.050	1.00	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.69	0.00	0.00	22.69	22.69
31.83	23.00	20.92	0.00	0.050	0.33	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.00	0.00	0.00	23.00	23.00

Para obtener el valor del Factor de Corrección por Contracción "μ" se consideró una luz libre del puente de 10 metros con una velocidad promedio de 6.26m/s.

Ilustración 4.42. Perfil de Socavación del Río Las Tablas (Posible Solución).



Para la sección del posible puente nuevo la socavación según el método de Lischtvan-Levediev y el método de Einstein es 1.91m y de 4.31m, respectivamente. El valor promedio de estos valores es de 3.11m; este resultado presenta tener una socavación fuerte debido a una alta velocidad con la que atraviesa el flujo. Además en la Ilustración 4.42 se puede observar que la socavación en el margen izquierdo es ligeramente más pronunciada que en el margen derecho, al atravesar por esa margen una velocidad más alta.

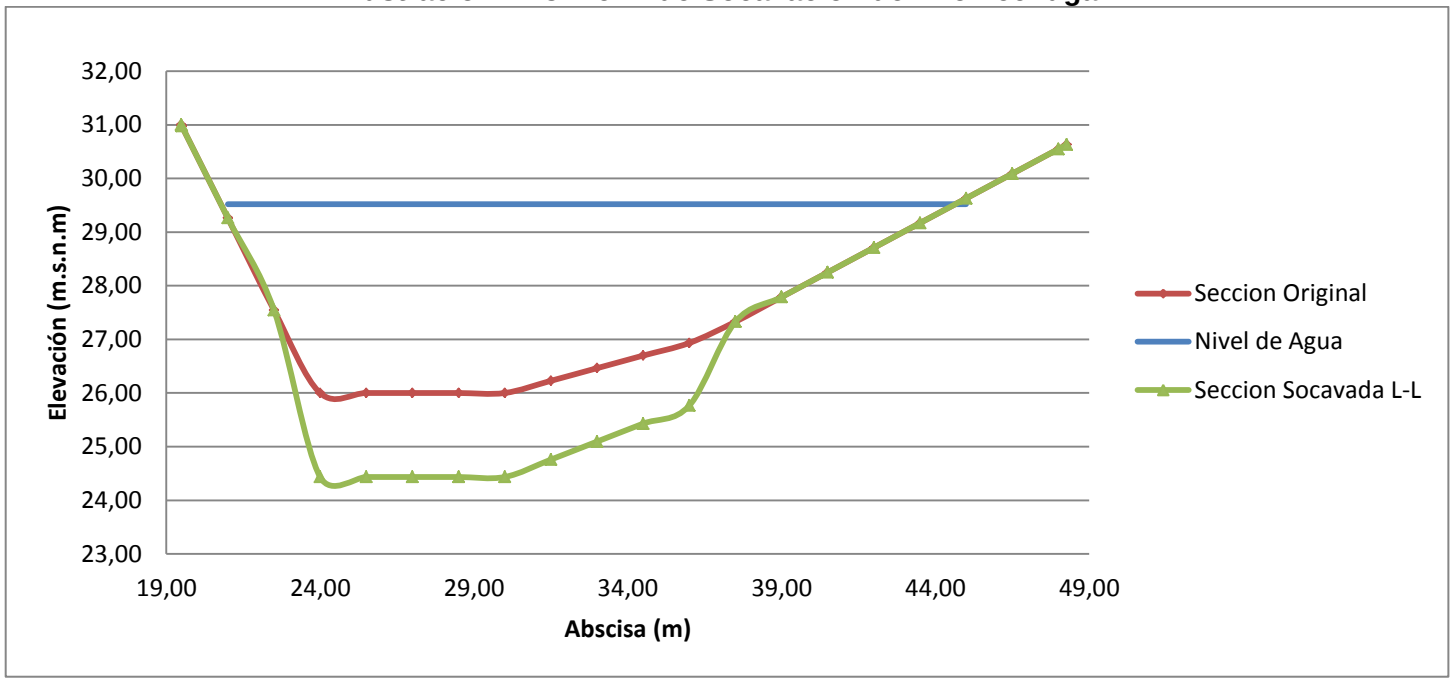
RÍO LECHUGAL, LUGAR DEL PUENTE:

Tabla 4.15. Análisis de Socavación General del Río Lechugal.

												M. LISCHTVAN-LEVEDIEV			M. EINSTEIN			PROMEDIO
Abscisa	Cota Fondo (msnm)	Cota Max (msnm)	Calado (m)	Rugosidad n	Ancho (m)	Área (m^2)	Radio Hidra (m)	Velocidad (m/s)	# Froude	q (m^3/s)	qj ($m^3/s/m$)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	hcj (m)	Sj (m)	Cota Socavada (msnm)	Cota Socavada (msnm)
19.50	30.98	29.52	0.00	0.050	0.02	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.98	0.00	0.00	30.98	30.98
21.00	29.26	29.52	0.26	0.050	1.50	0.39	0.19	0.73	0.46	0.28	0.19	0.11	0.00	29.26	0.16	0.00	29.26	29.26
22.50	27.54	29.52	1.98	0.050	1.50	2.96	0.54	0.73	0.17	2.16	1.44	1.27	0.00	27.54	0.90	0.00	27.54	27.54
24.00	26.00	29.52	3.52	0.025	1.50	5.28	0.62	3.80	0.65	20.06	13.38	4.12	0.60	25.40	6.05	2.53	23.47	24.43
25.50	26.00	29.52	3.52	0.025	1.50	5.28	0.62	3.80	0.65	20.06	13.38	4.12	0.60	25.40	6.05	2.53	23.47	24.43
27.00	26.00	29.52	3.52	0.025	1.50	5.28	0.62	3.80	0.65	20.06	13.38	4.12	0.60	25.40	6.05	2.53	23.47	24.43
28.50	26.00	29.52	3.52	0.025	1.50	5.28	0.62	3.80	0.65	20.06	13.38	4.12	0.60	25.40	6.05	2.53	23.47	24.43
30.00	26.00	29.52	3.52	0.025	1.50	5.28	0.62	3.80	0.65	20.06	13.38	4.12	0.60	25.40	6.05	2.53	23.47	24.43
31.50	26.23	29.52	3.29	0.025	1.50	4.94	0.61	3.80	0.67	18.77	12.51	3.81	0.51	25.71	5.72	2.42	23.80	24.76
33.00	26.46	29.52	3.06	0.025	1.50	4.59	0.60	3.80	0.69	17.43	11.62	3.49	0.43	26.03	5.36	2.31	24.16	25.09
34.50	26.70	29.52	2.82	0.025	1.50	4.23	0.59	3.80	0.72	16.09	10.73	3.17	0.35	26.35	5.01	2.19	24.51	25.43
36.00	26.93	29.52	2.59	0.025	1.50	3.88	0.58	3.80	0.75	14.75	9.83	2.86	0.27	26.66	4.65	2.06	24.87	25.76
37.50	27.33	29.52	2.19	0.050	1.50	3.29	0.56	1.02	0.22	3.35	2.24	1.44	0.00	27.33	1.31	0.00	27.33	27.33
39.00	27.79	29.52	1.73	0.050	1.50	2.60	0.52	1.02	0.25	2.65	1.77	1.09	0.00	27.79	1.07	0.00	27.79	27.79
40.50	28.25	29.52	1.27	0.050	1.50	1.91	0.47	1.02	0.29	1.95	1.30	0.76	0.00	28.25	0.82	0.00	28.25	28.25
42.00	28.71	29.52	0.81	0.050	1.50	1.22	0.39	1.02	0.36	1.24	0.83	0.44	0.00	28.71	0.56	0.00	28.71	28.71
43.50	29.17	29.52	0.35	0.050	1.50	0.53	0.24	1.02	0.55	0.54	0.36	0.17	0.00	29.17	0.27	0.00	29.17	29.17
45.00	29.63	29.52	0.00	0.050	1.50	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.63	0.00	0.00	29.63	29.63
46.50	30.09	29.52	0.00	0.050	1.50	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.09	0.00	0.00	30.09	30.09

Para obtener el valor del Factor de Corrección por Contracción "μ" se consideró una luz libre del puente de 21 metros con una velocidad promedio de 3.5m/s.

Ilustración 4.43. Perfil de Socavación del Río Lechugal.



En el río Lechugal la socavación general presenta un valor para el método de Lischtvan-Levediev y para el método de Einstein de 0.60m y de 2.53m, respectivamente, con un promedio de 1.57m entre estos dos resultados. En la Ilustración 4.43 muestra tener una socavación más reveladora en el margen derecho en comparación al margen izquierdo debido a que presenta velocidades más altas en esa sección.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS E ÍNDICES HIDROLÓGICOS

- Área y Perímetro.- El estudio al contener diversas cuencas hidrográficas que varían en sus parámetros físicos como entre ellos su tamaño, afecta a las condiciones de escorrentía. (CAMPOS, 1992) Clasifica a las cuencas por su tamaño en 5 grupos: Muy pequeña, pequeña, intermedia pequeña, intermedia grande, grande y muy grande. Para el proyecto las cuencas varían en el orden de $2.36 km^2$ a $3726.85 km^2$, clasificando entre cuencas muy pequeñas a cuencas grandes. Para el caso de las subcuenas que contiene la cuenca Quevedo, se las denomina así, por efectos de terminología más no por la clasificación de (CAMPOS, 1992).

- Índice de Compacidad.- El índice de compacidad según (CAMPOS, 1992) clasifica a las cuencas de tres maneras, de las cuales, para el proyecto en su mayoría encasillan en la forma de oval-oblanga a rectangular-oblanga por contener valores mayores a 1.51, pudiendo intensificar las avenidas.

- Índice de Forma.- Las cuencas hidrográficas en su mayoría presentan índices de forma inferiores a 0.46 con lo que demuestran ser cuencas alargadas. Esto puede revelar que: el escurrimiento no se concentrara tan rápidamente, las lluvias intensas serán menos propensas sobre su superficie y puede generar un pico de caudal elevado al acumular lentamente el agua del cauce en comparación de una cuenca que se asemeje a una forma redondeada.

- Densidad de Drenaje.- Con lo que respecta a la densidad de drenaje de las distintas cuencas, los valores fluctúan entre un rango de $(0.52\ a\ 3.31)\mathrm{km\ km^{-2}}$, con lo que indican cuencas pobremente drenadas a moderadamente drenadas, esto puede deberse a factores como el tipo de suelo, cobertura vegetal, litología, pendiente del terreno, etc., ya que una cuenca con una alta cobertura vegetal, altamente permeable puede

disminuir la densidad de drenaje o por lo contrario aumentar cuando la pendiente es pronunciada.

- Relación de Elongación.- La Relación de Elongación que expresan las cuencas difieren sus valores; la gran parte de las cuencas presentan valores entre 0.28 a 0.52, catalogadas como cuencas alargadas a muy alargadas. Para la cuenca S/N presenta un valor de 0.76 tendiendo a ser una cuenca redondeada.

- Pendiente Media.- Este proyecto al estar ubicado en la Región Costa del País no presenta grandes desniveles debido a sus áreas planas, por lo tanto sus pendientes son relativamente bajas en el orden del 10% o inferiores a ella, a excepción de la cuenca Quevedo que presenta un desnivel pronunciado en la parte alta, debido a que abarca una gran cantidad de espacio territorial que comprende desde lugares altos como lo son páramos y bosques ubicados a 4.080 msnm hasta las partes bajas que rodean los 30 msnm. Al igual la cuenca S/N presenta una fuerte pendiente debido a que en el espacio que comprende esta área se ve afectada por la fuerte variación de desnivel. Las cuencas al presentar pendientes poco accidentadas favorecen a una mayor duración de escorrentía, aumenta la infiltración, disminuyendo la erosión, y la cantidad de escorrentía por una alta cobertura vegetal que será interceptada gran parte de la lluvia. No así, en cuencas con pendientes altas como la cuenca S/N, que disminuye el tiempo de concentración y aumenta la erosión. Para el caso de la cuenca Quevedo al estar conformada por tres subcuencas con diferentes pendientes que oscilan entre valores de 13.32% a 1.76% generan una pendiente promedio de 6.53% que a simple vista representa una cuenca poco pronunciada, pero como se trata de una cuenca grande y por efectos de análisis se recomienda estudiar por separado las tres subcuencas, es decir, en la parte alta genera una mayor erosión al igual que un menor tiempo de concentración, pero al estar conformado por una gran variedad de cobertura vegetal hace que disminuya la cantidad de escurrimiento; mientras que para la cuenca baja, al ser una subcuenca con poca pendiente

aumenta la duración del escurrimiento, disminuyendo la erosión y la cantidad de escorrentía por la intercepción de la precipitación a causa de la vegetación existente.

- Uso de Suelo.- El uso de suelo que presentan las áreas de estudio, varían principalmente en cuatro grupos: Pastos Cultivados, Cultivos, Arboricultura y Bosque. De estos grupos, el Pasto Cultivado es el que se encuentra presente en todas las cuencas del proyecto, seguido por los Cultivos, Arboricultura y en menor extensión los Bosques, esto se debe a que el proyecto en su mayoría se encuentra ubicado en la Costa Ecuatoriana caracterizada por sus actividades de Cultivo, a excepción de la cuenca Quevedo por comprender parte de su superficie, en especial la parte alta de la cuenca de Bosques Naturales, Bosques Intervenidos y de Páramo.

- Tiempo de Concentración.- Según la fórmula de Kirpich, el tiempo de concentración está relacionado por la longitud del cauce y el desnivel de la cuenca, esto quiere decir, a mayor longitud del cauce en comparación al desnivel, mayor será el tiempo de concentración, mientras que si el desnivel es superior, menor será el tiempo de concentración, otro factor que afecta al tiempo de concentración es la densidad de drenaje ya que cuencas altamente drenadas hacen que disminuya el tiempo de concentración. Para las cuencas del proyecto el tiempo de concentración varía de 38.4 minutos a 1319.07 minutos, pudiendo afectar a estos tiempos las bajas pendientes, la forma alargada de la cuenca y la capacidad de drenaje.

- Tiempo de Retardo.- El tiempo de retardo está en función de la longitud del cauce, la pendiente de la cuenca y el número de curva. Mientras mayor sea el valor del número de curva y menor la longitud del cauce, el tiempo de retardo será menor. En general, este valor indica el tiempo que tarda en generar el máximo caudal producido por la cuenca. Los tiempos de retardo varían desde 15 minutos a 20 horas, esta diferencia se

debe principalmente a la gran variabilidad que existen en el tamaño de las cuencas, tiempos largos se debe a la forma alargada que presentan muchas de las cuencas, y a pendientes poco pronunciadas, mientras que por valores altos del número de curva hace que este tiempo disminuya.

- Número de Curva.- Los valores de Número de Curva oscilan entre 1 a 100; valores altos implican escorrentías elevadas, infiltraciones bajas, laderas degradadas. En cambio números de curvas bajos aseguran altas tasas de infiltración, baja escorrentía superficial y escasa erosión. Los suelos de las cuencas presentan valores que fluctúan entre 73 a 84, presenciado menor escorrentía superficial en las partes altas del proyecto por la existencia de bosques, páramo y arboricultura que interceptan parte del agua lluvia, mientras en zonas bajas con presencia de cultivos existen un valor de 84 indicando una escorrentía más alta debido a infiltraciones bajas, al presentar suelos saturados.

5.2. HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

- Precipitación Efectiva (Método SCS).- La precipitación efectiva, es la precipitación que va a producir un caudal, esta precipitación está ligado principalmente a la retención potencial máxima según el método de SCS, valores con baja retención potencial máxima, indica escorrentías superficiales altas, es decir que el suelo no puede retener gran cantidad del agua lluvia por presentar suelos saturados, mientras que existe escorrentía superficial baja cuando el suelo puede retener mayor cantidad de agua, esto puede deberse a pendientes bajas, suelos permeables o suelos poco saturados. La retención potencial máxima para las cuencas del proyecto se encuentran en el rango de 49.89mm a 92.96mm, permitiendo diferentes grados de escurrimiento generalmente altos.

- Hietogramas.- A partir del estudio de hidrología de la fase de factibilidad del proyecto PACALORI se han rescatado las intensidades de lluvias máximas de 24 horas para un periodo de retorno de 100 años de 7.32mm/h tanto para la estaciones de Pichilingue como para la de

Babahoyo con precipitaciones de 175.68mm, la diferencia que presentan estas dos estaciones se deriva en los porcentajes de lluvia caídos, debido a que en la estación de Babahoyo en menos de una hora alcanza más del 50% del total de la lluvia, esto se puede apreciar al momento de construir los hietogramas en donde existen picos más pronunciados en comparación a los hietogramas de la estación Pichilingue, dando como resultado caudales más altos para las cuencas representadas por la estación Babahoyo como la cuenca Lagarto y Abras de Mantequilla.

- Hidrogramas.- Por medio del programa HEC-HMS se logró determinar los hidrogramas de diseño al igual que los caudales máximos de las diferentes cuencas. Existen cuencas que presentan caudales altos como la cuenca Abras de Mantequilla en comparación de otras cuencas con mayor superficie de terreno, esto se debe principalmente por la forma que presenta el hietograma de la estación Babahoyo utilizada para esta cuenca; teniendo valores más altos que el hietograma de la estación de Pichilingue. A más de este factor, existen otros factores que pueden involucrar al aumento de caudal como lo es la pendiente, la saturación del suelo y el número de curva antes mencionado.

- Parámetros Hidráulicos.- Por parte del diseño hidráulico, a través del programa HEC-RAS se observó por medio de la modelación hidráulica que el río Paján desborda en todo su tramo (incluido en la sección del puente), el río las Tablas desborda en la sección del puente habiendo una excepción aguas abajo, mientras que en los demás ríos el cauce no desborda en los sitios de puentes. A más de estas observaciones se determinaron ciertos parámetros hidráulicos necesarios para realizar la evaluación de socavación general, dentro de estos parámetros se encuentra las velocidades de flujo rescatadas de los diferentes sitios del puente que varían para los diferentes cauces. En los cuatro sitios de puentes, el tipo de flujo se presenta como subcrítico, permaneciendo valores de Froude menores a 1 con calados altos y velocidades bajas, a excepción del posible nuevo puente ubicado en el río Las Tablas que presenta un flujo supercrítico con un valor de Froude igual a 1.30, presenciado un calado

bajo y velocidades altas pudiendo deberse a un estrechamiento en esa sección del cauce. A más de las velocidades, también se rescató las pendientes de los tramos ubicados en los sitios de puentes que oscilan en el rango de 0.002% a 0.008%, menos la sección del Rio Paján con una pendiente de 0.0001% evidenciando bajas velocidades.

- Socavación.- Los resultados de socavación son diferentes para los puntos de interés ya sea utilizando el método de Lischtvan-Levediev o el método de Einstein, es decir, el método de Lischtvan-Levediev presenta valores más bajos en comparación al método de Einstein. Indiferentemente de los dos métodos empleados para evaluar la socavación, en el puente del río Paján no presenta socavación general producto de sus bajas velocidades a la cual también puede deberse la pendiente del tramo del cauce, mientras para los demás sitios de puentes (incluida la posible solución) existe una socavación general debido a sus velocidades más elevadas. En general, la profundidad de socavación para los diferentes puntos de interés se encuentran entre 0.11m a 1.91m según el método Lischtvan-Levediev, entre 1.15m a 2.53m según el método de Einstein y de 0.63m a 3.11m resultado de un promedio de los dos métodos. Estas profundidades definen la cota de cimentación del puente.

- Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME).- Con lo que respecta al NAME medido en la sección del puente, para el río Lagarto presenta un valor de 1.98m, para el río Lechugal un valor de 3.52m, para el río Las Tablas de 2.45m y para el río Paján siendo el único cauce que desborda en todo su tramo presenta un valor de 5.58m.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las cuencas hidrográficas del proyecto PACALORI clasifican entre cuencas muy pequeñas a cuencas grandes, el índice de compacidad califica como oval-oblanga a rectangular-oblanga pudiendo intensificar las avenidas, el índice de forma demuestran ser cuencas alargadas con una densidad de drenaje pobre a moderada, teniendo tiempos de concentración más altos y con una respuesta de evacuación del agua más lenta ante una crecida. A esto se suma las pendientes poco pronunciadas que también afectan al tiempo de concentración, es decir, cuencas con pendientes bajas hacen que aumente el tiempo de concentración.

- Con lo que respecta al uso de suelo, las cuencas contienen cuatro grupos principalmente de pastos cultivados, cultivos (incluye cultivos de ciclo corto, cultivos de maíz, cultivos de arroz, etc.), arboricultura y bosques en menor cantidad.

- Las condiciones antecedentes de humedad, el grupo de suelo y la cobertura vegetal son los tres factores que determinan el Número de Curva, el proyecto al abarcar varias cuencas hidrográficas presenta valores de 73 a 84, con retenciones potenciales máximas que varían entre 49.89mm a 92.96mm, afectando directamente al escurrimiento superficial, presenciando cuencas con alto escurrimiento debido a condiciones de suelos saturados por tratarse de épocas con grandes precipitaciones y de bajo escurrimiento por una gran cobertura vegetal que retiene gran parte de la lluvia caída.

- Los registros de intensidades de lluvias máximas en 24 horas asumidas en el estudio son elevados, presenciando valores en el orden de 7.32mm/h y con precipitaciones de 175.68mm para un periodo de retorno de 100 años, evidenciando las crecidas.

- Los caudales máximos que general las cuencas del proyecto fueron determinados por el programa computacional HEC-HMS, el cual estimo caudales altos debido a las grandes precipitaciones que existen en

esta área de estudio a más de las condiciones morfológicas, dando valores que varían desde 33.8m^3/s a 2548.7m^3/s.

- Por medio de la modelación del programa HEC-RAS se pudo observar que el río Paján desborda en todo el tramo de estudio, incluida la sección del puente; esto puede deberse a la topografía del lugar ya que presenta una planicie tipo humedal, para el rio Las Tablas el cauce desborda en la sección del puente al no presentar un gran desnivel en dicha sección, existiendo una posible solución de emplazar un nuevo puente sin que haya desbordamiento aguas abajo; por lo que se sugiere dicha construcción en ese sitio ubicado en la abscisa 0+29.53 según la sección evaluada en HEC-RAS. Para los demás ríos no existe desbordamiento en los sitios de puentes con lo que se asegura el buen funcionamiento de las estructuras de drenaje.

- Para determinar la socavación se aplicó el método de Lischtvan-Levediev y el método de Einstein, apreciando una variabilidad en los resultados, presentando un menor valor el método de Lischtvan-Levediev con respecto al de Einstein; motivo por el cual se aplicó un promedio de estos dos resultados. De los cuatro sitios de puentes a más de la posible solución de un nuevo puente, todos presentan socavación a excepción del río Paján por sus bajas velocidades de 1.01m/s y por sus bajas pendientes de 0.0001% al estar situado en una planicie. Para la sección del posible nuevo puente presenta una socavación fuerte de 3.11m debido a sus velocidades altas, por lo que se sugiere la construcción de muros de escollera en las márgenes del río y protección en los estribos del puente.

- A más del estudio de socavación general en los sitios de puente se recomienda hacer un estudio de la socavación local en los estribos del puente.

- Según obtenidas las cotas de socavación para los diferentes sitios de puentes, se recomienda como mínimo una profundidad de los cimientos para los puentes de un metro más abajo de la cota de socavación.

- Partiendo del valor del Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) obtenido en la sección del puente, se recomienda que el galibo entre el espejo del agua y la parte inferior de la superestructura del puente sea mínimo de 2 metros para permitir el paso de materiales flotantes.

7. BIBLIOGRAFÍA

APARICIO MIJARES, F. J. (1992). *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE.* MÉXICO, D.F.: LIMUSA, S.A. DE C.V.

CAMPOS, A. (1992). *PROCESOS DE CICLO HIDROLÓGICO.* SAN LUÍS POTOSÍ: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUÍS POTOSÍ.

GUTIÉRREZ. (1997). *METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE SOCAVACIÓN GENERAL EN CAUCES ALUVIALES. RÍOS NEGROS Y GUAYURIBA.* BOGOTÁ: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

HERNÁNDEZ, R. (2006). *MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN RÍO-ACUÍFERO Y SU APLICACIÓN A UN CASA PRÁCTICO.*MONTERREY: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MONTERREY.

McCUEN, R. H. (1998). *HYDROLOGIC ANALYSIS AND DESIGN.*NEW JERSY: PEARSON EDUCATION.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL, VOLUMEN Nº 2B.* QUITO.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL, VOLUMEN Nº3 .* QUITO.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL, VOLUMENº 2A.* QUITO.

PROMAS, U. D. (2014). *PROYECTO PACALORI TOMO 3: CLIMATOLOGÍA, HIDROLOGÍA, SEDIMENTACIÓN Y BALANCE HÍDRICO.*CUENCA.

SHUMM, S. (1956). *THE FLUVIAL SYSTEM.* NEW YORK: WILEY-INTERSCIENCE PUPLICATION.

UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE. (1972). *SCS NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. SECTION 4. HYDROLOGY.* WASHINTONG, D.C.: U.S. DEPT. OF AGRICULTURE, SOIL CONSERVATION SERVICE.

USACE. (2000). *HEC-HMS HYDROLOGIC MODELING SYSTEM, TECHNICAL REFERENCE MANUAL.* DAVIS, CA.

USACE. (2010). *HEC-RAS RIVER ANALYSIS SYSTEM, USER´S MANUAL.*DAVIS.

VEN TE CHOW. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS.*NEW YORK: McGRAW-HILL.

VEN TE CHOW, DAVID R. MAIDMENT, LARRY W. MAYS. (1988). *APPLIED HYDROLOGY.* NEW YORK: McGRAW-HILL.

VíCTOR L. STREETER, E. BENJAMíN WYLIE. (1988). *MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.*

8. ANEXOS

8.1. TABLAS

8.1.1. HIETOGRAMAS DE DISEÑO

Anexo 8.1. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 1 hora, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
5	13.58	3.83
10	24.95	4.62
15	34.64	5.73
20	43.01	7.29
25	50.30	9.70
30	56.74	13.58
35	62.47	11.37
40	67.60	8.36
45	72.22	6.45
50	76.44	5.13
55	80.27	4.22
60	83.78	3.51
PRECIPITACIÓN TOTAL		83.78

Anexo 8.2. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 6 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
30	56.74	2.49
60	83.78	3.50
90	100.01	5.02
120	111.03	7.17
150	118.20	16.23
180	125.37	56.74
210	130.39	27.04
240	134.54	11.02
270	138.03	7.17
300	141.04	4.15
330	143.52	3.00
360	146.01	2.49
PRECIPITACIÓN TOTAL		146.01

Anexo 8.3. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 12 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
30	56.74	0.98
60	83.78	0.98
90	100.01	1.19
120	111.03	1.38
150	118.20	1.63
180	125.37	1.98
210	130.39	2.49
240	134.54	3.50
270	138.03	5.02
300	141.04	7.17
330	143.52	16.23
360	146.01	56.74
390	147.98	27.04
420	149.96	11.02
450	151.59	7.17
480	153.21	4.15
510	154.59	3.00
540	155.97	2.49
570	157.16	1.98
600	158.36	1.63
630	159.34	1.38
660	160.33	1.19
690	161.31	0.98
720	162.29	0.98
PRECIPITACIÓN TOTAL		162.29

Anexo 8.4. Hietograma de la estación Pichilingue con duración de 24 horas, siendo la precipitación máxima de 133.92 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
60	63.87	0.60
120	84.64	0.67
180	95.57	0.75
240	102.56	0.86
300	107.51	1.01
360	111.30	1.21
420	114.31	1.50
480	116.79	2.10
540	118.89	3.01
600	120.72	4.96
660	122.22	10.93
720	123.72	63.87
780	124.93	20.77
840	126.14	6.99
900	127.15	3.79
960	128.16	2.48
1020	129.03	1.82
1080	129.89	1.50
1140	130.64	1.21
1200	131.39	1.01
1260	132.06	0.86
1320	132.73	0.75
1380	133.32	0.67
1440	133.92	0.60
PRECIPITACIÓN TOTAL		133.92

Anexo 8.5. Hietograma de la estación Babahoyo con duración de 6 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
30	67.27	2.06
60	95.62	3.00
90	111.61	4.43
120	122.03	6.52
150	128.55	15.99
180	135.06	67.27
210	139.49	28.35
240	143.07	10.42
270	146.08	6.52
300	148.63	3.58
330	150.69	2.55
360	152.75	2.06
PRECIPITACIÓN TOTAL		152.75

Anexo 8.6. Hietograma de la estación Babahoyo con duración de 12 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
30	67.27	0.76
60	95.62	0.76
90	111.61	0.93
120	122.03	1.10
150	128.55	1.31
180	135.06	1.62
210	139.49	2.06
240	143.07	3.00
270	146.08	4.43
300	148.63	6.52
330	150.69	15.99
360	152.75	67.27
390	154.37	28.35
420	155.99	10.42
450	157.30	6.52
480	158.60	3.58
510	159.70	2.55
540	160.80	2.06
570	161.73	1.62
600	162.66	1.31
630	163.43	1.10
660	164.19	0.93
690	164.95	0.76
720	165.72	0.76
PRECIPITACIÓN TOTAL		165.72

Anexo 8.7. Hietograma de la estación Babahoyo con duración de 24 horas, siendo la precipitación máxima de 175.68 mm.

t (min)	Lluvia (mm)	Hietograma Construido
60	95.62	0.57
120	122.03	0.63
180	135.06	0.73
240	143.07	0.84
300	148.63	0.99
360	152.75	1.21
420	155.99	1.53
480	158.60	2.20
540	160.80	3.23
600	162.66	5.55
660	164.19	13.04
720	165.72	95.62
780	166.93	26.40
840	168.14	8.01
900	169.14	4.13
960	170.13	2.62
1020	170.97	1.86
1080	171.82	1.53
1140	172.54	1.21
1200	173.27	0.99
1260	173.91	0.84
1320	174.54	0.73
1380	175.11	0.63
1440	175.68	0.57
PRECIPITACIÓN TOTAL		175.68

8.2. REGISTRO FOTOGRÁFICO

8.2.1. RÍO LAGARTO

FOTOGRAFÍA 1.

Lugar de la estructura del puente, en él se observa muros de protección para los estribos del puente, presenta Lechuguines sobre el río, y una abundante vegetación en los márgenes del río aguas arriba del puente.

FOTOGRAFÍA 2.

Lugar aguas abajo del sitio del puente, existe sobre el río la presencia de Lechuguines, presenta una vegetación parcial en la margen derecha del río y con una vegetación densa en la margen izquierda.

8.2.2. RÍO PAJÁN

FOTOGRAFÍA 1.

Lugar del puente, presenta excesiva vegetación de Lechuguines sobre el río, carece de estructuras de protección en los estribos del puente.

FOTOGRAFÍA 2.

Lugar aguas abajo del puente, se observa una extensiva planicie con la presencia de Lechuguines sobre el cauce del río y cultivos a su alrededor.

FOTOGRAFÍA 3.

Representación aguas arriba del sitio del puente, se aprecia una gran planicie con una excesiva cantidad de Lechuguines sobre el río y cultivos en las márgenes del río.

8.2.3. RÍO LAS TABLAS

FOTOGRAFÍA 1.

Lugar del sitio del puente, en él se observa material granulométrico sobre las márgenes, no presenta vegetación, pero aguas abajo se evidencia la presencia de Lechuguines y de Cultivos.

FOTOGRAFÍA 2.

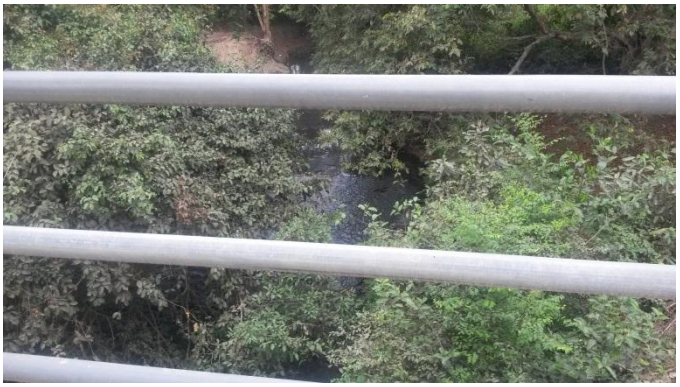
Sitio aguas arriba del puente, se puede apreciar una densa vegetación entre ellas Cultivos en las márgenes del río, al igual que una excesiva cantidad de Lechuguines obre él.

8.2.4. RÍO LECHUGAL

FOTOGRAFÍA 1.

Lugar del puente, carece de muros de protección, en él se observa la presencia de una densa vegetación arbustiva, y existe material granulométrico sobre las márgenes del río.

FOTOGRAFÍA 2.



Representación aguas arriba del sitio del puente, se aprecia vegetación arbustiva en las márgenes del rio, y carece de Lechuguines sobre él.

FOTOGRAFÍA 3.

Sitio aguas abajo del puente, al lado izquierdo de la fotografía se observa parte del estribo de un puente inconcluso, las márgenes del río presentan vegetación arbustiva y no se evidencia la existencia de Lechiguines sobre él.