

CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013

Walfred Colindres Estrada

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WALFRED COLINDRES ESTRADA

ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO

| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
|-----------|--|
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

VOCAL IV Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| DECANO | Ing. Angel Roberto Sic Garcia (| (a.ı.) |) |
|--------|---------------------------------|--------|---|
|--------|---------------------------------|--------|---|

EXAMINADOR Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

EXAMINADOR Ing. Carlos Salvador Gordillo García

EXAMINADOR Ing. Marco Antonio García Díaz

SECRETARIO Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS
DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE
A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 10 de noviembre de 2014.

Walfred Colindres Estrada

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado y aprobado el trabajo de graduación titulado "Curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrológicas de la cuenca Coatán a la cuenca Madre vieja, correspondiente a la vertiente del pacífico para el periodo 2010-2013." Desarrollado por el estudiante universitario Walfred Colindres Estrada, carnet: 200925273, con la asesoría del suscrito

El trabajo en mención satisface los requisitos que exige la facultad, por lo cual recomiendo que se continúe con los trámites para la aprobación de la misma.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

K. Giovanna J. Pérez Loarca Msc. ING. CIVIL COL. No. 7718

Ingeniera Karla Giovanna Pérez Loarca

Asesora





Universidad de San Carlos de Guatemala FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala, 28 de abril de 2016

Ingeniero Hugo Leonel Montenegro Franco Director Escuela Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Walfred Colindres Estrada, quien contó con la asesoría de la Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Claudio César Castañón Contreras

Jefe del Departamento de Hidráulica

FACULTAD DE INGENIERIA DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA USAC

> PROGRAMA DE WGENNERIA COVIL ACREDITADO POR Agencia Centraemericeno de gredtaglör að Pragrames ad Arquitectura e Insunier's

SCUET

PEMODO 2013 - 2015

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Contínua /bbdeb.





Universidad de San Carlos de Guatemala FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela de Ingeniería Civil

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Walfred Colindres Estrada, titulado CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco TAD DE INDENDER

Guatemala, mayo2016 /mrrm.



ESCUELA DE LAGELETA CIVIL

Universidad de San Carlos de Guatemala



Ref.DTG.D.266.2016

DECANO

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERÍODO 2010-2013, presentado por el estudiante universitario: Walfred Colindres Estrada, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing Pedro Antonio Aguilar Polanco

Decano

Guatemala, mayo de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Por su amor, la razón de mi existencia y por ser

mi guía en el camino del bien.

Mis padres Rosa María de Colindres (q. e. p. d.) y Walfred

Orlando Colindres Bathen, por su amor y apoyo constante, que serán siempre la inspiración de

mi vida.

Mis hermanas Michelle y Rosemaríe Colindres Estrada, por su

amor y apoyo importante en mi vida.

Mis abuelos Ana María de Colindres, Manuel Colindres

Aguilar (q. e. p. d.), Sara Morales (q. e. p. d.) y Pedro Estrada, por su amor y buenos consejos

para mi vida.

Mis tíos y primos Por el aprecio demostrado hacia mí.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Por ser e

Carlos de Guatemala

Por ser el alma máter que me abrió las puertas

para fortalecer mis conocimientos de interés.

Facultad de Ingeniería Por ser la facultad donde aprendí y adquirí los

conocimientos de ingeniería civil.

Asesora Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca, por

su apoyo para realizar el presente trabajo de

graduación.

Catedráticos de la

Facultad de Ingeniería

Por ser las personas que compartieron sus

valiosos conocimientos durante mi carrera.

Mis amigos de la

Facultad

Por su apoyo y aprecio durante la carrera.

ÍNDICE GENERAL

| ÍND | ICE DE IL | USTRACI | ONESV |
|------|-----------|----------|---|
| LIST | ΓA DE SÍI | MBOLOS | IX |
| GLC | SARIO | | XI |
| RES | SUMEN | | XVII |
| OBJ | IETIVOS | | XIX |
| INTI | RODUCC | IÓN | XXI |
| | | | |
| 1. | VERTI | ENTE DEL | _ OCÉANO PACÍFICO1 |
| | 1.1. | Descripe | ción y características del lugar1 |
| | 1.2. | | s que conforman la vertiente del Pacífico de |
| | | Guatem | nala2 |
| | 1.3. | Caracte | erísticas de las cuencas hidrológicas2 |
| | | 1.3.1. | Río Suchiate2 |
| | | 1.3.2. | Río Naranjo3 |
| | | 1.3.3. | Río Ocosito3 |
| | | 1.3.4. | Río Samalá4 |
| | | 1.3.5. | Río Nahualate5 |
| | | 1.3.6. | Río Madre Vieja5 |
| | | 1.3.7. | Río Coatán5 |
| | | 1.3.8. | Río Sis-Icán6 |
| | 1.4. | Estaciór | n hidrológica6 |
| | | 1.4.1. | Generalidades6 |
| | | 1.4.2. | Clasificación de las estaciones hidrológicas7 |
| | | | 1.4.2.1. Estación hidrométrica8 |

| | | | | 1.4.2.1.1. | Función | de | una | |
|----|--------|-----------|--------------|---------------|-------------|---------|----------|-----|
| | | | | | estación | hidror | métrica | 8 |
| | | | | 1.4.2.1.2. | Estación | limnin | nétrica | 8 |
| | | 1.4.3. | Instrumen | tos que miden | el nivel de | agua . | | 9 |
| | | | 1.4.3.1. | Limnímetro | | | | 9 |
| | | | 1.4.3.2. | Limnígrafo | | | 1 | 0 |
| | | | | 1.4.3.2.1. | Limnigra | ma | 1 | 3 |
| 2. | REALIZ | ACIÓN DE | AFOROS. | | | | 1 | 5 |
| | 2.1. | Generalio | dades | | | | 1 | 5 |
| | 2.2. | Tipos de | aforo | | | | 1 | 6 |
| | | 2.2.1. | Aforos dire | ectos | | | 1 | 7 |
| | | | 2.2.1.1. | Estimación | aproxir | nada | con | |
| | | | | flotadores | | | 1 | 7 |
| | | | 2.2.1.2. | Molinete | | | 1 | 8 |
| | | | 2.2.1.3. | Aforos quími | cos | | 2 | 1:1 |
| | | | | 2.2.1.3.1. | Aforos | de | vertido | |
| | | | | | constant | e | 2 | 2 |
| | | | | 2.2.1.3.2. | Aforos | de | vertido | |
| | | | | | único o d | de inte | gración2 | 2 |
| | | 2.2.2. | Aforos ind | irectos | | | 2 | 3 |
| | | | 2.2.2.1. | Escalas limn | imétricas | | 2 | 3 |
| | | | 2.2.2.2. | Aforadores d | e verteder | 0 | 2 | 4 |
| 3. | MÉTOE | OO PARA | A LA EI | _ABORACIÓN | DE C | URVA | S DE | |
| | CALIBF | RACIÓN DE | CAUDALE | S | | | 2 | 7 |
| | 3.1. | Generalio | dades | | | | 2 | 7 |
| | 3.2 | Funciona | miento del i | método | | | 2 | g |

| | | 3.2.1. | Factores | que pueden inducir errores en la | a curva |
|----|-------|----------|---------------|-----------------------------------|----------|
| | | | de calibra | ción | 31 |
| | | | 3.2.1.1. | Curva de remanso | 31 |
| | | | 3.2.1.2. | Flujo no permanente | 33 |
| | 3.3. | Métodos | s para deteri | minar curvas de calibración | 35 |
| | | 3.3.1. | Método g | ráfico | 35 |
| | | 3.3.2. | Método p | or ecuaciones hidráulicas | 36 |
| | | 3.3.3. | Métodos | matemáticos | 37 |
| | | 3.3.4. | Curva po | encial | 38 |
| | 3.4. | Extrapo | lación de la | curva de calibración | 40 |
| | | 3.4.1. | Método g | ráfico | 42 |
| | | 3.4.2. | Método á | rea-velocidad media | 43 |
| | | 3.4.3. | Método d | e Stevens | 44 |
| | | 3.4.4. | Método d | e Manning | 45 |
| | | 3.4.5. | Método d | e área-pendiente | 46 |
| | 3.5. | Aplicaci | ón del métod | do | 48 |
| 4. | SIMUL | ACIONES | HIDRÁULIC | :AS HEC-RAS | 51 |
| | 4.1. | General | lidades | | 51 |
| | 4.2. | Informa | ción de disei | ňo | 51 |
| | 4.3. | Aplicaci | ón del métod | do | 53 |
| | 4.4. | Procedi | miento de ur | na simulación para flujo no perma | inente53 |
| 5. | INFOR | MACIÓN | OBTENIDA | EN CAMPO DE LAS ESTAC | IONES |
| | HIDRO | MÉTRICA | .S | | 67 |
| 6. | RESUL | _TADOS | Y DESARI | ROLLO DE LAS CURVAS I | DE |
| | CALIB | RACIÓN | | | 79 |
| | 6.1. | Procedi | miento para | determinar Ho | 80 |

| 6.2. | Procedimiento para determinar la ecuación de cada cu | ırva |
|----------------------|--|------|
| | de calibración por regresión potencial | 81 |
| CONCLUSION | IES | 111 |
| RECOMENDA | CIONES | 113 |
| BIBLIOGRAFÍ <i>A</i> | Α | 115 |
| ANEXOS | | 117 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| 1. | Estación hidrológica | 7 |
|-----|--|----|
| 2. | Limnímetro | 10 |
| 3. | Partes de un limnígrafo | 11 |
| 4. | Limnigrama de la cuenca Suchiate, estación Malacatán | 14 |
| 5. | Sección de agua | 18 |
| 6. | Molinete | 19 |
| 7. | Sección de cauce | 20 |
| 8. | Perfiles de velocidad | 21 |
| 9. | Vertido constante | 22 |
| 10. | Vertido único | 23 |
| 11. | Escala limnimétrica escalonada | 24 |
| 12. | Vertedero | 25 |
| 13. | Ejemplo curva de calibración cuenca Coatán | 30 |
| 14. | Hidrograma | 31 |
| 15. | Curva de remanso | 32 |
| 16. | Curva de calibración para flujo no permanente | 34 |
| 17. | Determinación de ho (diferencia nivel de agua y cero de la escala) | 39 |
| 18. | Diagrama método de área-pendiente | 47 |
| 19. | Datos geométricos | 54 |
| 20. | Sección transversal | 55 |
| 21. | Datos para flujo no permanente | 56 |
| 22. | Datos de hidrograma | 57 |
| 23. | Datos de pendiente | 58 |

| 24. | Condiciones iniciales | 59 |
|-----|--|----|
| 25. | Simulación para flujo no permanente | 60 |
| 26. | Sección transversal, cuenca Coatán | 61 |
| 27. | Perfil, cuenca Coatán | 62 |
| 28. | Curvas de calibración, cuenca Coatán | 63 |
| 29. | Tramo de secciones en 3D, cuenca Coatán | 64 |
| 30. | Tabla de resumen, cuenca Coatán | 65 |
| 31. | Gráfica Log(Q) contra Log(H-Ho) | 81 |
| 32. | Curva de calibración, cuenca Coatán | 84 |
| 33. | Sección de control, río Coatán | 85 |
| 34. | Perfil de estaciones, río Coatán | 85 |
| 35. | Perspectiva en 3D estaciones, río Coatán | 86 |
| 36. | Curva de calibración, cuenca Suchiate | 87 |
| 37. | Sección de control, río Suchiate | 87 |
| 38. | Perfil de estaciones, río Suchiate | 88 |
| 39. | Perspectiva en 3D estaciones, río Suchiate | 88 |
| 40. | Curva de calibración, cuenca Naranjo | 89 |
| 41. | Sección de control, río Naranjo | 90 |
| 42. | Perfil de estaciones, río Naranjo | 90 |
| 43. | Perspectiva en 3D estaciones, río Naranjo | 91 |
| 44. | Curva de calibración, cuenca Ocosito | 92 |
| 45. | Sección de control, río Ocosito | 93 |
| 46. | Perfil de estaciones, río Ocosito | 93 |
| 47. | Perspectiva en 3D estaciones, río Ocosito | 94 |
| 48. | Curva de calibración, cuenca Samalá | 95 |
| 49. | Sección de control, río Samalá | 96 |
| 50. | Perfil de estaciones, río Samalá | 96 |
| 51. | Perspectiva en 3D estaciones, río Samalá | 97 |
| 52 | Curva de calibración, cuenca Sis | 98 |

| 53. | Sección de control, río Sis | 99 |
|-------|---|-----|
| 54. | Perfil de estaciones, río Sis | 99 |
| 55. | Perspectiva en 3D estaciones rio Sis | 100 |
| 56. | Curva de calibración, cuenca Icán | 101 |
| 57. | Sección de control, río Icán | 102 |
| 58. | Perfil de estaciones, río Icán | 102 |
| 59. | Perspectiva en 3D estaciones, río Icán | 103 |
| 60. | Curva de calibración, cuenca Nahualate | 104 |
| 61. | Sección de control, río Nahualate | 105 |
| 62. | Perfil de estaciones, río Nahualate | 105 |
| 63. | Perspectiva en 3D estaciones, río Nahualate | 106 |
| 64. | Curva de calibración, cuenca Madre Vieja | 107 |
| 65. | Sección de control, río Madre Vieja | 108 |
| 66. | Perfil de estaciones, río Madre Vieja | 108 |
| 67. | Perspectiva en 3D estaciones, río Madre Vieja | 109 |
| | | |
| | TABLAS | |
| I. | Identificación de cuencas | 67 |
| II. | Dimensionales de las mediciones | 68 |
| III. | Información, cuenca Coatán | 68 |
| IV. | Información, cuenca Suchiate | 69 |
| V. | Información, cuenca Naranjo | 71 |
| VI. | Información, cuenca Ocosito | 73 |
| VII. | Información, cuenca Samalá | 74 |
| VIII. | Información, cuenca Sis | 75 |
| IX. | Información, cuenca Icán | 76 |
| X. | Información, cuenca Nahualate | 77 |
| XI. | Información, cuenca Madre Vieja | 78 |

| XII. | Datos de Ho, cuenca Coatán | 80 |
|-------|-----------------------------------|----|
| XIII. | Datos logarítmicos, cuenca Coatán | 82 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo **Significado**

Н Altura de nivel de agua

Área Α Q Caudal

Centímetro cm

Coeficiente de rugosidad de Manning n

km Kilómetro

km² Kilómetro cuadrado

Metro

 m^2/s Metro cuadrado sobre segundo

 m^3 Metro cúbico

 m^2/s Metro cúbico sobre segundo

m/s Metro sobre segundo

Mm Milímetro

Nivel cuando el caudal es cero Нο

So Pendiente del canal Hf Pérdida de energía Ρ Perímetro mojado Υ

Rh Radio hidráulico

S Segundos

dh/dt Tasa de cambio del nivel de agua con el tiempo

Profundidad del flujo

V Velocidad

Vm Velocidad media



GLOSARIO

Afluente En hidrología, corresponde a un curso de agua,

también llamado tributario, que no desemboca en el

mar, sino en otro río más importante con el cual se

une en un lugar llamado confluencia.

Aforo Proceso y arte de medir las alturas, áreas,

velocidades y caudales en los ríos.

Agua superficial Agua sobre la superficie del suelo.

Aguas abajo Dirección en el sentido de la corriente.

Aguas arriba Dirección en el sentido contrario de la corriente.

Cauce Conducto abierto, creado natural o artificialmente,

el cual contiene agua en movimiento periódico o

continuamente.

Caudal Magnitud del flujo de una corriente en un lugar

determinado de su curso, o del flujo que mana de

una fuente.

Caudal medio

Media aritmética de los caudales de todos los años hidrológicos completos registrados, sean o no consecutivos. Generalmente solo se publican los caudales medios cuando el número de años es igual o mayor de cinco.

Ciclo hidrológico

Circulación del agua desde el mar a la tierra y desde la tierra de nuevo al mar. Esta circulación es muy compleja estando constituida por un circuito principal y muchos circuitos secundarios.

Corriente

Término general para dominar la masa de agua que fluye en un cauce natural o artificial.

Crecida

Flujo relativamente alto de una corriente.

Estación de aforos

Estación para la medida regular del caudal de una corriente. De acuerdo con las instalaciones y métodos empleados para medir el caudal.

Estación hidrológica

Esta denominación incluye tanto a las estaciones fluviométricas como a las estaciones limnimétricas, no obstante, generalmente la denominación hidrológica es sinónima de fluviométrica.

Estación limnimétrica

La que efectúa medidas regulares del nivel del lago y temperatura del agua.

GS

Geological Survey.

HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center's and River Analysis System.

Hidrología

Ciencia que trata de las características y propiedades del agua sobre el suelo y su interior, principalmente de la distribución del agua procedente de lluvias recientes o de la fusión de las nieves.

Infiltración

Movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo. La infiltración es igual a la precipitación total menos las pérdidas debidas a la interceptación por la vegetación, a la retención en depresiones, a la evaporación y a la escorrentía superficial.

Insivumeh

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Inundación

Invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal causadas por lluvias abundantes en la cuenca correspondiente. Limnígrafo

Instrumento que mide y registra de forma automática y continua, la altura de la superficie de un lago.

Limnímetro

Es un instrumento que permite registrar y transmitir la medida de la altura de agua (en un punto determinado) de un río.

Lisímetro

Aparato para medir la cantidad de agua procedente de la precipitación que penetra en el suelo.

Molinete

Instrumento para medir la velocidad del flujo.

OMM

Organización Meteorológica Mundial

Precipitación

Hidrometeoro constituido por una agregación de partículas acuosas, líquidas o sólidas, que cae de una nube o grupo de nubes y que llega a alcanzar la superficie de la tierra.

Red hidrológica de estaciones

Conjunto de estaciones meteorológicas e hidrológicas en una cuenca, situadas de forma que sus observaciones puedan facilitar los datos básicos necesarios para el conocimiento del régimen de la cuenca en el espacio y en el tiempo.

Río Corriente de agua superficial que va a

desembocar a otra o al mar.

Sección de aforos Sección transversal de una corriente donde se

mide el caudal.

Sedimentos Materiales fragmentarios originados por la

acción de los elementos atmosféricos en las rocas y que es transportado, en estado de

suspensión, por el agua o el viento.

Volumen de escorrentía Volumen de agua que afluye a lo largo de la

superficie del suelo, durante y después de la

precipitación.

Zona de inundación Tierras que bordean un río y que están sujetas

a inundaciones con una frecuencia parecida.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo la elaboración de las curvas de calibración de caudales de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico.

Las curvas de calibración se construyeron a partir de los registros e información obtenidos de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), ubicadas en las cuencas hidrológicas antes mencionadas. Estas curvas relacionan los caudales con los niveles de agua, teniendo como aplicación conocer la fluctuación de caudales en función de la altura de agua, registrados en un periodo, en este caso de 2010 a 2013.

Asimismo, sirven para conocer el comportamiento del río en crecidas (máximas alturas de agua) relacionadas con la topografía del cauce de las cuencas hidrológicas y de referencia, indispensable para cualquier tipo de estudio que se desee realizar. Estos estudios pueden estar relacionados con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

OBJETIVOS

General

Determinar las curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), que se encuentran ubicadas en las cuencas Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, de la vertiente del Pacífico, para el periodo 2010-2013.

Específicos

- Determinar caudales con mayor facilidad, con relación a sus niveles de agua, por medio de las ecuaciones que representan las curvas de calibración de caudales.
- 2. Construir curvas de calibración por medio de una regresión potencial y extrapolar estas curvas con simulaciones hidráulicas creadas por el programa HEC-RAS, determinando una ecuación de cada curva que estime caudales en función de un nivel de agua. Además que estas curvas sirvan de referencia para obtener caudales que puedan ser utilizados en estudios hidrológicos.
- Obtener la mayor información posible para próximos estudios hidrológicos y que la misma sea útil para contribuir con el desarrollo del país.

INTRODUCCIÓN

En ocasiones, dependiendo de la ubicación, topografía del terreno y magnitud del flujo de agua en una sección de control o estación hidrométrica, los aforos o medición directa de caudales continuos en el tiempo son muy costosos, por lo que se hace una relación de caudales con niveles de agua. Esta información se registra en cada estación hidrométrica para un periodo determinado, y sirve de referencia para trazar las curvas de calibración.

Existen diferentes procedimientos y metodologías para determinar las curvas de calibración nivel-caudal. En Latinoamérica, en general, se ha popularizado el uso del método gráfico para su determinación. Sin embargo, gracias al desarrollo de los computadores, de la tecnología informática asociada y su gran facilidad de uso, las curvas de calibración pueden ser generadas utilizando técnicas de cálculo que minimizan los errores inherentes a los procedimientos gráficos y manuales. Es necesario resaltar que la experiencia del analista y su conocimiento de la dinámica del río y los controles hidráulicos son muy importantes para la correcta elaboración de las curvas de calibración. Para el presente trabajo se aplicó un método matemático, haciendo una regresión potencial con el uso del programa de cómputo Excel.

Las curvas de calibración se determinarán con objeto de encontrar caudales para cualquier nivel de altura de agua, relacionado estos niveles con la topografía del cauce de cada cuenca de estudio.

Estas curvas se construirán con base en los registros e información obtenida de las estaciones hidrométricas, ubicadas en las cuencas de estudio y pertenecientes a la red hidrológica nacional del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), para el periodo de 2010 a 2013.

Para estudios hidrológicos donde se predicen crecidas, se diseñan obras hidráulicas o se ubican zonas con riesgo de inundación, es necesario conocer los caudales máximos extremos. La medición directa de estos caudales máximos extremos rara vez se puede realizar ya que están en condiciones críticas, por lo que se hace una extrapolación de la curva de calibración por medio de un método de cálculo para hallar los caudales que correspondan a estos niveles. Para determinar el método de extrapolación más adecuado, se debe tener en cuenta la información disponible en cada estación de control. Para el presente trabajo, se utilizó el programa HEC-RAS, donde se realizaron simulaciones hidráulicas para cada una de las cuencas de estudio. Con HEC-RAS se simularon caudales para diferentes alturas de nivel, hasta llegar al desborde del cauce, conociendo así los caudales máximos extremos.

La determinación de los caudales en un río representa una tarea de suma importancia, porque se constituyen en datos básicos e indispensables para cualquier tipo de estudio que se desee adelantar relacionado con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

1. VERTIENTE DEL OCÉANO PACÍFICO

1.1. Descripción y características del lugar

Los ríos que corresponden a la vertiente del Pacífico tienen longitudes cortas (110 km promedio) y se originan a una altura media de 3 000 MSNM. Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10 y el 20%, cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando grandes zonas susceptibles a inundación en esta área. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, así como tiempos de propagación muy cortos.

Por otro lado, todos los ríos de la Vertiente del Pacífico acarrean grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que la cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente. Debido a este arrastre de material, los ríos tienen cursos inestables que causan daños e inundaciones en la planicie costera. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras, con una precipitación media anual de 2 200 mm. La vertiente del Pacífico en Guatemala ocupa el 25 por ciento del país.

El rango de las precipitaciones se encuentra entre los 1 500 a 4 500 mm anuales, en el sector oeste-este de la vertiente, siendo inferiores en el sector este y mayores hacia el oeste. Mientras que el rango para el sector norte-sur de la vertiente se encuentra entre 700 a 1 500 mm anuales, siendo inferiores los valores en la parte costera y aumentando conforme las elevaciones.

A partir de estas informaciones se estima un volumen de escorrentía de 25 500 millones de metros cúbicos por año.

1.2. Cuencas que conforman la vertiente del Pacífico de Guatemala

Las cuencas que conforman la vertiente del Pacífico son: Coatán (nace en Guatemala y entra en México), Suchiate (sirve de frontera con México), Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate, Atitlán, Madre Vieja, Coyolate, Acome, Achiguate, María Linda, Paso Hondo, De los Esclavos, Paz y Ostua-Guija (nacen en Guatemala y entran a El Salvador) y Olopa, que sirve de frontera con El Salvador.

1.3. Características de las cuencas hidrológicas

A continuación se encontrará una breve descripción de las características de las cuencas de estudio.

1.3.1. Río Suchiate

Marca la frontera occidental entre México y Guatemala. Nace en una altitud de 3 000 msnm en las faldas surorientales del volcán Tacaná en el departamento de San Marcos y discurre en dirección sur-suroeste hasta desembocar en el océano Pacífico. Los últimos 75 km del río forman la frontera entre México y Guatemala.

La cuenca del río Suchiate tiene una superficie de 1 064 km² en territorio guatemalteco y 336 km² en territorio mexicano. El nombre Suchiate es derivado de las palabras náhuatl *Xochi atl*, que quiere decir agua de flores.

1.3.2. Río Naranjo

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 105 km. Nace en la sierra Madre en el departamento de San Marcos y descorre en dirección del sur, pasa por la ciudad de Coatepeque, en Quetzaltenango, atraviesa la planicie costera en el departamento de Retalhuleu, para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del río Naranjo tiene una superficie de 1 273 km², con una población aproximada de 272 611 habitantes.

1.3.3. Río Ocosito

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 107 km. Nace en la sierra Madre en el departamento de Quetzaltenango. Discurre en dirección del sur, atraviesa el departamento de Retalhuleu y torna hacia el oeste para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Ocosito tiene una superficie de 2 035 km².

1.3.4. Río Samalá

Es un río costero del suroccidente de Guatemala. Sus fuentes nacen en los cerros de la sierra Madre en los departamentos Totonicapán (Momostenango, San Vicente Buenabaj, San Francisco el Alto) y Quetzaltenango (San Carlos Sija). Corre por las ciudades de San Cristóbal Totonicapán y Quetzaltenango, y baja en una zona quebrada en el Palmar y Zunil, donde se forman cascadas, hacia la planicie de la costa en Retalhuleu para desembocar en el océano Pacífico. Su principales afluentes son los rios Xequijel o Siguilá, El Tambor, Nima I y Oc.

El río Samalá tiene una longitud de 145 km. Su cuenca tiene una superficie de 1 510 km² en la que vive una población de aproximadamente 400 000 habitantes. Su proximidad al complejo volcánico Santa María-Santiaguito, con sus flujos de lava y lahar, resulta en un elevado riesgo de serias inundaciones.

La corriente del río es explotado para mover molinos de trigo en Totonicapán y San Cristóbal, y la fábrica de hilados y tejidos en Cantel. En Zunil es aprovechado para generar energía hidroeléctrica en la planta hidroeléctrica Santa María, que entró en operación en 1927.

1.3.5. Río Nahualate

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 130 km. Nace en la Sierra Madre, cerca de Santa Catarina Ixtahuacán y Nahualá (Sololá) y discurre en dirección del sur, atraviesa los departamentos de Sololá, Suchitepéquez y Escuintla para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Nahualate tiene una superficie de 1 941 km².

1.3.6. Río Madre Vieja

Es un corto río costero del suroeste de Guatemala con una longitud de 126 km, nace en la Sierra Madre, en el área limítrofe de los departamentos de Quiché, Sololá, y Chimaltenango y discurre en dirección del sur, atravesando la planicie costera de Suchitepéquez y Escuintla para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Madre Vieja tiene una superficie de 1 007 km².

1.3.7. Río Coatán

La cuenca del río Coatán es compartida entre México y Guatemala en la vertiente del océano Pacífico y su río tributario principal es el río Coatán. La cuenca en su totalidad posee una extensión de 270 km² de las cuales 37 por ciento se ubica en territorio guatemalteco y el restante 63 por ciento en México. Las coordenadas geográficas extremas son 14° 45' y 15° 17' de latitud norte y 91° 56' y 92° 31' SW longitud oeste, con altitudes que van desde los 0 msnm hasta los 2 700 msnm.

1.3.8. Río Sis-Icán

El río Sis sirve de línea divisoria entre Retalhuleu y Suchitepéquez, se une al río Icán, el cual atraviesa los municipios de San Francisco Zapotitlán, Cuyotenango, San Lorenzo y Mazatenango.

El río Icán es un río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 53 km. Nace en la sierra Madre, en las laderas del volcán de Santo Tomás, en el departamento de Suchitepéquez y discurre en dirección del sur, atravesando la planicie costera de Suchitepéquez para desembocar en el océano Pacífico. El río corre paralelo a su principal afluente, el río Sis. La cuenca Sis-Icán tiene una superficie de 919 km².

1.4. Estación hidrológica

A continuación se describen las generalidades, así como la clasificación de una estación hidrológica.

1.4.1. Generalidades

Una estación hidrológica es el lugar donde se efectúan observaciones hidrológicas o climatológicas para fines hidrológicos.

1.4.2. Clasificación de las estaciones hidrológicas

El Reglamento número 49 de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) clasifica a las estaciones en:

- Estaciones hidrométricas
- Estaciones climatológicas para fines hidrológicos
- Estaciones de agua subterránea
- Estaciones hidrológicas para propósitos específicos

Figura 1. Estación hidrológica

Fuente: Estaciones hidrológicas.

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/Abastecimiento_Contenido_en_linea/leccin_22_estaciones_hidrolgicas.html. Consulta: 25 de octubre de 2014.

1.4.2.1. Estación hidrométrica

Se define como el lugar de observación en el cual se obtienen datos sobre el agua de ríos, lagos o embalses. En una estación hidrométrica se deberá observar uno o más de los elementos que se citan a continuación:

- Nivel de agua de los ríos, lagos y embalses.
- Caudal o flujo de las corrientes.
- Transporte o depósito de sedimentos o ambos.
- Temperatura y otras propiedades físicas del agua de un río, lago y embalses.
- Propiedades químicas del agua de los ríos, lagos y embalses.

1.4.2.1.1. Función de una estación hidrométrica

Las mediciones de los niveles de agua de los ríos, lagos o algún cuerpo de agua se usan directamente para predecir crecidas (máximas alturas de agua), definir o delinear zonas con riesgo de inundación y proyectar estructuras (puentes u otras obras hidráulicas).

1.4.2.1.2. Estación limnimétrica

Es el lugar donde se obtienen datos del nivel de agua durante un programa observacional sistemático. El instrumento de medición directa es el limnímetro, su instalación representa un bajo costo, sin embargo los datos no son continuos y precisos. Los datos de nivel se utilizan como base para computar registros de caudal o cambios en el almacenamiento de agua.

Los limnímetros, en el caso de ríos muy caudalosos, son importantes para fines de navegación, pesca, alerta a inundaciones. En los lugares donde se han instalados los limnímetros es indispensable que se realicen campañas de aforos para el cálculo de caudales o disponibilidad de agua.

1.4.3. Instrumentos que miden el nivel de agua

En las estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) se cuenta con el limnímetro y limnígrafo.

1.4.3.1. Limnímetro

Es una regla graduada que permite medir las fluctuaciones del nivel del agua. El Reglamento Técnico OMM número 49 indica las características funcionales que deben reunir los limnímetros y tipos de limnímetros.

- Deben ser precisos y estar claramente graduados.
- Deben ser resistentes a la corrosión y de fácil mantenimiento.
- Deben ser fáciles de instalar y utilizar.
- Las graduaciones deberán ser claras y permanentes. Los números deberán ser claramente legibles y estar situados de tal manera que no haya ninguna posibilidad de ambigüedad.
- Para dar conformidad a su construcción, se deberá constatar que las marcaciones de las subdivisiones tendrá una precisión de ± 0,5 mm y el error acumulado de longitud no será superior al mayor de dos valores siguientes: 0,1 por ciento o 0,5 milímetros.

.250 DICH DIA. HOLE BEFORE ENWELDIG. INSTALL BRASS GROWETS WITH 2.500 3/16 INCH 1.0., FIN19/EO. 1.250 7.087 19.685 23 38 100m = 10 SPACES EACH SPACE = 10m 32.7nn TOLERANCE NON-ACCUMULATIVE 27.7m 100.0nn ALL NUMBERS: 20nnH X 8nnN 12.7nn

Figura 2. **Limnímetro**

Fuente: Guía de hidrometría de aguas superficiales.

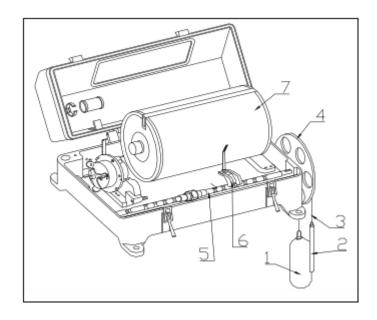
www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendo hidrometria.pdf. Consulta: 25 de octubre de 2014.

1.4.3.2. Limnígrafo

Es un aparato inscriptor provisto de un mecanismo de relojería y de dispositivos que permiten registrar las alturas de agua de forma continua. A continuación se describe en forma sencilla al limnígrafo:

Está conformado por: un flotador (1) y contrapeso (2), los cuales con un cable (3) son conectados al dispositivo de reducción (4), el que acciona el husillo con ranuras helicoidales (5), sobre el cual juega el dispositivo portaplumilla con plumilla (6) y un tambor (7), que está colocado ya sea horizontal o verticalmente, ver figura 3.

Figura 3. Partes de un limnígrafo



Fuente: Guía de hidrometría de aguas superficiales.

www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendo_hidrometria.pdf. Consulta: 25 de octubre de 2014.

Con el fin de que la banda registradora, o limnigrama, no resulte demasiado ancha, se ha instalado un mecanismo de retroceso de la plumilla. Un husillo sin fin que conduce la portaplumilla, está provisto de dos ranuras helicoidales en sentido opuesto que se enlazan sin interrupción en los extremos, de manera que en ellos cambia el sentido de la palanca portaplumilla. De esta forma, los registros de niveles de agua extraordinariamente altos o bajos que hubiesen salido de los límites de la escala de nivel de la banda, aparecen rebatidos hacia dentro, quedando, por lo tanto, descartada la pérdida de los niveles máximos de las crecidas. Según la reducción de alturas usadas, cada rayita en la banda corresponde sea a 1 (1:10 o 1:20) o 2 cm, respectivamente, dependiendo del diámetro de la polea.

El tambor, dependiendo del sistema de relojería, puede completar una revolución en 32 días, en 1 semana o 1 día y según esta disposición deberá efectuarse el cambio de la banda.

El volumen número 49 de la OMM indica que los limnígrafos mecánicos deben reunir las siguientes características funcionales:

- Deberá funcionar satisfactoriamente en las condiciones ambientales predominantes de temperatura y humedad relativa correspondiente a las condiciones locales.
- Todas las partes del limnígrafo estarán fabricadas en material resistente a la corrosión en condiciones de utilización a la intemperie.
- El limnígrafo estará colocado dentro de una caseta resistente a la humedad, al polvo y a la intemperie.
- La tapa tendrá una ventana que permita el control visual del limnígrafo sin necesidad de abrirla.
- El error límite de las mediciones del tiempo no debe pasar de 30 segundos por día (s/d) en promedio, durante un periodo de 30 días por lo menos.
- Habrá un sistema de ajuste del movimiento para permitir la regulación con las condiciones de precisión.
- El papel utilizado deberá mantenerse estable dentro de unos límites relativamente estrechos, en toda la gama de condiciones previstas de temperatura y humedad.
- Si se utiliza una pluma con tinta, esta deberá producir un trazo fácilmente legible sin corrimiento. Si se utiliza un lápiz, tendrá la dureza adecuada para producir un trazo legible.
- El reloj del limnígrafo debe ser intercambiable, con un sistema fácil para ser desmontado y transportado.

Errores de funcionamiento: generalmente, son causados por una variación de la profundidad de flotación del flotador cuando el nivel cambia con rapidez y con él cambia el peso del cable del flotador. También, la falla puede darse por expansión y contracción del papel y cuando se utiliza cable de flotador que no reúne las características de diseño.

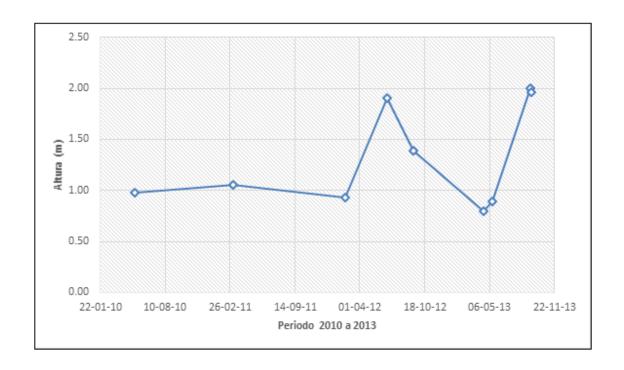
1.4.3.2.1. Limnigrama

El Glosario hidrológico internacional de la OMM/Unesco, define al limnigrama como:

- Registro continuo del nivel de agua por medio de un limnígrafo.
- Representación gráfica o no, de la variación del agua en función del tiempo.

Este gráfico se da en coordenadas cartesianas siendo normalmente las abscisas (eje horizontal), los tiempos (en horas y días) y las ordenadas (eje vertical), las alturas leídas o legibles (normalmente, la mínima división apreciable en un centímetro). Hay limnigramas para una semana o treinta días, todos esos periodos han de reflejarse en la duración de la cuerda de los relojes. Al colocar el limnigrama, el observador escribirá la fecha de puesta y hora (06:00) también, al finalizar escribirá la fecha de retiro y hora (18:00), firma del observador hidrológico y ayudante.

Figura 4. Limnigrama de la cuenca Suchiate, estación Malacatán



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

2. REALIZACIÓN DE AFOROS

2.1. Generalidades

Un aforo es la determinación del caudal en un curso de agua. Una sección de aforo es un punto específico para hacer las mediciones de caudal, deben tenerse en cuenta algunos factores importantes, pero el más importante es tener la certeza de que la forma de la sección no cambie en el tiempo, es decir, que se trata de un tramo de río o arroyo que no sufre socavación y no está en proceso de sedimentación.

Cuando estas características no se encuentran en el tramo en el cual interesa instalar la sección de aforo, deberá implementarse una obra, como por ejemplo un vertedero. Esta obra, según la dimensión del río o arroyo, puede llegar a ser costosa y, en algunos casos, puede resultar más conveniente determinar el caudal por otros métodos.

Los vertederos utilizados en estos casos son también de varios tipos:

- Vertedero de Bazin
- Vertedero libre en pared delgada y vertical
- Rectangular
- Triangular
- Tipo Cipolletti
- Trapezoidal
- Circular
- Vertederos de paredes gruesas

Con frecuencia, una sección adecuada para implementar una sección de aforo es en correspondencia con un puente, puesto que esta sección ya ha sido estabilizada.

En ríos y arroyos de anchos, se hace difícil y costoso implementar vertederos con la sola finalidad de definir la sección de aforo, en estos casos la medición se hace con el uso del correntómetro. Con el auxilio de este instrumento se mide la velocidad del flujo en varias partes de la sección, de forma a establecer curvas de igual velocidad en toda la sección. Con base en el mapeo de las velocidades del flujo, se calcula el caudal líquido.

2.2. Tipos de aforo

Aforar es medir un caudal. En hidrología superficial puede ser necesario medir desde pequeños caudales (unos pocos litros por segundo) hasta grandes ríos con caudales de centenares o miles de metros cúbicos por segundo. Se distinguen dos tipos de aforo:

- Aforos directos: con algún aparato o procedimiento se miden directamente el caudal.
- Aforos indirectos o continuos: se mide el nivel del agua en el cauce y a partir del nivel se estima el caudal.

Para medir el caudal diariamente o de un modo continuo en diversos puntos de una cuenca se utilizan aforos indirectos, por eso también se les denomina continuos.

2.2.1. Aforos directos

A continuación se describen los procedimientos básicos que existen para realizar aforos directos.

2.2.1.1. Estimación aproximada con flotadores

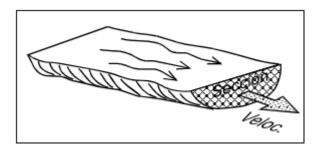
El procedimiento se basa en medir la velocidad del agua y aplicar la ecuación:

Caudal = sección x velocidad

Para una estimación, la velocidad se calcula arrojando algún objeto que flote al agua, y la sección se estima muy aproximadamente (anchura media x profundidad media). Este procedimiento da grandes errores, pero proporciona un orden de magnitud.

A veces se aconseja multiplicar el valor obtenido con flotadores por un coeficiente del orden de 0,7 o 0,8, ya que con los flotadores suele medirse preferentemente la velocidad en la parte central del cauce, no teniendo en cuenta las partes próximas a las orillas, de velocidades más bajas, obteniéndose un error por exceso.

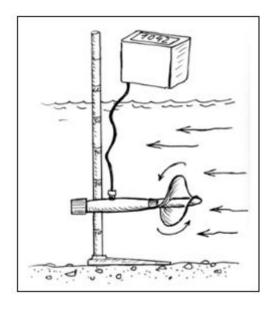
Figura 5. Sección de agua



2.2.1.2. **Molinete**

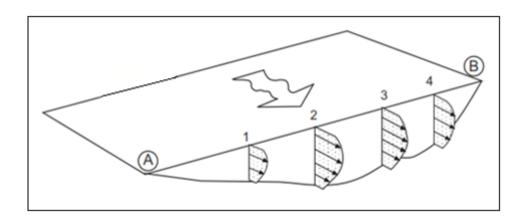
La medida exacta de la velocidad se realiza con un molinete. Se mide la velocidad de la corriente en varios puntos de la misma vertical y en varias verticales de la sección del cauce. A la vez que se miden las velocidades, se mide la profundidad en cada vertical y la anchura exacta del cauce, lo que permite establecer la sección con bastante precisión.

Figura 6. **Molinete**



En el ejemplo de la figura 7 se han realizado medidas en cuatro verticales: en cada vertical se mide la distancia desde la orilla (distancias A-1, A-2 y otras), la profundidad en ese punto y se realizan una o varias medidas de la velocidad a distintas profundidades. En el ejemplo del dibujo se han realizado: dos medidas en la vertical 1, cuatro medidas en las verticales 2 y 3 y tres medidas en la vertical 4.

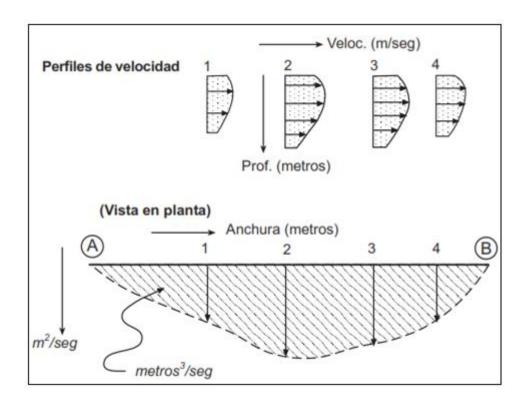
Figura 7. **Sección de cauce**



A partir de las velocidades, se obtiene el caudal por el siguiente procedimiento:

- Se dibujan a escala los perfiles de corriente correspondientes a cada vertical donde se midió con el molinete. Se planimetra cada uno de los perfiles. Como en horizontal están las velocidades en metros por segundo y en vertical la profundidad en metros, la superficie planimetrada en cada perfil estará en metros cuadrados por segundo.
- Se dibuja una vista en planta del cauce, en abscisas la anchura del mismo, señalando los puntos exactos donde se midió, y en ordenadas los vectores en metros cuadrados por segundo, cuyas longitudes corresponden a la planimetría del punto anterior. Se traza la envolvente de todos estos vectores, planimetrando de nuevo. Esta planimetría, convertida a la escala del gráfico, ya es el caudal (en horizontal la anchura en metros, en vertical metros cuadrados por segundo: el producto en metros cúbicos por segundo).

Figura 8. Perfiles de velocidad



2.2.1.3. Aforos químicos

Su fundamento es el siguiente: se arroja una sustancia de concentración conocida a un cauce, se diluye en la corriente y aguas abajo se toman muestras y se analizan. Cuanto mayor sea el caudal, más diluidas estarán las muestras recogidas. La aplicación concreta de este principio se puede ejecutar con dos procedimientos distintos.

2.2.1.3.1. Aforos de vertido constante

A un cauce de caudal Q (que se quiere medir) se añade un pequeño caudal continuo q de una disolución de concentración conocida C1. Se supone que el río ya tenía una concentración Co de esa misma sustancia.

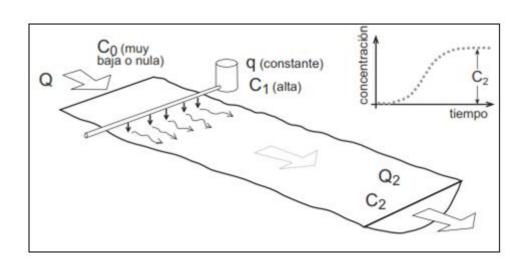


Figura 9. **Vertido constante**

Fuente: *Medida de caudales*. http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf. Consulta: 25 de octubre de 2014.

2.2.1.3.2. Aforos de vertido único o de integración

Si no se dispone del equipo necesario para el vertido continuo o no es posible por otras razones, el vertido único de una sustancia al cauce es otra alternativa, aunque requiere una corriente turbulenta que asegure la mezcla del vertido con todo el caudal circulante hasta el punto de toma de muestra.

Peso vertido

Toma de muestras

Outro de muestras

Toma de muestras

Outro de muestras tiempo

Figura 10. Vertido único

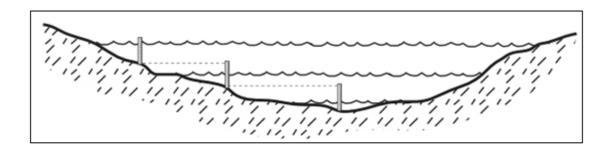
2.2.2. Aforos indirectos

A continuación se describen los procedimientos básicos que existen para realizar aforos indirectos.

2.2.2.1. Escalas limnimétricas

Se trata de escalas graduadas en centímetros y firmemente sujetas en el suelo, a veces adosadas al pilar de un puente. En cauces muy abiertos puede ser necesario instalar varias escalas de manera que el final de una corresponda al comienzo de la siguiente. Es necesario que un operario acuda cada día a tomar nota de la altura del agua.

Figura 11. Escala limnimétrica escalonada

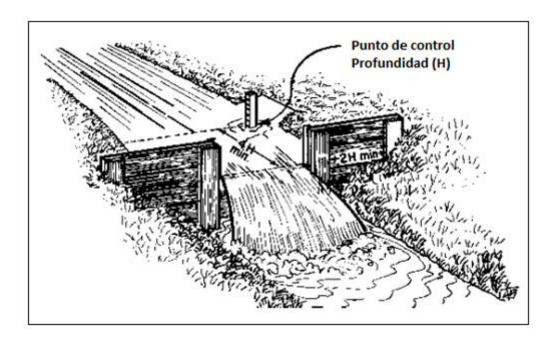


2.2.2.2. Aforadores de vertedero

Un vertedero es cualquier estructura transversal a la corriente que eleva el nivel aguas arriba y permite la circulación a través de una abertura de forma triangular, trapezoidal o rectangular. La forma triangular es más sensible a la medida de caudales pequeños que ocuparán solamente el vértice el triángulo invertido.

En cauces pequeños, a veces se realiza una instalación provisional con una placa de metal, plástico o madera, mientras que en otras ocasiones se trata de construcciones fijas y de mayores dimensiones.

Figura 12. **Vertedero**



3. MÉTODO PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES

3.1. Generalidades

La curva de gastos es un gráfico que muestra el caudal medio (Q) que corresponde a un nivel de profundidad (H) particular en un lugar específico de un curso fluvial.

El proceso de elaboración de la curva de calibración nivel-caudal en un cauce debe incluir el dibujo, la localización y la forma de la curva. Se pueden usar métodos de análisis hidráulicos y de ajustes matemáticos para ayudar en el proceso de elaboración de la curva; sin embargo, para el análisis final, la relación nivel-caudal debe ajustarse a los datos de los aforos directos. Por otra parte, el analista debe verificar que la curva de calibración obtenida sea hidráulicamente correcta y ser consciente que cada aforo no necesariamente debe ajustar en la misma curva de calibración, debido al cambio en las condiciones de control que algunas veces puede ocurrir. Es decir, el analista deberá definir, después de una evaluación rigurosa de las condiciones geométricas e hidráulicas de la sección y el tramo, si los datos de un aforo deben ser incluidos o no para determinar la relación nivel-caudal.

Los métodos utilizados para elaborar las curvas de calibración simples son los siguientes:

- Método gráfico
- Método de las ecuaciones hidráulicas (Manning y Chezy)
- Métodos analíticos (logarítmico, parabólico y las tres curvas)

La curva de calibración o relación nivel-caudal, en principio, debe aplicarse solamente dentro del rango de niveles aforados. Las mediciones normalmente se realizan para caudales mínimos y medios. Si se requiere estimar el caudal para niveles de agua superiores o inferiores a los aforados, será necesario efectuar una extrapolación de la curva de calibración. Para ello, es necesario conocer muy bien las características geométricas e hidráulicas de la sección transversal y tener un suficiente número de aforos, con el fin de ajustar dicha curva a una condición de extrapolación aceptable.

Como pueden existir curvas de gastos muy antiguas para determinadas estaciones, es muy importante asegurar el uso de la curva de gastos correcta. Si una crecida modifica el cauce del río, la curva de gastos puede cambiar. La erosión y deposición de sedimento altera y cambia la forma del área de la sección transversal del cauce fluvial. El uso de una curva de gastos desactualizada produce estimaciones de caudal incorrectas, además, al examinar los datos históricos, es importante que la curva de gastos elegida fuera válida cuando se produjo el suceso histórico. El uso de una curva de gastos inadecuada produce estimaciones de caudal incorrectas.

La relación nivel-caudal puede verse afectada debido a diferentes condiciones que suelen presentarse u ocurrir en los ríos. Un embalse existente aguas abajo de una estación hidrométrica puede originar remansos hacia aguas arriba, sumergiendo total o parcialmente el control de flujo de la estación y, por consiguiente, invalidando la relación nivel-caudal. Igualmente, un tributario descargando aguas abajo o dentro del tramo de control de flujo en la estación puede generar remansos variables en el cauce principal, los cuales pueden sumergir el control y afectar la relación nivel-caudal. También, la operación de una represa para fines de generación de energía impone en el río condiciones de régimen dinámico o no permanente, originando un efecto conocido como histéresis o curva en bucle. En estos casos, el caudal real para un determinado nivel de agua será mayor que el caudal normal tomado de la curva de calibración simple cuando el nivel de agua asciende y el caudal real será inferior al caudal normal cuando el nivel de agua desciende.

En todos estos casos, en los cuales la superficie libre del agua y su gradiente son variables y no existe, por lo tanto, una relación simple entre los niveles y los caudales, se deben elaborar curvas de calibración complejas.

3.2. Funcionamiento del método

El objetivo de aforar una corriente durante varias épocas en el año en una sección determinada, es determinar lo que se conoce como curva de calibración de la sección de control. Esta permite transformar niveles de agua, leídos con una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un período largo, de tal manera que se tengan niveles bajos y altos del río. La curva tiene la forma mostrada en la figura 13.

Por medio de esta curva se obtienen los hidrogramas o gráficas variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada, que tienen la forma mostrada en la figura 14.

Las curvas de calibración pueden cambiar por efectos erosivos, agradación, efectos de curvas de remanso o debido a flujo no permanente. Por lo tanto, se deben calcular permanentemente estas curvas, para detectar posibles errores.

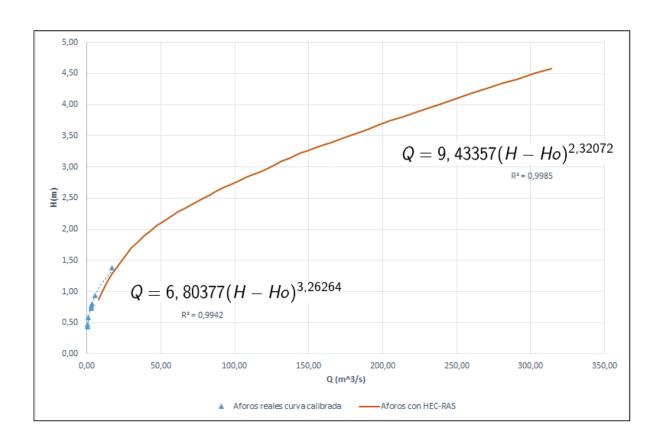
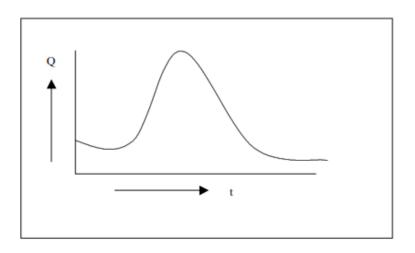


Figura 13. Ejemplo curva de calibración cuenca Coatán

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 14. Hidrograma



Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Factores que pueden inducir errores en la curva de calibración

Existen diversos factores que alteran las curvas de calibración, a continuación se describen; curva de remanso y flujo no permanente.

3.2.1.1. Curva de remanso

Se presentan debido a la existencia de una sección de control, por ejemplo una presa o un vertedero. Si hay curvas de remanso, la misma altura de mira (H) puede corresponder a dos caudales diferentes.

Hay estaciones con muchos años de registro, que son influidas por la cola de embalses, formando remansos que afectan los registros de la estación de aforo.

Para no perder la serie, este problema se puede resolver instalando otra estación auxiliar aguas abajo y se sigue el siguiente procedimiento. Se toman lecturas de los niveles en las dos miras y F es la diferencia entre niveles, ver figura 15.

Aplicando la fórmula de Bernoulli entre las dos miras se tiene:

$$\frac{V_1}{2g} + y_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + Z_2 + h_f$$

Donde

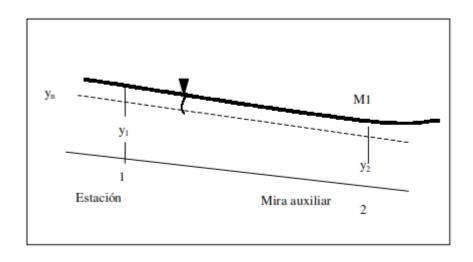
V: velocidad

y: profundidad del flujo

z: cabeza de posición

hf: pérdidas de energía

Figura 15. Curva de remanso



Fuente: elaboración propia

Si se tiene

$$\mathbf{Z} = \mathbf{z} + \mathbf{y}$$

Despreciando cabezas de velocidad se obtiene:

$$\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 - \mathbf{h}_f = \mathbf{F}_n$$

El Geological Survey (USGS) propone la siguiente expresión para hallar el caudal corregido:

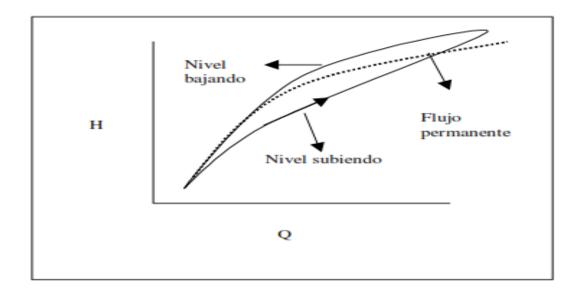
$$\frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{Q}_{n}} = (\frac{\mathbf{F}}{\mathbf{F}_{n}})^{m}$$

Donde Qn es el caudal normal para una altura de la mira H dada y m es un exponente con un valor cercano a 0,5.

3.2.1.2. Flujo no permanente

Cuando el flujo es no permanente (cuando se produce una creciente), los niveles del agua son diferentes en la etapa de aumento del caudal y cuando este empieza a descender. Cuando empiezan a subir los niveles, el flujo está acelerado y las velocidades son mayores; al contrario, cuando los niveles del agua descienden, hay una desaceleración del flujo, reduciéndose por consiguiente la velocidad. Por lo tanto, la relación niveles caudales es una curva como la mostrada por la figura 16.

Figura 16. Curva de calibración para flujo no permanente



Fuente: elaboración propia.

Si Qn es el caudal normal para un nivel dado con flujo permanente y QM es el caudal con flujo no permanente existe la siguiente relación entre ellos:

$$\frac{Q_{\rm M}}{Q_{\rm n}} = \sqrt{1 + \frac{1}{V_{\rm w}S_{\rm o}}} \frac{dh}{dt}$$

Donde

So: pendiente del canal

 $^{dh}\!/_{\!dt}$: tasa de cambio del nivel del agua con el tiempo

 V_w : velocidad de la onda de creciente, igual a $V_w = 1.4V$.

V= velocidad hallada con la ecuación de Manning

3.3. Métodos para determinar curvas de calibración

A continuación se describen los métodos más utilizados para determinar curvas de calibración, para el presente trabajo se aplicó el método matemático.

3.3.1. Método gráfico

El gráfico de la relación nivel-caudal o curva de calibración se puede realizar con la ayuda de instrumentos de dibujo como curvígrafos, papel milimetrado (aritmético) o logarítmico. El analista encargado de trazar la curva de calibración primero grafica los datos (H-Q) de los aforos y luego determina cuáles de estos deben incluirse en la curva de calibración, para finalmente ajustar, según su criterio, la relación (gráficamente), generando una curva suavizada que produzca la menor desviación posible de los datos de campo.

El analista debe siempre considerar toda la información disponible acerca del control y el nivel efectivo de caudal cero (Ho), con el fin de dar una consideración propia a las curvas de transición y otros cambios en la forma y pendiente de la curva calibrada.

El ajuste gráfico se facilita considerablemente si la gráfica se realiza en papel logarítmico y con la escogencia adecuada del nivel Ho. Al hacerlo así, usualmente es posible definir segmentos de la curva de calibración por medio de líneas rectas, en lugar de líneas curvas.

3.3.2. Método por ecuaciones hidráulicas

Algunas veces puede definirse la forma de la relación nivel-caudal a través del uso de ecuaciones hidráulicas, como las de Manning y Chezy. En estas los coeficientes de rugosidad de Manning o de Chezy son estimados de los datos de campo, mientras que la pendiente de fricción se estima de los canales, mapas o medidas de calibración. Las ecuaciones de Manning o de Chezy pueden usarse con el fin de estimar el caudal a partir de unos pocos niveles, para definir la forma de la curva de calibración.

Este es un procedimiento simplificado que asume flujo uniforme y permanente, sin embargo, mediante diferentes técnicas de cálculo de curvas de remanso se pueden analizar situaciones más complejas, incluyendo flujo no uniforme. Para cualquiera de los casos (control de sección o control de canal), la curva calculada mediante las ecuaciones hidráulicas se usa solamente para definir la forma de la curva.

Los métodos de las ecuaciones hidráulicas son recomendados principalmente para extrapolar los extremos más altos de la curva de calibración cuando existe el control de canal y cuando la forma del lecho no cambia con el incremento del caudal. Se puede estimar la rugosidad del canal para el rango de extrapolación; mientras que la pendiente de fricción puede estimarse para los caudales más bajos y ser extrapolada al rango más alto.

En algunos casos, las marcas de niveles altos de caudal pueden ayudar en la estimación de la pendiente de fricción. La sección transversal del área (A) y el radio hidráulico (R) pueden ser calculados de la sección transversal mediante el estudio de una sección típica en el tramo de control. Debe tenerse cuidado si la forma de la sección transversal cambia apreciablemente, debido a que la pendiente de fricción también puede cambiar significativamente. Cuando ocurre desbordamiento, la pendiente de fricción para el flujo por encima del nivel de banca llena puede diferir significativamente de la pendiente para el flujo dentro del cauce principal.

La posición correcta de la curva es definida por los datos de aforo. Este procedimiento también puede utilizarse para ayudar a determinar cuándo las mediciones definen una nueva posición de la curva, tal como cuando ocurre un cambio de control.

3.3.3. Métodos matemáticos

Para las estaciones donde el control es estable (con pequeños cambios o sin ellos), la relación H-Q puede definirse por procedimientos matemáticos, como el análisis de regresión. Sin embargo, se debe tener cuidado si los datos de niveles y caudales usados para la regresión no corresponden a la misma curva, entonces los resultados de la regresión pueden definir una curva que no es hidráulicamente correcta. Dicha curva puede conducir a resultados erróneos cuando se aplica para propósitos de calcular los caudales diarios.

3.3.4. Curva potencial

El resultado de la investigación de muchas curvas de descarga ha llegado a la conclusión que estas pueden quedar representas por la ecuación de una parábola de orden superior, tangente al eje de las ordenadas. En este caso, el caudal queda dado por la ecuación:

$$Q = K (h-h_0)^n$$

Donde

Q: caudal en metros cúbicos por segundo

h: nivel de agua leído en la escala

ho: Diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero

de la escala en metros

K, n: constantes a determinar

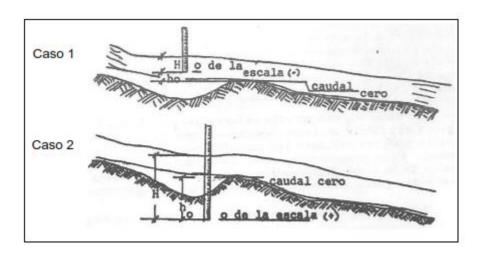
Aplicando logaritmos a la ecuación anterior:

$$Log Q = Log K + n Log (h-h_0)$$

Esta segunda ecuación se asemeja a una ecuación de tipo lineal con pendiente n e intercepto log K en un sistema de coordenadas, donde los ejes de coordenadas son Log (h-ho) y Log Q.

Como ya se ha mencionado, el valor de ho es la diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero de la escala, pudiendo ser positivo o negativo según sea el caso (ver figura 17). Cuando el lecho del río está por debajo del cero de la escala, será negativo y cuando lecho del río está por encima del cero será positivo.

Figura 17. Determinación de ho (diferencia nivel de agua y cero de la escala)



Fuente: elaboración propia.

La determinación de ho se puede efectuar en campo cuando se miden los caudales bajos.

De lo anteriormente expresado se deduce la importancia de que aguas abajo de la sección exista un buen control estabilizado para que no cambie ho, y así permanezca inalterable la expresión analítica de la curva de descarga. Sin embargo, no en todas las corrientes es posible.

El nivel de agua efectivo de caudal cero (ho) debe ser determinado para cada segmento de la curva de calibración. Para controles de forma regular, este valor es casi igual al nivel real para caudal cero. Para la mayoría de controles, sin embargo, se puede hacer una determinación más exacta mediante el método gráfico de prueba y error. Se asume un valor de ho y se grafican los datos basados en este valor asumido; el valor final de ho es aquel que al graficar los datos de Log(Q) contra Log(H-Ho), permite obtener el mejor ajuste a una línea recta.

Generalmente, solo se necesitan unos pocos valores para hallar un valor que determine una línea recta para el segmento de la curva de calibración.

El método matemático consiste en la regresión lineal o no lineal. Por medio de una regresión lineal, de las variables transformadas mediante logaritmos y, aplicando mínimos cuadrados, se determinan las constantes k y n de la ecuación. Mientras que en la regresión no lineal se usan los datos sin transformación.

Mediante la regresión no lineal (método matemático) y utilizando programas de cálculo como Excel, Statistic, entre otros, se pueden determinar directamente las constantes k y n de la curva de descarga.

3.4. Extrapolación de la curva de calibración

En estudios hidrológicos se necesita información de caudales máximos extremos. Por razones en las que las condiciones son críticas, la medición directa de estos niveles y caudales extremos rara vez se puede realizar, por lo que se hace necesario extrapolar la curva de calibración para hallar una estimación de los caudales que correspondan a estos niveles.

Una relación nivel - caudal no debe ser aplicada por fuera del rango de los caudales medidos en los que está basada. Si se desean estimar caudales por fuera de este rango medido, será necesario hacer una extrapolación de la curva de calibración para caudales menores o mayores. Esto se debe hacer cuidadosamente a través del uso de métodos que ayuden a definir la forma y la posición de la parte extrapolada de la curva. Antes de hacer cualquier extrapolación de la curva, debe examinarse el canal y el control en una determinada distancia aguas abajo y aguas arriba de la estación.

Las obstrucciones en el flujo, las restricciones, las expansiones, las contracciones, los cambios en la forma del canal y otras condiciones se deben tener en cuenta. Si existen condiciones anormales del canal que no puedan ser consideradas en el análisis de la curva, entonces no se debe hacer la extrapolación.

Se recomienda, siempre y cuando sea posible, hacer extrapolaciones usando dos o más de los métodos aquí descritos. Así, los resultados pueden compararse y se puede definir con más confianza la curva extrapolada.

El procedimiento tradicional para la estimación de los caudales asociados a los niveles máximos no aforados consiste en extrapolar la relación nivelcaudal obtenida a partir de aforos realizados con niveles bajos y medios, lo cual puede generar grandes errores en la estimación. Dichos errores pueden deberse a la inestabilidad de la sección de control, así como a la relación no unívoca que puede presentarse entre los niveles y los caudales en un río cuando se tiene régimen no permanente. Los caudales máximos pueden estimarse algunas veces con la ayuda de los caudales más altos de la relación nivel-caudal.

Un método hidráulico para la extrapolación de la curva nivel-caudal sugiere tener conocimiento completo de la configuración de la sección de aforo en el rango no aforado. En una sección uniforme con forma de V, la geometría de la misma está bien representada por una parábola; pero si es irregular en una o ambas márgenes, la condición es diferente y se hace difícil la extrapolación, debiéndose tener en cuenta estas limitaciones para hacer una mejor estimación de los caudales máximos.

Los métodos recomendados para la extrapolación de las curvas de calibración nivel-caudal son los siguientes:

- Simulaciones con HEC-RAS (descrito en el capítulo 4)
- Método gráfico
- Método de área-velocidad
- Método de las ecuaciones hidráulicas (Stevens y Manning)
- Método de área-pendiente

3.4.1. Método gráfico

El método más simple para extrapolar la curva de calibración nivel-caudal es el método gráfico en papel logarítmico. Para usar este método correctamente, el analista debe tener un conocimiento adecuado de las condiciones de control y de los métodos logarítmicos, de otra forma el método podrá conducir a grandes errores.

La parte de la curva que requiere extrapolación debe ser graficada con una escala efectiva, escogida de tal forma que la curva graficada asemeje una recta. Adicionalmente, el analista debe tener conocimiento del tipo de control (sección o canal) y la forma del control a través del rango de extrapolación; si la forma del control no cambia significativamente y la rugosidad del canal permanece casi constante, entonces es razonable hacer una línea recta de extrapolación sobre el papel logarítmico. Una extrapolación logarítmica de este tipo es particularmente conveniente para condiciones de control de canales para caudales medios y altos, pero no debe ser usada para extrapolar más de 1,5 veces el mayor caudal medido. Es muy importante tener en cuenta que se requiere especial cuidado cuando se extrapolan los caudales más bajos.

Cuando existe control de sección, es muy importante conocer la forma del control y el nivel efectivo de caudal cero (ho). Algunas veces es mejor graficar la curva de calibración en papel logarítmico de tal forma que pueda localizarse el nivel efectivo (Ho), especialmente si la curva es extrapolada para Q = 0.

3.4.2. Método área-velocidad media

El caudal queda en general por lo expresión:

$$Q = A * Vm$$

Donde A es la superficie encerrada por el perfil de la sección limnimétrica para una altura de agua determinada y Vm la velocidad media correspondiente a esa misma altura.

Con el perfil de la sección limnimétrica es fácil determinar una curva de variación del área con respecto a la altura de agua, obteniendo una curva cóncava. Al mismo tiempo, de todos los aforos de la sección puede determinarse la velocidad media (Vm) del agua.

La velocidad media queda en general por la expresión:

$$Vm = \frac{Q}{A}$$
 (metros sobre segundo

Luego se construye una curva entre altura de agua y velocidad media (Vm), obteniéndose en general una curva que tiende a un valor asintótico para velocidades altas. Luego, en este método el problema se reduce a extrapolar la curva de velocidad media.

3.4.3. Método de Stevens

Este método se utiliza para ríos relativamente anchos y poco profundos. Es una modificación de la fórmula de Chezy para canales abiertos en que el caudal queda dado por la expresión:

$$Q = A \cdot C \sqrt{SR}$$
 (Chezy).

Donde

A: área en metros cuadrados

S: pendiente del eje hidráulico

R: radio hidráulico, que para cauces anchos y poco profundos se reemplaza por

la profundidad media $D = \frac{A}{a}$ en metros

a: ancho del río en la superficie del agua, en metros

C: constante adimensional

Luego, queda:

$$Q = C\sqrt{S} A\sqrt{D}$$

Al igual que en la fórmula de Manning, el factor hidráulico $C\sqrt{S}$ para valores altos del limnímetro tiende a hacerse constante y por consiguiente si se hace un gráfico los valores de Q contra los valores de $A\sqrt{D}$ se obtendrá una línea recta.

3.4.4. Método de Manning

Aunque la fórmula de Manning está deducida para canales y en condiciones de flujo uniforme, la experiencia de los últimos años indica que es un valioso instrumento para analizar las características hidráulicas y geométricas de los aforos realizados.

Además, cuando se tiene una creciente, la pendiente del eje hidráulico toma un valor promedio pasando por alto las pequeñas variaciones en la pendiente del lecho. Es por esto que las fórmulas para canales abiertos pueden aplicarse a caudales naturales con mayor seguridad a los estados altos que a los bajos, pues estos últimos quedan notoriamente influenciados por las condiciones del lecho.

El caudal Q queda dado por la expresión:

$$Q = AR^{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{S}}{n}$$

Donde

A: área en metros cuadrados

R: radio hidráulico en metros

P: perímetro mojado en metros

S: pendiente del eje hidráulico, se determina con las mediciones en terreno inmediatamente después de una crecida.

El término $AR^{2/3}$ depende solo de las características geométricas de la sección y mediante el correspondiente perfil de la sección puede conocerse para cualquier nivel del agua.

Este término se llamará, de aquí en adelante, factor geométrico, y se puede calcular para cada aforo con las medidas directas que se han tomado.

A continuación, se construye una curva $h = f(AR^{2/3})$ y se puede realizar la extrapolación con la fórmula de Manning.

Al término $\frac{\sqrt{s}}{n}$ se le puede denominar factor hidráulico, pues considera la rugosidad del lecho y la pendiente del eje hidráulico. Este término, algunas veces, tiende a un valor asintótico para niveles altos del río.

La curva $h = f(\frac{\sqrt{s}}{n})$, en las que las alturas de agua están en ordenadas y $\frac{\sqrt{s}}{n}$ en abscisas, es por lo tanto de extrapolación relativamente sencilla.

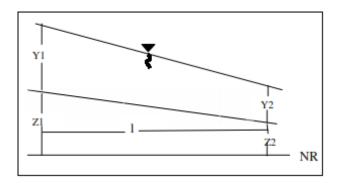
Con la extrapolación de estas curvas se pueden determinar también los caudales para aquellas alturas de agua en que no se han obtenido aforos. Al haber un cambio, ya sea en el factor geométrico o hidráulico, este queda claramente reflejado en las gráficas antes mencionadas mediante un desfase de las curvas respectivas.

3.4.5. Método de área-pendiente

A veces se presentan crecientes en sitios donde no existe ningún tipo de instrumentación y cuya estimación se requiere para el diseño de estructuras hidráulicas como puentes o canales. Las crecientes dejan huellas que permiten hacer una estimación aproximada del caudal, determinando las propiedades geométricas de 2 secciones diferentes, separadas una distancia L y el coeficiente de rugosidad en el tramo.

Si se supone que se tiene un tramo de río con profundidades Y1 y Y2 en las secciones 1 y 2 respectivamente, con NR el nivel de referencia, se tendría el diagrama que se presenta en la figura 18.

Figura 18. **Diagrama método de área-pendiente**



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Donde h= Y+Z y hf son las pérdidas de energía que se pueden hallar usando la fórmula de Manning:

$$VA = Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde

V: velocidad en metros por segundos

RH: radio hidráulico en metros

Sf: pendiente de la línea de energía

A: área de la sección transversal en metros cuadrados

n: coeficiente de rugosidad de Manning

3.5. Aplicación del método

Para el presente trabajo se construyeron las curvas de calibración con sus respectivas ecuaciones por medio del método matemático, haciendo una regresión potencial y extrapolando las curvas por medio de simulaciones hidráulicas con HEC-RAS, en las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico, para el periodo de 2010 a 2013.

Con las curvas de calibración se pueden determinar caudales para cualquier nivel de altura de agua, ya obtenidos, los caudales constituyen datos básicos e indispensables para cualquier tipo de estudio relacionado con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros). También para estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera adelantar con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

En estudios hidrológicos donde se requiere conocer las tendencias de crecidas (máximas alturas de agua), para diseños de obras hidráulicas, entre otros, es necesario conocer los caudales máximos extremos. La medición directa de estos caudales máximos extremos rara vez se puede realizar por ser en condiciones críticas, por lo que se hace una extrapolación de las curvas de calibración para hallar los caudales que correspondan a estos niveles. Finalmente se obtienen las curvas de calibración con una ecuación donde se determina el caudal en función de una altura determinada.

4. SIMULACIONES HIDRÁULICAS HEC-RAS

4.1. Generalidades

HEC-RAS es un programa de cómputo que modela los flujos hidráulicos de agua a través de ríos naturales y otros canales. El programa es unidimensional, lo que significa que no hay modelado directo del efecto hidráulico de los cambios de sección transversal, curvas, y otros aspectos bidimensionales y tridimensionales de flujo. El programa fue desarrollado por el Departamento de Defensa del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos con el fin de gestionar los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción, encontrando una amplia aceptación desde su lanzamiento público en 1995.

El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) en Davis, California desarrolló el sistema de análisis de río (RAS) para ayudar a los ingenieros hidráulicos en el análisis de flujo de canales y la determinación de planicie de inundación. Incluye numerosas capacidades de datos de entrada, componentes hidráulicos, análisis de las capacidades de almacenamiento y gestión de datos, de gráficos y generación de informes.

4.2. Información de diseño

HEC-RAS es un programa informático para el modelado de agua que fluye a través de sistemas de canales abiertos y el cálculo de los perfiles de la superficie del agua.

HEC-RAS encuentra particular aplicación comercial en el manejo de llanuras de inundación y estudios de inundaciones para evaluar usurpaciones de cauce. Desde su aparición, el modelo HEC-RAS ha evolucionado y ha aumentado sus capacidades. El resultado es que en la actualidad se dispone de un modelo matemático que permite hacer el estudio del funcionamiento hidráulico de canales, con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, alcantarillas, uniones y bifurcaciones, lagunas, entre otros. A su vez, posee cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, lo que permite comparar distintos escenarios de funcionamiento.

El modelo HEC-RAS incluye un módulo que permite hacer el análisis del flujo unidimensional en régimen no permanente, que aunque representa una simplificación importante del fenómeno de propagación de una avenida, en muchos casos es una aproximación suficientemente adecuada para predecir niveles de agua. Además, permite incluir almacenamientos que forman parte de un sistema hidráulico, con ello se puede calcular la variación del nivel de la superficie libre en un almacenamiento.

Algunos de los usos adicionales son: diseño y análisis de puentes y alcantarillas, estudios de diques y estudios para modificación de canales. Se puede utilizar también para el análisis de uso de presa, aunque otros métodos de modelado son actualmente más ampliamente aceptados para este propósito.

4.3. Aplicación del método

Las simulaciones hidráulicas presentan una manera de análisis de la interrelación entre la topografía del cauce de un río, los volúmenes de agua y sedimentos transportados, así como la manera en que influyen en el nivel de agua las obstrucciones u obras hidráulicas que se presenten en su cauce.

En el presente trabajo de graduación se realizaron simulaciones hidráulicas para flujo no permanente, tomándose en cuenta únicamente la interrelación entre la topografía del cauce del río y los volúmenes de agua.

En las simulaciones hidráulicas se extrapolaron caudales para distintos niveles de agua hasta el borde del cauce. Con estos datos simulados se elaboraron las curvas de nivel para cada cuenca de estudio, definiendo una ecuación para determinar caudales (Q) en función de una altura (H), donde esta altura de agua debe estar limitada hasta el nivel de desborde del cauce.

4.4. Procedimiento de una simulación para flujo no permanente

Para demostrar el siguiente procedimiento, se tomó con base la información de la estación de control Cunlaj de la cuenca hidrológica Coatán.

Como primer paso, se deben introducir los datos geométricos de las secciones de control, en este caso se utiliza la opción geometric data o datos geométricos.

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

Editory Reach Area Coatan

File Edit Options View Tables Tools GiSTools Help

File Edit Options Tools GiSTools Help

File Edit Options Tools GiSTools Help

File Edit Options Tools GiSTools GiSTools Help

File Edit Options Tools GiSTools GiS

Figura 19. **Datos geométricos**

Luego, ir a la opción *cross section* (sección transversal) y se ingresan los datos topográficos de cada sección transversal, como distancia entre estaciones y valores de Manning.

□ × Cross Section Data - coatan Edit Options Plot Help 🖺 🎒 🗆 Keep Prev XS Plots 🔀 Clear Prev Apply Data | 🙀 🖵 🛨 📸 | Plot Options Coatan Reach: 1.01 ▼ River Sta.: 1 **.** Plan: Coatan (no permanente) seccion 1 seccion 1 Description 027 Del Row Ins Row 2112 Legend LOB Channel ROB 0 0 0 2111 EG Max WS Elevation 1 -15 2110.469 Crit Max WS 2110 -11.1 2109.339 ROB LOB Channel WS Max WS 3 -11 2107.845 0.027 0.027 Elevation (m) 2109 Ground 2107.076 4 -4 5 0 2106.581 Bank Sta Right Bank 2108 6 0.6 2106.422 2106.258 2107 8 4 2105.869 nt (Steady Flow) 🛂 9 6 2105.762 Expansion Contraction 2106 10 8 2106.32 0.1 0.3 11 9.4 2106.44 2105] . -15 Station (m) Enter to move to next downstream river station location

Figura 20. Sección transversal

Ya ingresados los datos geométricos, ir a la opción *enter unsteady flow* data (ingresar datos para flujo no permanente), ingresar los datos necesarios para flujo no permanente.

左 Unsteady Flow Data - Coatan (flujo no permanente) File Options Help Apply Data Boundary Conditions | Initial Conditions | **Boundary Condition Types** Flow Hydrograph Stage Hydrograph Stage/Flow Hydr. Rating Curve Normal Depth Lateral Inflow Hydr. Uniform Lateral Inflow Groundwater Interflow T.S. Gate Openings Elev Controlled Gates IB Stage/Flow Navigation Dams Rules Add Boundary Condition Location Add RS ... Add Storage Area. Add SA Connection Add Pump Station. Select Location in table then select Boundary Condition Type **Boundary Condition** River Reach RS Coatan 1.01 3 Stage Hydrograph 2 2 Coatan 1.01 3 Coatan 1.01 Normal Depth

Figura 21. Datos para flujo no permanente

En este caso, se deben ingresar datos para *boundary conditions* (condiciones de frontera) para aguas arriba y aguas abajo. En aguas arriba se ingresaron datos para un hidrograma.

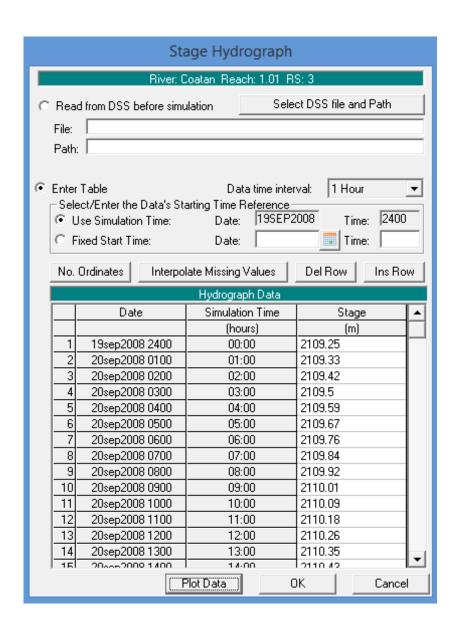
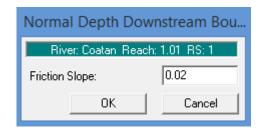


Figura 22. Datos de hidrograma

Luego, en aguas abajo para condiciones de frontera, se ingresan datos de *normal depth* o pendiente.

Figura 23. Datos de pendiente



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Después de ingresar los datos para condiciones de frontera, se ingresan datos para condiciones iniciales. En este caso, se ingresa el flujo inicial en aguas arriba.

Apply Data Boundary Conditions Initial Conditions Initial Flow Distribution Method œ 🏻 Use a Restart File Filename: Enter Initial flow distribution Add RS... River Reach Initial Flow 1 Coatan Initial Elevation of Storage Areas Storage Area Initial Elevation 1

Figura 24. Condiciones iniciales

Ya ingresados los datos de flujo no permanente, se procede a crear o correr una simulación para flujo no permanente (*perform an unsteady flow simulation*), donde se debe asegurar de procesar los datos que se ingresaron anteriormente, es decir, datos geométricos y datos para flujo no permanente.

Unsteady Flow Analysis File Options Help Plan : Coatan (no permanente) Short ID 1.01 Geometry File: coatan Unsteady Flow File: Coatan (flujo no permanente) Plan Description: Programs to Run-Geometry Preprocessor Unsteady Flow Simulation ✓ Post Processor Simulation Time Window 19SEP2008 2400 Starting Date: Starting Time: 24SEP2008 0300 Ending Time: Ending Date: Computation Settings: Computation Interval: 1 Hour ▼ Hydrograph Output Interval: 1 Hour Detailed Output Interval: 1 Hour Computation Level Output DSS Output Filename: C:\Users\Walfred\Documents\Walcol\TESIS\HEC-R/ Mixed Flow Regime (see menu: "Options/Mixed Flow Options ...") Compute

Figura 25. Simulación para flujo no permanente

Ya hecha la simulación, se obtienen varios resultados como: secciones transversales, perfiles, curvas de calibración, vista del tramo de secciones en 3D, tablas de resumen, entre otros. A continuación se muestran algunos resultados de la sección de la cuenca Coatán.

Cross Section Options Help File Coatan Reload Data River: Reach: 1.01 River Sta.: 2 Plan: Coatan (no permanente) 11/11/2015 Coatan seccion 0 2114 Legend 2113 EG 20SEP2008 2100 2112 WS 20SEP2008 2100 Elevation (m) 2111 Ground 2110 Bank Sta 2109 2108 2107 2106 20 -10 -5 10 15 -15 Station (m)

Figura 26. Sección transversal, cuenca Coatán

Profile Plot Help File Options ₽ 1 Profiles .. Plot Initial Conditions Reaches .. Reload Data Coatan Plan: Coatan (no permanente) 11/11/2015 Coatan 1.01 2112 Legend EG 20SEP2008 2100 2111 Crit 20SEP2008 2100 WS 20SEP2008 2100 2110 Ground Elevation (m) 2109 2108 2107 2106 100 200 300 400 500 264.10, 2111.51 Main Channel Distance (m)

Figura 27. Perfil, cuenca Coatán

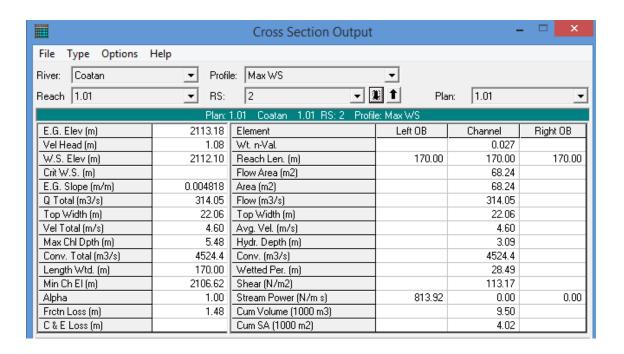
Rating Curve File Options Help 178.68, 2107.62 Coatan Reload Data River: Reach: 1.01 River Sta.: 1 Coatan Plan: Coatan (no permanente) 11/11/2015 seccion 1 2109.0 Legend 2108.5 W.S. Elev 2108.0 W.S. Elev (m) 2107.5 2107.0 2106.5 2106.0 2105.5 50 100 200 250 350 150 300 Q Total (m3/s)

Figura 28. Curvas de calibración, cuenca Coatán

X-Y-Z Perspective Plot File Options 3 Reload Data Upstream RS: 125 Rotation Angle Downstream RS: Azimuth Angle Coatan Plan: Coatan (no permanente) 11/11/2015 Legend WS 21SEP2008 2200 Ground Bank Sta

Figura 29. Tramo de secciones en 3D, cuenca Coatán

Figura 30. Tabla de resumen, cuenca Coatán



5. INFORMACIÓN OBTENIDA EN CAMPO DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

A continuación se muestran tablas con resultados que se obtuvieron en campo del periodo de 2010 a 2013.

Tabla I. **Identificación de cuencas**

| Nombre de Cuenca | Código de Cuenca |
|------------------|------------------|
| Coatán | 1,01 |
| Suchiate | 1,02 |
| Naranjo | 1,03 |
| Ocosito | 1,04 |
| Samalá | 1,05 |
| Sis-Icán | 1,06 |
| Nahualate | 1,07 |
| Madre Vieja | 1,09 |

Tabla II. Dimensionales de las mediciones

| Medición | Dimensional |
|--------------------|-------------------------------------|
| Escala de inicio | Metros (m) |
| Escala final | Metros (m) |
| Escala promedio | Metros (m) |
| Área | Metros cuadrados (m^2) |
| Perímetro mojado | Metros (m) |
| Ancho | Metros (m) |
| Profundidad media | Metros (m) |
| Radio hidráulico | Metros (m) |
| Profundidad máxima | Metros (m) |
| Но | Metros (m) |
| Velocidad media | Metros / segundos (m/s) |
| Caudal | Metros cúbicos / segundos (m^3/s) |
| Factor hidráulico | Adimensional |

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Información, cuenca Coatán

| | | | Escala | Escala | Escala | | Perim | | Prof |
|----------|--------|------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Promedio | Área | mojado | Ancho | media |
| CUNLAJ | 1,01 | 08/05/2010 | -0,100 | -0,100 | -0,100 | 3,537 | 11,188 | 10,960 | 0,323 |
| CUNLAJ | 1,01 | 17/09/2010 | 0,250 | 0,250 | 0,250 | 8,535 | 13,797 | 13,500 | 0,632 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/02/2012 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 3,172 | 11,419 | 11,310 | 0,280 |
| CUNLAJ | 1,01 | 24/06/2012 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 4,060 | 14,447 | 14,380 | 0,282 |
| CUNLAJ | 1,01 | 14/09/2012 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 4,815 | 15,463 | 15,380 | 0,313 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/04/2013 | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 4,007 | 9,398 | 9,100 | 0,440 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/08/2013 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 6,208 | 13,840 | 13,620 | 0,456 |
| CUNLAJ | 1,01 | 11/09/2013 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 11,298 | 10,872 | 9,600 | 1,177 |

Continuación de la tabla III.

| | | | Radio | Prof. | | Velocidad | | Factor |
|----------|--------|------------|------------|--------|--------|-----------|--------|------------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulico | Máxima | Но | Media | Caudal | Hidráulico |
| CUNLAJ | 1,01 | 08/05/2010 | 0,316 | 0,660 | -0,150 | 0,175 | 0,619 | 0,377 |
| CUNLAJ | 1,01 | 17/09/2010 | 0,619 | 0,940 | -0,300 | 0,664 | 5,667 | 0,915 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/02/2012 | 0,278 | 0,510 | -0,300 | 0,318 | 1,008 | 0,747 |
| CUNLAJ | 1,01 | 24/06/2012 | 0,281 | 0,550 | -0,450 | 0,682 | 2,770 | 1,590 |
| CUNLAJ | 1,01 | 14/09/2012 | 0,311 | 0,580 | -0,450 | 0,593 | 2,855 | 1,291 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/04/2013 | 0,426 | 0,680 | 0,000 | 0,111 | 0,445 | 0,196 |
| CUNLAJ | 1,01 | 18/08/2013 | 0,449 | 0,700 | -0,350 | 0,588 | 3,648 | 1,003 |
| CUNLAJ | 1,01 | 11/09/2013 | 1,039 | 1,600 | -0,200 | 1,517 | 17,141 | 1,479 |

Tabla IV. Información, cuenca Suchiate

| | | | Escala | Escala | Escala | | Perim | | Prof |
|-----------|--------|------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Promedio | Área | mojado | Ancho | media |
| MALACATÁN | 1,02 | 08/05/2010 | 0,450 | 0,450 | 0,450 | 20,211 | 27,406 | 27,250 | 0,742 |
| MALACATÁN | 1,02 | 06/03/2011 | 0,310 | 0,310 | 0,310 | 27,318 | 32,072 | 31,900 | 0,856 |
| MALACATÁN | 1,02 | 17/02/2012 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 15,140 | 22,217 | 22,000 | 0,688 |
| MALACATÁN | 1,02 | 24/06/2012 | 1,87 | 1,87 | 1,87 | 44,684 | 28,587 | 27,850 | 1,604 |
| MALACATÁN | 1,02 | 13/09/2012 | 1,42 | 1,42 | 1,42 | 29,656 | 27,683 | 27,200 | 1,090 |
| MALACATÁN | 1,02 | 17/04/2013 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 15,440 | 24,153 | 24,000 | 0,643 |
| MALACATÁN | 1,02 | 16/05/2013 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 17,404 | 23,683 | 23,400 | 0,744 |
| MALACATÁN | 1,02 | 10/09/2013 | 1,90 | 2,00 | 1,95 | 45,795 | 28,567 | 27,800 | 1,647 |
| MALACATÁN | 1,02 | 11/09/2013 | 2,00 | 1,90 | 1,95 | 51,875 | 28,863 | 27,800 | 1,866 |

Continuación de la tabla IV.

| | | | Radio | Prof. | | Velocidad | | Factor |
|-----------|--------|------------|------------|--------|-------|-----------|---------|------------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulico | Máxima | Но | Media | Caudal | Hidráulico |
| MALACATÁN | 1,02 | 08/05/2010 | 0,737 | 1,130 | -0,24 | 1,055 | 21,328 | 1,293 |
| MALACATÁN | 1,02 | 06/03/2011 | 0,852 | 1,300 | -0,20 | 0,858 | 23,429 | 0,954 |
| MALACATÁN | 1,02 | 17/02/2012 | 0,681 | 1,150 | -0,24 | 0,985 | 14,916 | 1,272 |
| MALACATÁN | 1,02 | 24/06/2012 | 1,563 | 2,600 | -0,30 | 2,751 | 122,918 | 2,042 |
| MALACATÁN | 1,02 | 13/09/2012 | 1,071 | 1,550 | -0,30 | 1,621 | 48,065 | 1,548 |
| MALACATÁN | 1,02 | 17/04/2013 | 0,639 | 0,980 | -0,15 | 0,683 | 10,542 | 0,920 |
| MALACATÁN | 1,02 | 16/05/2013 | 0,735 | 1,100 | -0,15 | 0,823 | 14,322 | 1,011 |
| MALACATÁN | 1,02 | 10/09/2013 | 1,603 | 2,900 | -0,35 | 2,985 | 136,715 | 2,180 |
| MALACATÁN | 1,02 | 11/09/2013 | 1,797 | 2,900 | -0,10 | 2,594 | 134,563 | 1,755 |

Tabla V. Información, cuenca Naranjo

| | | | Escala | Escala | Escala | | Perim | | Prof |
|------------------|--------|------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Promedio | Área | mojado | Ancho | media |
| COATEPEQUE | 1,03 | 07/05/2010 | 0,790 | 0,810 | 0,800 | 12,212 | 26,786 | 26,610 | 0,459 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 08/05/2010 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 2,804 | 7,000 | 6,630 | 0,423 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 16/09/2010 | 0,450 | 0,450 | 0,450 | 6,298 | 11,559 | 11,200 | 0,562 |
| MELENDREZ II | 1,03 | 08/05/2010 | -0,220 | -0,220 | -0,220 | 5,381 | 15,987 | 15,920 | 0,338 |
| PAJAPITA | 1,03 | 07/05/2010 | 0,390 | 0,390 | 0,390 | 52,035 | 41,432 | 41,070 | 1,267 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 06/03/2011 | 0,900 | 0,900 | 0,900 | 15,736 | 26,587 | 26,330 | 0,598 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 06/03/2011 | 0,340 | 0,340 | 0,340 | 4,840 | 12,094 | 11,880 | 0,407 |
| MELENDREZ II | 1,03 | 06/03/2011 | 0,740 | 0,740 | 0,740 | 3,555 | 11,666 | 11,590 | 0,307 |
| PAJAPITA | 1,03 | 06/03/2011 | 0,280 | 0,280 | 0,280 | 44,950 | 40,983 | 40,520 | 1,109 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 04/01/2012 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 15,972 | 25,615 | 25,330 | 0,631 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 16/02/2012 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 16,716 | 25,342 | 25,120 | 0,665 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 23/06/2012 | 1,50 | 1,48 | 1,49 | 30,005 | 30,030 | 29,530 | 1,016 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 13/09/2012 | 1,21 | 1,21 | 1,21 | 22,445 | 30,809 | 30,520 | 0,735 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 18/02/2012 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 4,604 | 10,090 | 9,650 | 0,477 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 24/06/2012 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 5,176 | 12,052 | 11,880 | 0,436 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 01/08/2012 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 4,607 | 9,942 | 9,450 | 0,487 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 14/09/2012 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 2,993 | 7,809 | 7,320 | 0,409 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 15/05/2013 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 13,632 | 27,509 | 27,270 | 0,500 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 10/09/2013 | 1,60 | 1,62 | 1,61 | 36,394 | 30,088 | 29,250 | 1,244 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 11/09/2013 | 1,50 | 1,65 | 1,58 | 34,983 | 29,917 | 29,120 | 1,201 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 17/05/2013 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 2,571 | 9,631 | 9,530 | 0,270 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 10/09/2013 | 0,88 | 0,86 | 0,87 | 8,080 | 9,063 | 7,360 | 1,098 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 09/10/2013 | 0,76 | 0,72 | 0,74 | 5,331 | 7,687 | 7,360 | 0,724 |

Continuación tabla V.

| | | | Radio | Prof. | | Velocidad | | Factor |
|------------------|-------------------------------|------------|------------|--------|-------|-----------|--------|------------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulico | Máxima | Но | Media | Caudal | Hidráulico |
| COATEPEQUE | 1,03 | 07/05/2010 | 0,456 | 0,820 | -0,35 | 1,082 | 13,212 | 1,826 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 08/05/2010 | 0,401 | 0,680 | 0,00 | 0,434 | 1,218 | 0,800 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 16/09/2010 | 0,545 | 0,790 | -0,10 | 1,093 | 6,884 | 1,639 |
| MELENDREZ II | 1,03 | 08/05/2010 | 0,337 | 0,500 | -0,22 | 0,691 | 3,720 | 1,429 |
| PAJAPITA | 1,03 | 07/05/2010 | 1,256 | 1,890 | -0,22 | 0,175 | 9,106 | 0,150 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 06/03/2011 | 0,592 | 0,890 | -0,17 | 0,722 | 11,363 | 1,024 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 06/03/2011 | 0,400 | 0,680 | -0,07 | 0,429 | 2,075 | 0,789 |
| MELENDREZ II | 1,03 | 06/03/2011 | 0,305 | 0,470 | -0,19 | 0,608 | 2,162 | 1,343 |
| PAJAPITA | 1,03 | 06/03/2011 | 1,097 | 1,760 | -0,19 | 0,111 | 4,973 | 0,104 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 04/01/2012 | 0,624 | 1,040 | -0,07 | 0,678 | 10,834 | 0,929 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 16/02/2012 | 0,660 | 1,010 | -0,07 | 0,568 | 9,503 | 0,750 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 23/06/2012 | 0,999 | 1,370 | -0,20 | 1,830 | 54,920 | 1,831 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 13/09/2012 | 0,728 | 1,100 | -0,24 | 1,162 | 26,079 | 1,435 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 18/02/2012 | 0,456 | 0,720 | 0,00 | 0,350 | 1,611 | 0,590 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 24/06/2012 | 0,429 | 0,650 | -0,12 | 0,725 | 3,752 | 1,273 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 01/08/2012 | 0,463 | 0,630 | 0,00 | 0,497 | 2,287 | 0,829 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 14/09/2012 | 0,383 | 0,610 | -0,10 | 0,868 | 2,597 | 1,644 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 15/05/2013 | 0,496 | 0,680 | -0,20 | 0,661 | 9,016 | 1,056 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 10/09/2013 | 1,210 | 1,600 | -0,10 | 1,962 | 71,394 | 1,728 |
| COATEPEQUE | 1,03 | 11/09/2013 | 1,169 | 1,420 | -0,10 | 1,768 | 61,854 | 1,593 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 17/05/2013 | 0,267 | 0,380 | -0,15 | 0,496 | 1,274 | 1,195 |
| CORRAL GRANDE II | RAL GRANDE II 1,03 10/09/2013 | | 0,892 | 1,720 | -0,15 | 1,584 | 12,799 | 1,710 |
| CORRAL GRANDE II | 1,03 | 09/10/2013 | 0,693 | 0,900 | -0,15 | 0,805 | 4,289 | 1,027 |

Tabla VI. Información, cuenca Ocosito

| | | | Escala | Escala | ı E | Escala | | Pe | rim | | | Prof |
|----------------|--------|------------|-----------|--------|------------|--------|-----------|-----------|--------|--------|-----|---------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Pr | omedio | Área | mo | jado | Anc | ho | media |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 07/05/2010 | 0,320 | 0,320 | | 0,320 | 49,995 | 95 48,45 | | 48,270 | | 1,036 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 07/03/2011 | 0,230 | 0,230 | | 0,230 | 48,510 | 46, | ,235 | 46,0 | 000 | 1,055 |
| EL ASINTAL | 1,04 | 05/03/2011 | 0,380 | 0,380 | | 0,380 | 4,372 | 10, | ,904 | 10,7 | 70 | 0,406 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 16/02/2012 | 0,22 | 0,22 | | 0,22 | 51,348 | 45, | ,004 | 44,7 | '00 | 1,149 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 22/06/2012 | 0,66 | 0,66 | | 0,66 | 71,707 | 56, | ,458 | 56,2 | 10 | 1,276 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 12/09/2012 | 0,72 | 0,72 | | 0,72 | 69,465 | 56, | ,777 | 56,5 | 000 | 1,229 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 15/05/2013 | 0,26 | 0,26 | | 0,26 | 49,182 | 45, | ,111 | 44,7 | '90 | 1,098 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 15/08/2013 | 0,93 | 0,90 | | 0,92 | 84,395 60 | | ,607 | 60,3 | 20 | 1,399 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 12/09/2013 | 1,41 | 1,54 | | 1,48 | 123,430 | 65,809 | | 65,3 | 800 | 1,890 |
| | | | Radio | Pr | Prof. | | Velocio | lad | | | F | actor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulic | o Máx | ima | Но | Medi | а | Cau | dal | Hid | ráulico |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 07/05/2010 | 1,032 | 1,4 | 50 | -0,15 | 0,193 | 3 | 9,65 | 56 | C |),189 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 07/03/2011 | 1,049 | 1,5 | 50 | 0,00 | 0,104 | ļ | 5,05 | 54 | C |),101 |
| EL ASINTAL | 1,04 | 05/03/2011 | 0,401 | 0,6 | 30 | -0,52 | 0,557 | | 7 2,43 | | 1 | ,025 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 16/02/2012 | 1,141 | 1,6 | 00 | 0,00 | 0,114 | | 1 5,84 | | C |),104 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 22/06/2012 | 1,270 | 1,9 | 80 | -0,20 | 0,408 | | 29,292 | | C |),348 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 12/09/2012 | 1,223 | 2,0 | 000 | -0,30 | 0,528 | 3 | 36,6 | 62 | C |),461 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 15/05/2013 | 1,090 | 1,5 | 00 | 0,00 | 0,119 |) | 5,85 | 52 | C |),112 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 15/08/2013 | 1,392 | 2,1 | 50 | -0,20 | 0,593 | | 50,0 | 39 | C | ,475 |
| CABALLO BLANCO | 1,04 | 12/09/2013 | 1,876 | 2,8 | 50 | -0,20 | 1,135 | 1,135 140 | | 131 | C |),746 |

Tabla VII. Información, cuenca Samalá

| | | I | | | | | | | | | | |
|------------|--------|------------|-----------|-------|-------|------------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|
| | | | Escala | Es | cala | E | scala | | F | Perim | | Prof |
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Fi | inal | Pro | omedio | Área | m | ojado | Ancho | media |
| CANTEL | 1,05 | 07/05/2010 | 0,340 | 0,340 | | 0,340 | | 6,954 | 1 | 7,860 | 17,710 | 0,393 |
| CANDELARIA | 1,05 | 06/05/2010 | 0,020 | 0, | 020 | C | 0,020 | 3,883 | 1 | 1,059 | 10,970 | 0,354 |
| CANTEL II | 1,05 | 03/06/2011 | 0,130 | 0, | 130 | C |),130 | 12,742 | 1 | 2,696 | 11,880 | 1,073 |
| CANTEL II | 1,05 | 16/02/2012 | 0,03 | 0 | ,03 | | 0,03 | 10,131 | 1 | 1,884 | 11,270 | 0,899 |
| CANTEL II | 1,05 | 22/06/2012 | 0,30 | 0 | ,30 | | 0,30 | 9,989 | 1 | 5,147 | 14,770 | 0,676 |
| CANTEL II | 1,05 | 12/09/2012 | 0,32 | 0 | ,32 | | 0,32 | 12,540 | 1 | 5,187 | 14,620 | 0,858 |
| CANDELARIA | 1,05 | 26/06/2013 | -0,05 | - |),05 | - | 0,05 | 10,339 | 1 | 3,047 | 12,690 | 0,815 |
| CANDELARIA | 1,05 | 14/08/2013 | 0,01 | 0 | ,01 | | 0,01 | 9,466 | 1 | 3,162 | 12,900 | 0,734 |
| CANDELARIA | 1,05 | 12/09/2013 | 0,85 | 0 | ,85 | - | 0,85 | 25,602 | 2 | 0,411 | 19,510 | 1,312 |
| CANTEL II | 1,05 | 14/05/2013 | 0,02 | 0 | ,02 | (| 0,02 | 10,499 | 1 | 2,071 | 11,610 | 0,904 |
| CANTEL II | 1,05 | 14/08/2013 | 0,03 | 0 | ,03 | (| 0,03 | 11,993 | 13,371 | | 12,840 | 0,934 |
| CANTEL II | 1,05 | 12/09/2013 | 1,30 | 1 | ,30 | | 1,30 | 32,494 | 18,886 | | 17,360 | 1,872 |
| | | | Radio | | Pro | of. | | Velocida | ad | | Fa | ctor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráuli | СО | Máxi | /láxima Ho | | Media | | Caudal | Hidr | áulico |
| CANTEL | 1,05 | 07/05/2010 | 0,389 | | 0,61 | | | 0,526 | | 3,659 | 0, | 987 |
| CANDELARIA | 1,05 | 06/05/2010 | 0,351 | | 0,51 | 10 | -0,15 | 0,164 | 0,164 0,637 | | 0, | 330 |
| CANTEL II | 1,05 | 03/06/2011 | 1,004 | | 1,52 | 20 | 0,00 | 0,645 | | 8,215 | 0, | 643 |
| CANTEL II | 1,05 | 16/02/2012 | 0,853 | | 1,43 | 30 | 0,00 | 0,470 | | 4,766 | 0, | 523 |
| CANTEL II | 1,05 | 22/06/2012 | 0,659 | | 1,50 | 00 | -0,37 | 0,763 | | 7,623 | 1, | 007 |
| CANTEL II | 1,05 | 12/09/2012 | 0,826 | | 1,70 | 00 | -0,27 | 0,796 | | 9,978 | 0, | 904 |
| CANDELARIA | 1,05 | 26/06/2013 | 0,792 | | | 50 | -0,39 | 1,272 | | 13,148 | 1, | 485 |
| CANDELARIA | 1,05 | 14/08/2013 | 0,719 1,2 | | 1,20 | 00 | -0,40 | 1,073 | | 10,160 | 1, | 337 |
| CANDELARIA | 1,05 | 12/09/2013 | 1,254 | | 2,41 | 10 | -0,40 | 2,704 | | 69,227 | 2, | 325 |
| CANTEL II | 1,05 | 14/05/2013 | 0,870 | | 1,34 | | | 0,380 | | 3,987 | 0, | 417 |
| CANTEL II | 1,05 | 14/08/2013 | 1 1 | | 1,390 | | 0,00 | 0,337 | | 4,043 | 0, | 362 |
| CANTEL II | 1,05 | 12/09/2013 | 1,721 | | 2,85 | 50 | | | | 50,303 | 1, | 078 |

Tabla VIII. Información, cuenca Sis

| | | | Escala | Escala | Escala | | Perim | | Prof |
|------------|--------|------------|------------|--------|----------|--------|-------------|--------|--------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Promedio | Área | mojado | Ancho | media |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 06/05/2010 | 0,750 | 0,750 | 0,750 | 10,208 | 19,101 | 18,820 | 0,542 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 05/03/2011 | 0,490 | 0,490 | 0,490 | 14,059 | 19,723 | 19,250 | 0,730 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 15/02/2012 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 14,939 | 19,418 | 18,740 | 0,797 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 21/06/2012 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 15,591 | 19,117 | 18,350 | 0,850 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 12/09/2012 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 17,796 | 19,753 | 18,860 | 0,944 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 16/04/2013 | 0,61 | 0,61 | 0,61 | 12,337 | 18,389 | 17,930 | 0,688 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 14/05/2013 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 14,189 | 17,947 | 17,070 | 0,831 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 14/08/2013 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 15,123 | 19,029 | 18,500 | 0,817 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 13/09/2013 | 1,09 | 1,11 | 1,10 | 26,083 | 19,681 | 18,200 | 1,433 |
| | | | Radio | Prof. | Prof. | | 1 | Fa | ctor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulico | Máxim | a Ho | Media | Caudal | Hidr | áulico |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 06/05/2010 | 0,534 | 0,860 | 0,02 | 0,262 | 2,671 | 0, | 397 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 05/03/2011 | 0,713 | 0,930 | 0,25 | 0,153 | 2,150 | 0, | 192 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 15/02/2012 | 0,769 | 1,010 | 0,37 | 0,108 | 1,618 | 0, | 129 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 21/06/2012 | 0,816 | 1,120 | 0,10 | 0,412 | 6,423 | 0, | 472 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 12/09/2012 | 0,901 | 1,260 | 0,17 | 0,365 | 6,502 | 0, | 392 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 16/04/2013 | 0,671 | 0,850 | 0,32 | 0,086 | 1,064 | 0, | 113 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 14/05/2013 | 0,791 | 1,100 | 0,37 | 0,144 | 0,144 2,037 | | 168 |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 14/08/2013 | 0,795 | 1,100 | 0,12 | 0,350 | 5,293 | 0,408 | |
| LA MÁQUINA | 1,06 | 13/09/2013 | 1,325 | 1,740 | 0,30 | 0,665 | 17,342 | 0, | 551 |

Tabla IX. Información, cuenca Icán

| | | | Escala | la Escala | | cala | | Per | rim | | | Prof |
|-----------|--------|------------|--------------|-----------|-------|-------|------------|--------|------|-------|-----|---------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio Final | | Pror | nedio | Área | moj | ado | And | cho | media |
| LA FRANJA | 1,06 | 06/05/2010 | 0,210 | 0,210 | 0,2 | 210 | 27,933 | 21,6 | 616 | 19,0 | 620 | 1,424 |
| LA FRANJA | 1,06 | 05/03/2011 | 0,060 | 0,060 | 0,0 | 060 | 21,657 | 17,8 | 328 | 16,2 | 210 | 1,336 |
| LA FRANJA | 1,06 | 18/06/2013 | 0,35 | 0,35 | 0. | ,35 | 33,559 | 22, | 705 | 20,4 | 450 | 1,641 |
| LA FRANJA | 1,06 | 14/08/2013 | 0,42 | 0,42 | 0. | ,42 | 33,483 | 21, | 139 | 19,4 | 420 | 1,724 |
| LA FRANJA | 1,06 | 13/09/2013 | 0,70 | 0,70 | 0. | ,70 | 40,683 24 | | 659 | 22, | 450 | 1,812 |
| | | | Radio | | Prof. | | Veloci | dad | | | F | actor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráuli | со М | áxima | Но | Media | | Cau | dal | Hid | ráulico |
| LA FRANJA | 1,06 | 06/05/2010 | 1,292 | 3 | 3,100 | -1,11 | -1,11 0,15 | | 4,22 | 4,227 | |),128 |
| LA FRANJA | 1,06 | 05/03/2011 | 1,215 | 2 | 2,650 | -1,11 | 0,10 | 2 2,2 | | 210 | | ,090 |
| LA FRANJA | 1,06 | 18/06/2013 | 1,478 | 3 | 3,350 | -1,05 | 0,27 | 0 9.0 | | 59 | C | ,208 |
| LA FRANJA | 1,06 | 14/08/2013 | 1,584 | 3 | 3,500 | -1,00 | 0,28 | 2 9,42 | | 26 | C | ,207 |
| LA FRANJA | 1,06 | 13/09/2013 | 1,650 | 4 | 4,050 | | 0,68 | 1 27,7 | | '07 | C | ,488 |

Tabla X. Información, cuenca Nahualate

| | | | Escala | Esc | ala | Esc | ala | | | Perim | 1 | Prof |
|-----------------|--------|------------|---------|-------|----------|------|------|------|--------|--------|---------|------------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Fin | al | Prom | edio | Ár | ea | mojad | o Ancho | media |
| MONTECRISTO | 1,07 | 06/05/2010 | 1,090 | 1,0 | 90 | 1,0 | 90 | 20,8 | 305 | 22,021 | 21,130 | 0,985 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 05/05/2010 | 0,180 | 0,1 | 80 | 0,1 | 80 | 35,2 | 269 | 29,087 | 28,480 | 1,238 |
| MONTECRISTO | 1,07 | 04/03/2011 | 0,530 | 0,5 | 30 | 0,5 | 30 | 10,5 | 578 | 16,584 | 16,170 | 0,654 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 04/03/2011 | 0,120 | 0,1 | 20 | 0,1 | 20 | 17,5 | 584 | 22,170 | 21,850 | 0,805 |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 15/02/2012 | ; | SIN E | SCA | ٩LA | | 17,9 | 912 | 18,867 | 18,290 | 0,979 |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 20/06/2012 | ; | SIN E | I ESCALA | | 39,0 | 046 | 52,293 | 51,600 | 0,757 | |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 12/09/2012 | ; | SIN E | SCA | ٩LA | | 40,3 | 300 | 52,857 | 52,390 | 0,769 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 14/05/2013 | 0,30 | 0,3 | 30 | 0,3 | 30 | 16,1 | 109 | 37,247 | 37,180 | 0,433 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 13/08/2013 | 0,63 | 0,6 | 3 | 0,6 | 3 | 31,4 | 165 | 47,228 | 47,000 | 0,669 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 13/09/2013 | 1,15 | 1,1 | 5 | 1,1 | 5 | 53,0 | 059 | 52,062 | 51,680 | 1,027 |
| | | | Radio | 0 | Р | rof. | | | Velo | cidad | | Factor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidrául | ico | Má | xima | Н | 5 | М | edia | Caudal | Hidráulico |
| MONTECRISTO | 1,07 | 06/05/2010 | 0,945 | 5 | 2, | ,200 | -0,0 | 30 | 0, | 396 | 8,246 | 0,412 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 05/05/2010 | 1,213 | 3 | 2, | ,000 | -0,0 | 30 | 0, | 781 | 27,548 | 0,687 |
| MONTECRISTO | 1,07 | 04/03/2011 | 0,638 | 3 | 1, | ,120 | -0,0 | 50 | 0, | 322 | 3,411 | 0,435 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 04/03/2011 | 0,793 | 3 | 1, | ,400 | -0,0 | 50 | 0, | 818 | 14,383 | 0,955 |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 15/02/2012 | 0,949 | 9 | 2, | ,000 | -0,1 | 15 | 1, | 486 | 26,624 | 1,539 |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 20/06/2012 | 0,747 | 7 | 2, | ,400 | -0,1 | 15 | 2, | 041 | 79,699 | 2,480 |
| SAN MIGUEL MOCÁ | 1,07 | 12/09/2012 | 0,762 | 2 | 1, | ,720 | -0,1 | 10 | 1, | 753 | 70,627 | 2,100 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 14/05/2013 | 0,432 | 2 | 0, | ,800 | -0,1 | 10 | 0, | 802 | 12,920 | 1,402 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 13/08/2013 | 0,666 | 6 | 1, | ,350 | -0,0 |)5 | 1, | 242 | 39,089 | 1,629 |
| SAN MIGUEL MOCA | 1,07 | 13/09/2013 | 1,019 | 9 | 1, | ,870 | 0,0 | 0 | 2, | 384 | 126,492 | 2,354 |

Fuente: Insivumeh.

Tabla XI. Información, cuenca Madre Vieja

| | | | Escala | Escala | Escala | | Perim | | | Prof |
|----------|--------|------------|-------------------|----------|----------|-----------|-------------|--------------|-------|--------|
| Estación | Cuenca | Fecha | Inicio | Final | Promedio | Área | mojado | Anch | 10 | media |
| PATULUL | 1,09 | 05/05/2010 | 0,530 | 0,530 | 0,530 | 7,104 | 12,720 | 12,43 | 30 | 0,572 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 04/03/2011 | 0,230 0,230 0,230 | | 3,455 | 9,048 | 8,88 | 0 | 0,389 | |
| SAJBINÁ | 1,09 | 03/06/2011 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 3,331 | 8,838 | 8,64 | .0 | 0,386 |
| PATULUL | 1,09 | 02/03/2011 | SI | IN ESCAL | А | 7,516 | 12,748 | 12,10 | 00 | 0,621 |
| PATULUL | 1,09 | 02/06/2011 | SI | IN ESCAL | А | 8,925 | 13,144 | 12,60 | 00 | 0,708 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 15/02/2012 | SI | IN ESCAL | А | 3,563 | 8,958 | 8,79 | 0 | 0,405 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 11/09/2012 | SI | IN ESCAL | А | 3,289 | 9,704 | 9,58 | 0 | 0,343 |
| PATULUL | 1,09 | 15/02/2012 | SI | IN ESCAL | .A | 6,437 | 13,091 | 12,52 | 20 | 0,514 |
| PATULUL | 1,09 | 19/06/2012 | SI | IN ESCAL | .A | 9,720 | 13,290 | 12,60 | 00 | 0,771 |
| PATULUL | 1,09 | 11/09/2012 | SI | IN ESCAL | .A | 8,490 | 13,327 | 12,90 | 00 | 0,658 |
| PATULUL | 1,09 | 11/10/2012 | SI | IN ESCAL | .A | 11,737 | 13,977 | 13,18 | 30 | 0,891 |
| PATULUL | 1,09 | 14/05/2013 | 0,330 | 0,330 | 0,330 | 10,854 | 13,006 | 11,53 | 30 | 0,941 |
| PATULUL | 1,09 | 10/07/2013 | 0,420 | 0,420 | 0,420 | 8,792 | 12,388 | 11,23 | 30 | 0,783 |
| PATULUL | 1,09 | 13/09/2013 | 0,570 | 0,570 | 0,570 | 13,850 | 13,880 | 13,00 | 00 | 1,065 |
| | | | Radio | Prof. | | Velocidad | | | Fa | ctor |
| Estación | Cuenca | Fecha | Hidráulico | Máxima | a Ho | Media | Cau | dal | Hidra | áulico |
| PATULUL | 1,09 | 05/05/2010 | 0,558 | 0,870 | -0,07 | 1,120 | 7,96 | 60 | 1,6 | 652 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 04/03/2011 | 0,382 | 0,530 | -0,10 | 1,002 | 3,46 | 13 | 1,9 | 035 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 03/06/2011 | 0,377 | 0,600 | -0,07 | 0,839 | 2,79 | 94 | 1,6 | 607 |
| PATULUL | 1,09 | 02/03/2011 | 0,590 | 1,130 | -0,15 | 1,841 | 13,8 | 13,840 2 | | 619 |
| PATULUL | 1,09 | 02/06/2011 | 0,679 | 1,100 | -0,16 | 2,246 | 20,0 | 20,048 2,908 | | 908 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 15/02/2012 | 0,398 | 0,600 | -0,10 | 1,024 | 3,64 | 74 | 1,8 | 3926 |
| SAJBINÁ | 1,09 | 11/09/2012 | 0,339 | 0,540 | -0,25 | 1,944 | 6,39 | 3,999 | | 999 |
| PATULUL | 1,09 | 15/02/2012 | 0,492 | 0,700 | -0,14 | 1,329 | 8,5 | 54 | 2,133 | |
| PATULUL | 1,09 | 19/06/2012 | 0,731 | 1,000 | -0,15 | 2,374 | 23,0 | 77 | 2,925 | |
| PATULUL | 1,09 | 11/09/2012 | 0,637 | 0,800 | -0,16 | 1,975 | 16,7 | 66 | 2,667 | |
| PATULUL | 1,09 | 11/10/2012 | 0,840 | 1,300 | -0,14 | 2,627 | 30,8 | 832 2,951 | | 951 |
| PATULUL | 1,09 | 14/05/2013 | 0,835 | 1,600 | -0,14 | 0,643 | 6,98 | 80 | 0,726 | |
| PATULUL | 1,09 | 10/07/2013 | 0,710 | 1,290 | 0,00 | 1,319 | 1,319 11,59 | | 1,6 | 658 |
| PATULUL | 1,09 | 13/09/2013 | 0,998 | 1,300 | 0,00 | 2,100 | 29,0 | 81 | 2, | 103 |

Fuente: Insivumeh.

6. RESULTADOS Y DESARROLLO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN

A continuación se presentan las curvas de calibración, secciones transversales, perfiles y perspectivas en 3D de las estaciones de control de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, que se construyeron a partir de la información obtenida de las estaciones de control según fuente de información del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). Para elaborar las curvas se aplicó un método matemático, realizando una regresión potencial con el uso del programa de cálculo Excel, el cual fue el método que más se ajustó a la sucesión de datos, es decir, a los aforos reales. Luego, con el uso del programa HEC-RAS, se simularon caudales de las secciones de control para cada una de las cuencas de estudio, desde un caudal mínimo hasta un caudal máximo, cuando el nivel de agua se encuentra al desborde de cada sección.

El procedimiento aplicado con HEC-RAS se explicó anteriormente en el capítulo 4, subtítulo 4.4, del presente trabajo. Por último, con los datos simulados, se extrapoló cada una de las curvas de calibración determinando una ecuación para determinar caudales (Q), que estén en función de una altura de agua (H). Para demostrar cómo se determinó la ecuación de cada una de las curvas, se explica el procedimiento a continuación, tomando como base los datos de la cuenca Coatán.

6.1. Procedimiento para determinar Ho

Generalmente Ho no se conoce y puede encontrarse mediante prueba y error, asumiendo diferentes valores de Ho y graficando Log(Q) contra Log(H-Ho), el valor final de Ho es aquel que al graficar los datos de Log(Q) contra Log(H-Ho) permite obtener el mejor ajuste a una línea recta. Para elaborar las curvas de calibración, se determinó Ho por medio de prueba y error.

Como ejemplo del procedimiento se tomó como base los datos de la estación hidrológica que le pertenece a la cuenca Coatán.

Tabla XII. Datos de Ho, cuenca Coatán

| Fecha | Caudal (m^3/s) | Prof media (m) | Vel media | Ho(m) | Н-Но | Log(Q) | Log(H-Ho) |
|------------|------------------|----------------|-----------|--------|------|-------------|-----------|
| 08/05/2010 | 0,62 | 0,32 | 0,17 | -0,150 | 0,47 | -0,20843625 | -0,33 |
| 17/09/2010 | 5,67 | 0,63 | 0,66 | -0,300 | 0,93 | 0,75335298 | -0,03 |
| 18/02/2012 | 1,01 | 0,28 | 0,32 | -0,300 | 0,58 | 0,00358945 | -0,24 |
| 24/06/2012 | 2,77 | 0,28 | 0,68 | -0,450 | 0,73 | 0,44251075 | -0,14 |
| 14/09/2012 | 2,86 | 0,31 | 0,59 | -0,450 | 0,76 | 0,45567429 | -0,12 |
| 18/04/2013 | 0,44 | 0,44 | 0,11 | 0,000 | 0,44 | -0,35204636 | -0,36 |
| 18/08/2013 | 3,65 | 0,46 | 0,59 | -0,350 | 0,81 | 0,56209621 | -0,09 |
| 11/09/2013 | 17,14 | 1,18 | 1,52 | -0,200 | 1,38 | 1,23404754 | 0,14 |

Fuente: Insivumeh.

Para determinar los Ho, se asumieron diferentes valores de Ho y se graficaron los valores resultantes de Log(Q) contra Log(H-Ho), hasta obtener el mejor ajuste a una línea recta, como se visualiza en la siguiente gráfica.

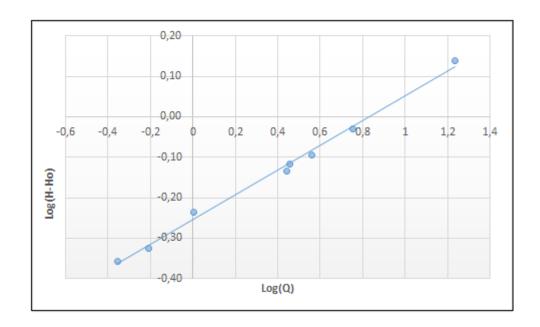


Figura 31. Gráfica Log(Q) contra Log(H-Ho)

Así, sucesivamente se aplica el mismo procedimiento para determinar los demás valores de Ho de cada una de las curvas de calibración.

6.2. Procedimiento para determinar la ecuación de cada curva de calibración por regresión potencial

Como ejemplo del procedimiento, se toma como base los datos de la estación hidrológica que le pertenece a la cuenca Coatán.

Tabla XIII. Datos logarítmicos, cuenca Coatán

| X(H) Y(Q) | | X'= log(X-Xo) | Y'= logY | X' Y' | X' ² | |
|------------|-------|---------------|--------------|--------------|-----------------|--|
| 0,47 | 0,62 | -0,327902142 | -0,208436245 | 0,068346691 | 0,107519815 | |
| 0,93 | 5,67 | -0,031517051 | 0,753352984 | -0,023743465 | 0,000993325 | |
| 0,58 | 1,01 | -0,236572006 | 0,003589447 | -0,000849163 | 0,055966314 | |
| 0,73 | 2,77 | -0,13667714 | 0,442510754 | -0,060481104 | 0,018680641 | |
| 0,76 | 2,86 | -0,119186408 | 0,45567429 | -0,054310182 | 0,0142054 | |
| 0,44 | 0,44 | -0,356547324 | -0,352046364 | 0,125521189 | 0,127125994 | |
| 0,81 | 3,65 | -0,091514981 | 0,562096212 | -0,051440224 | 0,008374992 | |
| 1,38 | 17,14 | 0,139879086 | 1,234047536 | 0,172617442 | 0,019566159 | |
| Sumatorias | | -1,160037966 | 2,890788614 | 0,175661184 | 0,352432638 | |

Forma de ecuación

$$Y = A(X - X_0)^B$$

Como primer paso se aplica logaritmos a ambos lados de la ecuación

$$logY = logA(X - X_0)^B$$

Luego se aplican las leyes de logaritmos

$$logY = logA + log(X - X_0)^B$$

$$logY = logA + Blog(X - X_0)$$

Se continúa simplificando la ecuación identificando cada logaritmo con una variable.

$$logY = Y'$$

$$logA = A'$$

$$log(X - X_0) = X'$$

Simplificando la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Y' = A' + BX'$$

Luego se aplica el método de mínimos cuadrados:

$$B = \frac{n(\sum X'Y') - (\sum X')(\sum Y')}{n\sum X'^2 - (\sum X')^2}$$
 n = número de datos = 8

$$A' = \overline{Y'} - B\overline{X'}$$

Para despejar cada variable, se determinó con el programa Excel obteniendo los siguientes resultados:

$$B = 3,26264$$
 $A' = logA = 0,83275$
 $A = 10^{0,83275} = 6,80377$

Obteniendo finalmente la ecuación de la curva de calibración

$$Q = 6,80377(H - H_0)^{3,26264}$$

Así, sucesivamente se aplica el mismo procedimiento para determinar las demás ecuaciones que representan cada una de las curvas de calibración.

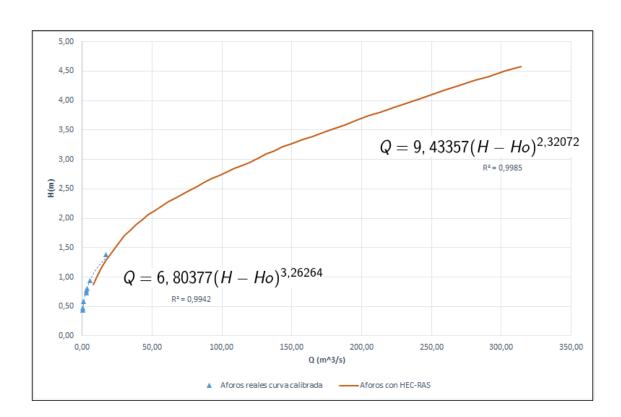


Figura 32. Curva de calibración, cuenca Coatán

Cross Section File Options Help River: Coatan Reload Data **1** 1 Reach: 1.01 ▼ River Sta.: 2 Coatan 11/11/2015 Plan: Coatan (no permanente) .027 -> 2114 Legend 2113 EG Max WS 2112 WS Max WS 2111 Ground 2110 Bank Sta 2109 2108 2107 2106 10 15 20 -10 -<u>5</u> 5 Station (m)

Figura 33. Sección de control, río Coatán

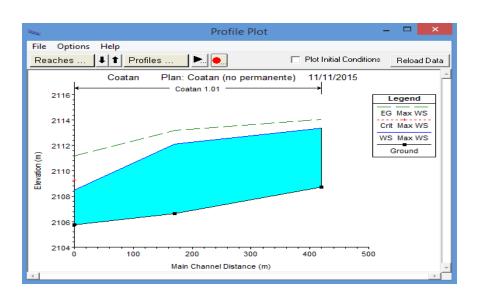


Figura 34. Perfil de estaciones, río Coatán

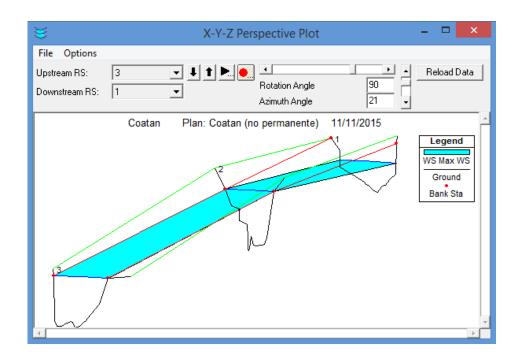


Figura 35. Perspectiva en 3D estaciones, río Coatán

5,00 4,50 4,00 3,50 $Q = 28,0503(H - Ho)^{2,02922}$ 3,00 € 2,50 2,00 1,50 $Q = 19,9525(H - Ho)^{2,80662}$ 1,00 0,50 0,00 100,00 200,00 300,00 400,00 500,00 600,00 0,00 Q (m^3/s) ▲ Aforos reales curva calibrada Aforos con HEC-RAS

Figura 36. Curva de calibración, cuenca Suchiate

Cross Section File Options Help Reload Data River: Suchiate ▼ River Sta.: 2 Reach: 1.02 **▼ 3** 1 Suchiate Plan: Suchiate 12/11/2015 382 Legend 381 EG Max WS 380 Crit Max WS Elevation (m) 379 WS Max WS 378 Ground 377 Bank Sta 375 40 10 20 30

Figura 37. Sección de control, río Suchiate

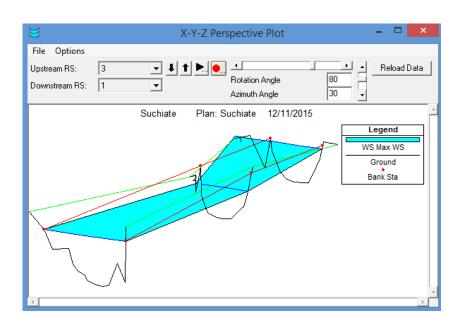
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Station (m)

Profile Plot File Options Help Reaches ... | 1 1 Profiles . Plot Initial Conditions Reload Data Suchiate Plan: Suchiate 12/11/2015 Suchiate 1.02 Legend EG Max WS 382 WS Max WS Crit Max WS Ground 380 378 376 200 250 150 300 100 Main Channel Distance (m)

Figura 38. Perfil de estaciones, río Suchiate

Figura 39. **Perspectiva en 3D estaciones, río Suchiate**



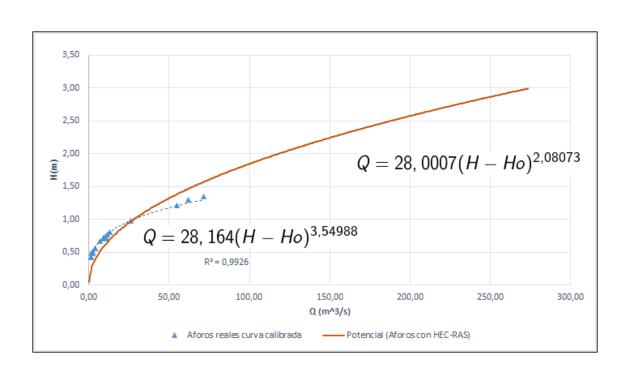


Figura 40. Curva de calibración, cuenca Naranjo

Cross Section File Options Help Reload Data ▶... Naranjo Reach: 1.03 River Sta.: 2 **- 3 1** Plan: Naranjo Naranjo 18/11/2015 seccion 0 .027 314 Legend EG Max WS 313 WS Max WS Elevation (m) 312 Ground Bank Sta 311 310 309 1 -20 -10 10 20 30 Station (m)

Figura 41. Sección de control, río Naranjo

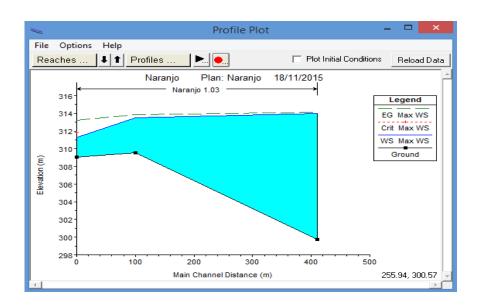


Figura 42. **Perfil de estaciones, río Naranjo**

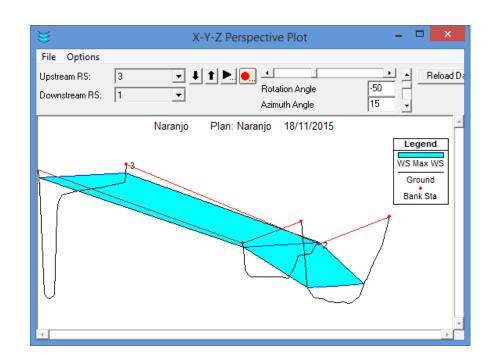


Figura 43. Perspectiva en 3D estaciones, río Naranjo

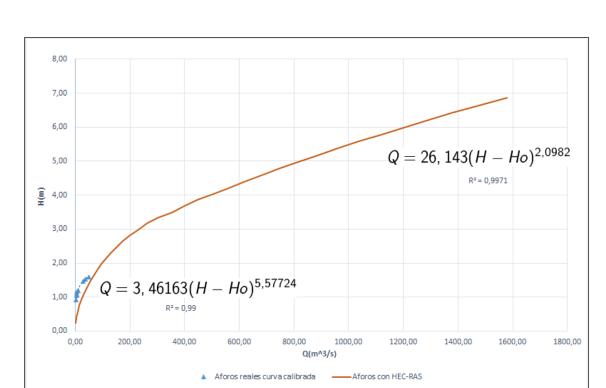


Figura 44. Curva de calibración, cuenca Ocosito

Cross Section Options Help Reload Data River: Ocosito Reach: 1.04 ▼ River Sta.: 2 **→** 🖫 🕇 Plan: Ocosito No permanente 18/11/2015 Ocosito seccion 0 66 7 Legend 64 EG Max WS 62 WS Max WS Ground 60 Bank Sta 56 54 52 -100 -80 -60 -40 Ó Station (m)

Figura 45. Sección de control, río Ocosito

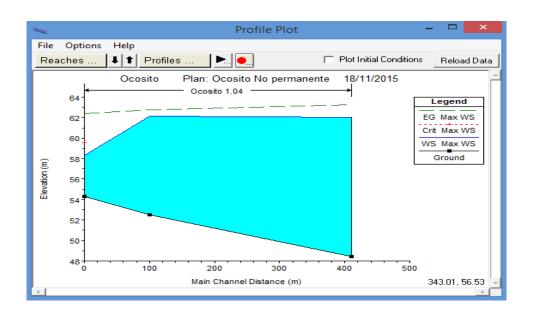


Figura 46. **Perfil de estaciones, río Ocosito**

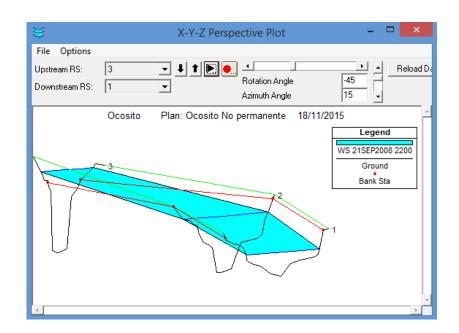


Figura 47. Perspectiva en 3D estaciones, río Ocosito

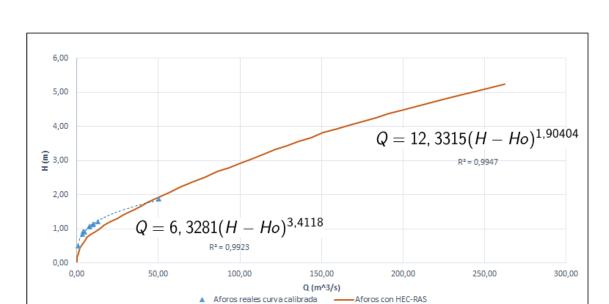


Figura 48. Curva de calibración, cuenca Samalá

Cross Section Options Help File **▼** ▶... ● ... 「 Reload Data River: Samala Reach: 1.05 ▼ River Sta.: 2 **. . .** 20/11/2015 Samala Plan: Samala no permanente seccion 0 .027 703 ; Legend 702 EG Max WS 701 WS Max WS Ground 700 Bank Sta 699 698 697 -15 -10 10 Station (m)

Figura 49. Sección de control, río Samalá

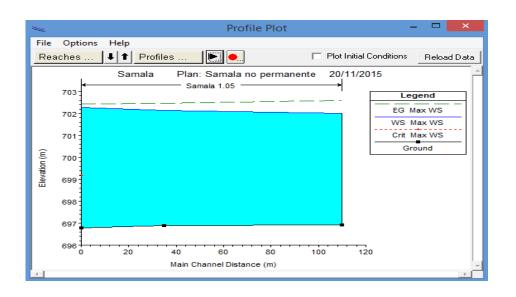


Figura 50. Perfil de estaciones, río Samalá

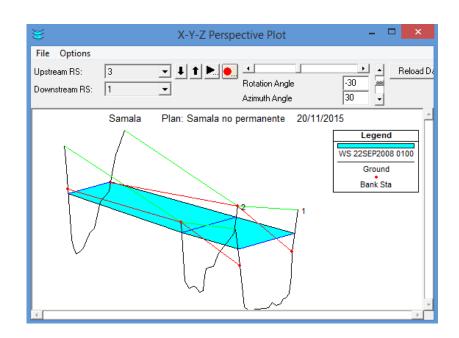
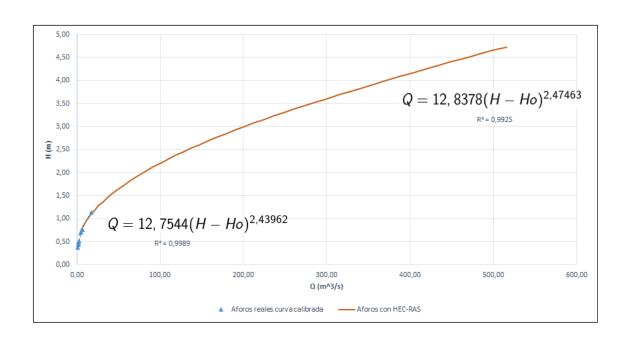


Figura 51. Perspectiva en 3D estaciones, río Samalá

Figura 52. Curva de calibración, cuenca Sis



Cross Section Options Help File Reload Data River: Sis Reach: 1.06 ▼ River Sta.: 2 **▼ 1** 1 Plan: Sis 20/11/2015 seccion 0 .027 Legend 51 EG Max WS 50 WS Max WS Elevation (m) Ground 49 Bank Sta 48 47 46 45 7 -20 10 20 30 -10 40 Station (m)

Figura 53. Sección de control, río Sis

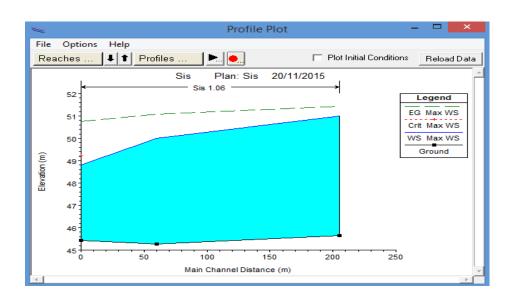


Figura 54. Perfil de estaciones, río Sis

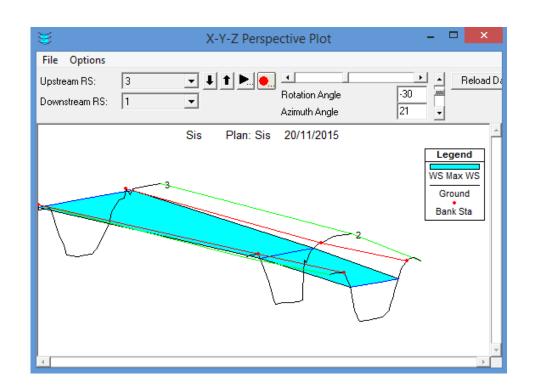


Figura 55. Perspectiva en 3D estaciones rio Sis

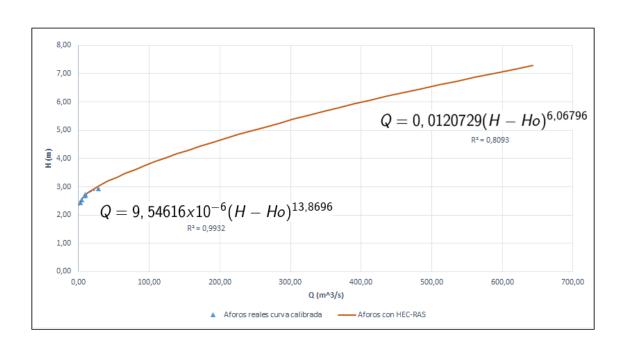


Figura 56. Curva de calibración, cuenca Icán

Cross Section Options File Reload Data River: Ican **.** Reach: 1.07 River Sta.: 2 Plan: Ican 22/11/2015 seccion 0 .027 Legend 86 EG Max WS WS Max WS Elevation (m) Ground Bank Sta 80 78 76 1 -50 -40 -20 -10 Ó Station (m)

Figura 57. Sección de control, río Icán

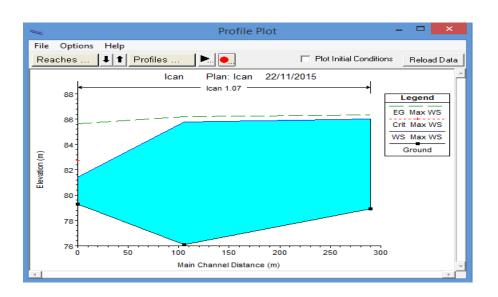


Figura 58. Perfil de estaciones, río Icán

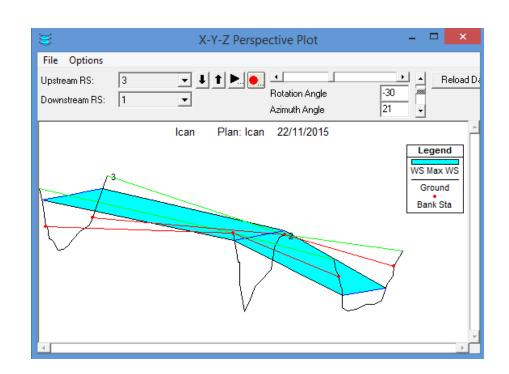


Figura 59. Perspectiva en 3D estaciones, río Icán

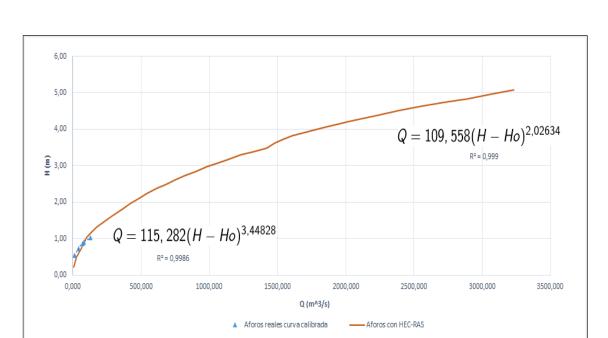


Figura 60. Curva de calibración, cuenca Nahualate

Cross Section File Options Help Nahualate Reload Data Reach: 1.08 River Sta.: 2 **▼** 🗓 🕇 27/11/2015 Nahualate Plan: Nahualate seccion 0 <.027> 186 Legend 185 EG Max WS 184 WS Max WS Elevation (m) Ground 183 Bank Sta 182 181 180 100 150 -150 50 Station (m)

Figura 61. Sección de control, río Nahualate

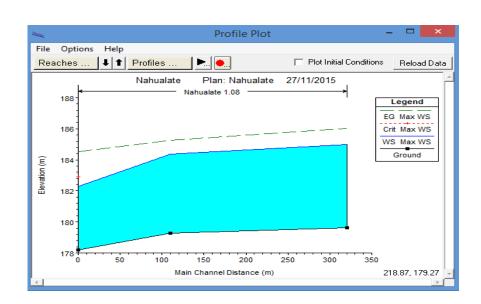


Figura 62. Perfil de estaciones, río Nahualate

X-Y-Z Perspective Plot File Options Upstream RS: Reload Da -25 1 Downstream RS: 21 Azimuth Angle Nahualate Plan: Nahualate 27/11/2015 Legend WS Max WS Ground Bank Sta

Figura 63. Perspectiva en 3D estaciones, río Nahualate

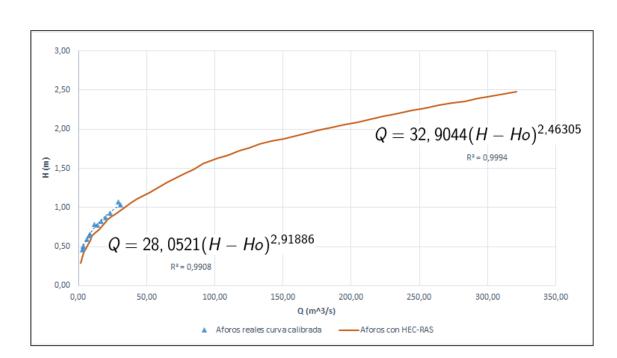


Figura 64. Curva de calibración, cuenca Madre Vieja

Cross Section Options Help **▼ ▶**... [Reload Data Madre Vieja River: Reach: 1.09 ▼ River Sta.: 2 Plan: Madre vieja Madre Vieja 30/11/2015 seccion 1 .027 231 Legend 230 EG Max WS WS Max WS 229 Elevation (m) Ground 228 Bank Sta

227

Figura 65. Sección de control, río Madre Vieja

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Station (m)

-20

20

-40

-60

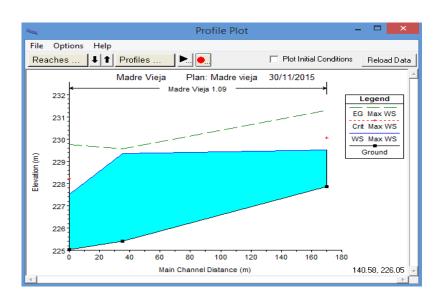


Figura 66. Perfil de estaciones, río Madre Vieja

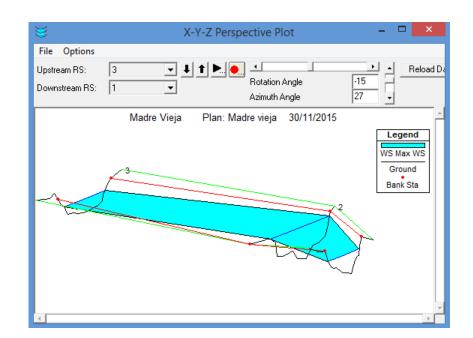


Figura 67. Perspectiva en 3D estaciones, río Madre Vieja

CONCLUSIONES

- Se determinaron las curvas de calibración de caudales y sus respectivas ecuaciones de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico, para el periodo 2010-2013.
- 2. Al elaborar las curvas de calibración se aplicó el método matemático de regresión potencial, el cual fue el que más se ajustó a la sucesión de datos, es decir, a los aforos reales en relación a los niveles de agua, por medio de las estaciones de control pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).
- 3. Se extrapoló cada curva de calibración por medio de las simulaciones hidráulicas en HEC-RAS para caudales extremos máximos. En HEC-RAS se simularon desde caudales mínimos hasta caudales máximos, cerca del desborde de cada sección de control. Ya determinados los caudales máximos para cada una de las estaciones hidrológicas, se procedió a extrapolar las curvas de calibración por medio del programa HEC-RAS, determinando así una ecuación para estimar caudales en relación a niveles de agua que se encuentran dentro de la topografía del cauce.

4. Las curvas de calibración obtenidas sirven de referencia para estudios relacionados con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

RECOMENDACIONES

- 1. La implementación de las herramientas analíticas mediante el uso del computador en la aplicación de metodologías para la determinación de las curvas nivel caudal debe incluir el criterio y la experiencia del ingeniero para el análisis de diferentes aspectos, como: la selección de los datos de aforo a incluir en el procedimiento, los cambios morfológicos que se producen en la sección transversal, la dinámica del río en respuesta a intervenciones y eventos de origen natural o antropogénico que alteran las condiciones naturales del cauce, y los tipos de controles existentes que determinan la relación nivel—caudal de la sección para los diferentes rangos de niveles.
- 2. Se deben estudiar los métodos que existen para elaborar y extrapolar curvas de calibración, y aplicar el método que más se ajuste a la información de una estación hidrométrica. También es necesario auxiliarse de la tecnología, es decir, programas de cálculo o programas de simulaciones hidráulicas, entre otros, para garantizar datos fiables y con un margen mínimo de error.

3. En las estaciones hidrométricas es necesario realizar aforos para un rango amplio de niveles y caudales en un periodo que garantice una buena calibración de la curva de caudales. El objetivo de un buen control de calidad es asegurar la mayor estandarización posible de los datos primarios, antes de que se encuentren disponibles para los usuarios. La calidad de la información debe garantizarse desde la toma del dato en campo, hasta la divulgación o publicación de la misma.

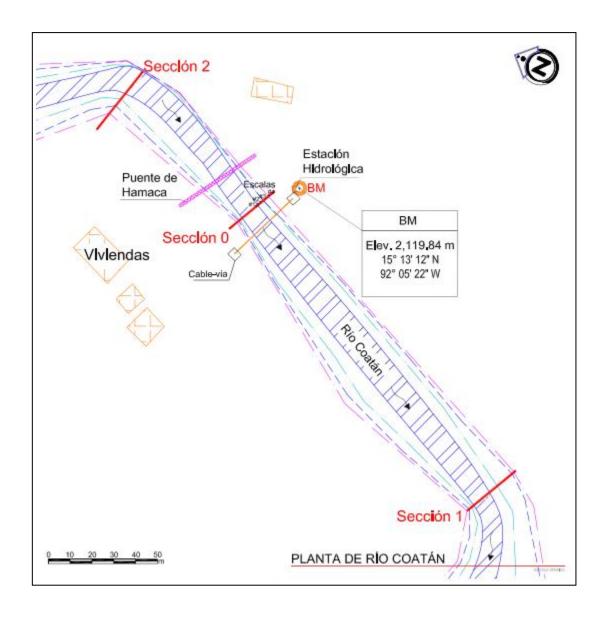
BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO M., Javier Francisco. Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa, 1989. 303 p.
- 2. CHOW, Ven Te. *Hidráulica de los canales abiertos*. México: Diana, 1983. 337 p. ISBN 968-13-1327-5.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Caracterización y modelación matemática del río Cauca PMC fase II. Red geodésica de alta precisión tramo Salvajina La Virginia. Colombia: CVC, 2005. 268 p.
- 4. INSIVUMEH. *Ríos de Guatemala*. [en línea] http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html. [Consulta: 18 de enero de 2015.]
- 5. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a. ed. México: Pearson Educación, México, 1983. 515 p. ISBN 0-02-384231-8.
- 6. Organización Meteorológica Mundial. *Guías de las prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. 5a. ed. Suiza: OMM, 1994. 168 p.

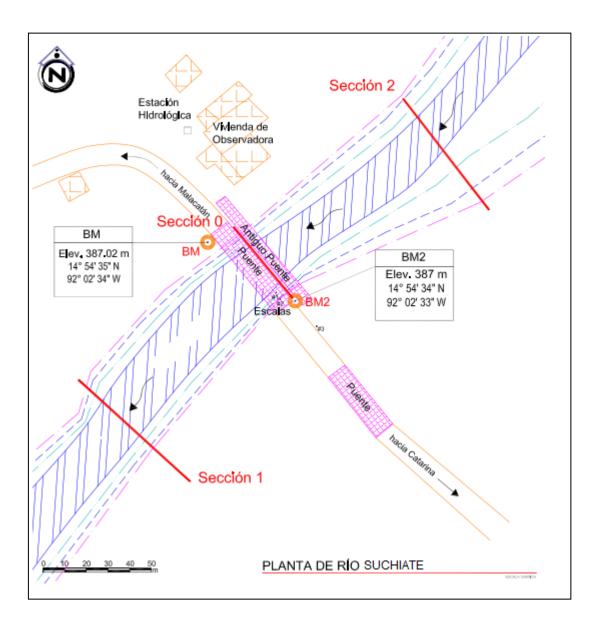
7. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. *HEC-RAS, River analysis system. Hydraulic Reference Manual.* USA: USACE, 2010. 960 p.

ANEXOS

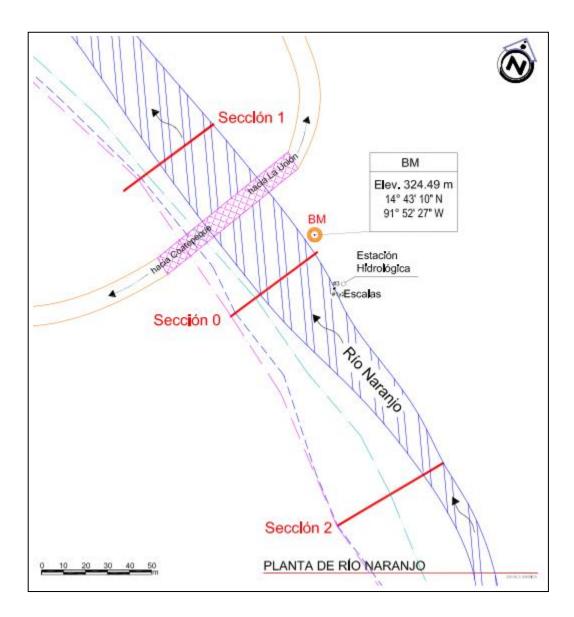
1. Plano en planta del río Coatán



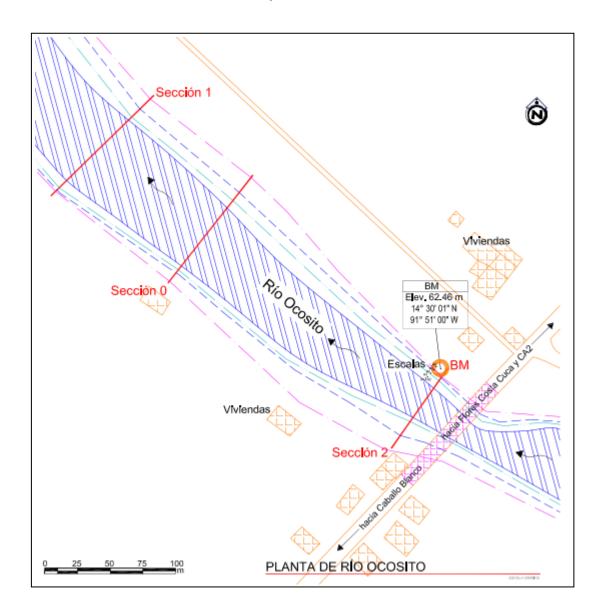
2. Plano en planta del río Suchiate



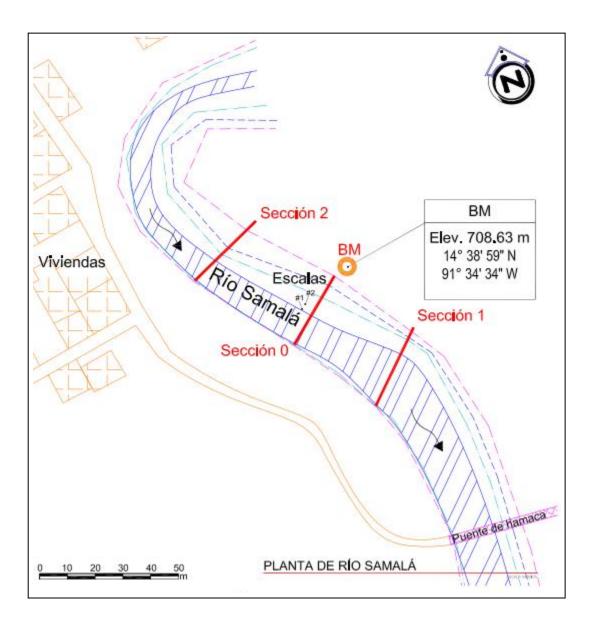
3. Plano en planta del río Naranjo



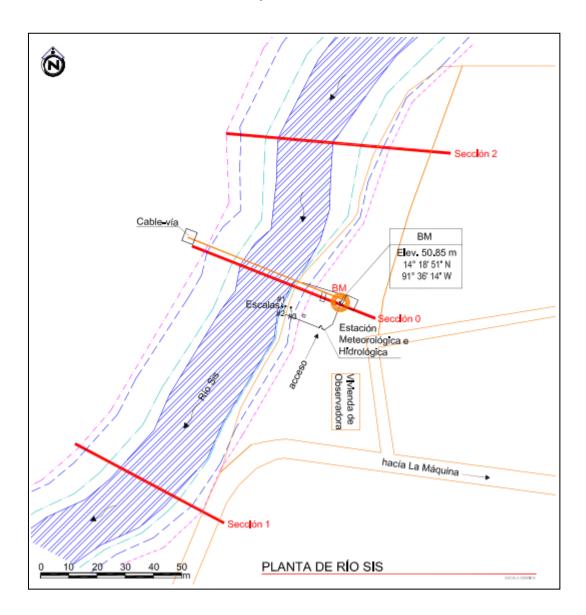
4. Plano en planta del río Ocosito



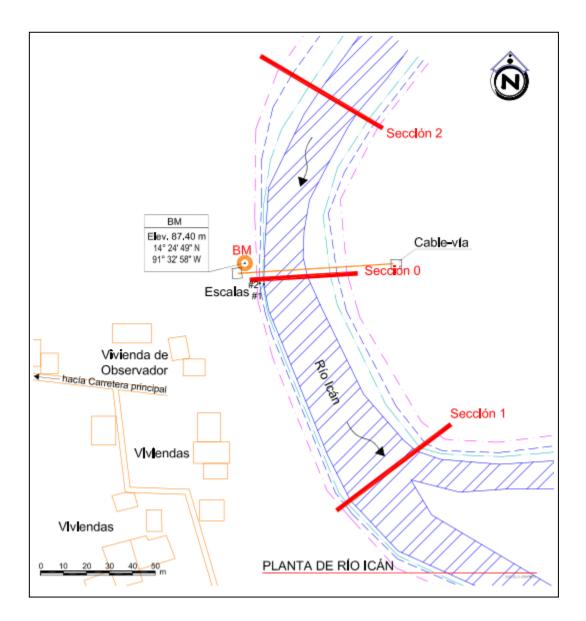
5. Plano en planta del río Samalá



6. Plano en planta del río Sis



7. Plano en planta del río lcán



8. Plano en planta del río Nahualate

