



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL CAUCE DE
ALIVIO “EL CENSO”, SOBRE EL RÍO DE LA SIERRA, ESTADO DE
TABASCO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA URBANA

PRESENTA:

ING. RUBISEL PÉREZ CASTRO

DIRECTOR DE TESINA: M.I. FAUSTINO DE LUNA CRUZ

MÉXICO, D.F.

MAYO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



AGRADECIMIENTOS

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mis padres Rubisel y Mireya, por darme la vida, quererme mucho y por su constante apoyo. Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se los debo a ustedes.

Mi abuelita Rosa Aurora que descansa en paz, por darme muchas lecciones de vida y darme ejemplos de siempre salir adelante, apoyando siempre a mi familia, y aunque en estos momentos no pueda estar conmigo se que desde el cielo me está apoyando.

Mis hermanos, Carolina, Manuel y Rosa, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Mi novia Yurisan, por creer en mí y estar en todo momento conmigo. Por ser tan incondicional y siempre tener una palabra de aliento en esos momentos difíciles, te amo mucho.

Mi amigo José María por ser un muy buen compañero y socio.

A mi tutor Faustino, por sus excelentes consejos en la realización de esta tesina.

A mi maestra Cafaggi, por sus conocimientos transmitidos en las clases, por ser mi tutora en la realización de este posgrado, así como su constante apoyo para la terminación de mis estudios.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.



ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	
Introducción.....	3
Objetivos.....	6
I. METODOLOGÍA	7
II. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL RÍO DE LA SIERRA EN CONDICIONES NATURALES	
II.1. Condiciones Generales.....	10
II.2. Condiciones de Frontera y Parámetros.....	12
II.3. Modelación Matemática.....	16
II.4. Resultados Obtenidos.....	19
III. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL RÍO DE LA SIERRA EN CONJUNTO CON EL CAUCE DE ALIVIO	
III.1. Condiciones Generales.....	25
III.2. Condiciones de Frontera y Parámetros.....	27
III.3. Modelación Matemática.....	30
III.4. Resultados Obtenidos.....	38
III.5. Comparación de Resultados, entre Condiciones Naturales y Condiciones con Cauce de Alivio.....	48
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
GLOSARIO.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción

En el presente trabajo, se pretende conocer el funcionamiento hidráulico del río de la Sierra, el cual contribuyó a la inundación que se presentó en el estado de Tabasco en 2007, debido a las fuertes precipitaciones de los meses de octubre y noviembre del mismo año.

El estado de Tabasco está conformado por 17 municipios, dentro de los cuales destacan Centro, Cárdenas, Comalcalco, Huimanguillo y Macuspana como los más poblados.



Figura 1. Localización y municipios del estado de Tabasco. Fuente Internet.

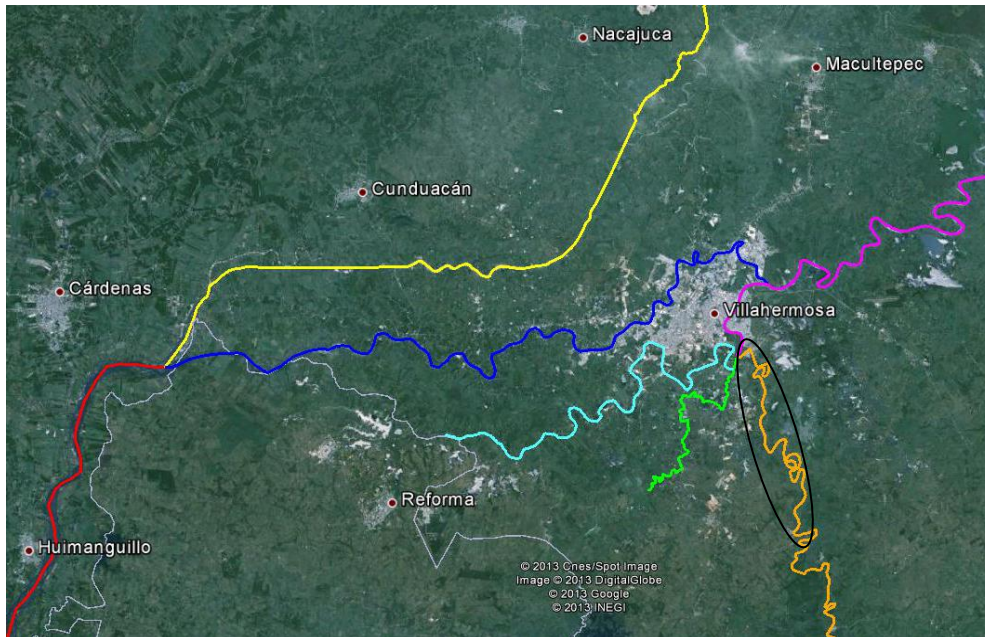
Las inundaciones de Tabasco no son actuales, ya tienen historia, a continuación se presentan algunas imágenes de las inundaciones que ha sufrido el estado.



Figura 2. Diversas inundaciones en el estado de Tabasco. Fuente II UNAM

Inundaciones en otros años: 1955, 1959, 1965, 1969, 1973, 1980, 1995

La planicie del estado de Tabasco es atravesada por varios ríos que se encuentran en constante cambio horizontal, tal es el caso del río de la Sierra, para lo cual es necesario construir obras hidráulicas que permitan mantener el cauce del río en su condición actual, como lo son: espigones, muros marginales, bordos longitudinal y perimetral, diques, escotaduras, entre otros.



- Río Samaria (Amarillo)
- Río Carrizal (Azul)
- Río Viejo Mezcalapa (Cian)
- Río de la Sierra (Naranja)
- Río Mezcalapa (Rojo)
- Río Grijalva (Rosa)
- Río Pichucalco (Verde)
- Tramo en estudio (Negro)

Figura 3. Ríos que atraviesan la capital de Tabasco. Fuente Google Earth.

A partir de 2003, se dió inicio al Proyecto Integral Contra Inundaciones, cuyas obras iban encaminadas a la protección de los habitantes y zonas productivas de la planicie tabasqueña; dicho proyecto no fue concluido, por lo que el riesgo de inundación de la población tabasqueña estuvo latente; prueba de ello, ocurrió en el año 2007, en los meses de octubre y noviembre, donde gran parte de la ciudad de Villahermosa, pueblos circunvecinos así como la mayoría de las comunidades que integran a los 17 municipios del estado, fueron afectados severamente por este fenómeno.



Figura 4. Inundación de Tabasco en 2007. Fuente Internet.



A raíz de la problemática de 2007 en Tabasco, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) decidió en conjunto con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, director conceptual del Plan Hídrico Integral de Tabasco, construir el cauce de alivio El Censo, que a manera de un vertedor lateral del río de la Sierra, comunique al río con la zona lagunar Los Zapotes, lo cual permitirá reducir niveles del agua.

Cabe destacar que hasta el 2007 el río de la Sierra no contaba con ninguna estructura de control.

Se realizarán tres diferentes análisis del río de la Sierra y el cauce de alivio El Censo, el cual se encuentra en la margen derecha del río de la Sierra a la altura del poblado El Censo; el primero será en condiciones naturales del río tal y como se presentó en 2007, el segundo será con la obra construida y el tercero será con la geometría en condiciones naturales pero con el hidrograma con el que se analizó en condiciones con obra, con el fin de comparar los resultados y así conocer los cambios en los niveles del río con y sin el cauce de alivio.

Este tipo de análisis hidráulico se requiere hacer con flujo no permanente, debido a la complejidad del río y de la cuenca que pertenece, las avenidas en el río de la Sierra son lentas tienen un cambio gradual en tiempos relativamente largos. Aunado a esto el análisis en flujo permanente no permite conocer el comportamiento del agua en el cauce de alivio.

El análisis del río de la Sierra comprenderá un tramo de 26,993.63 m. desde el pueblo el Socorro hasta la Colonia Gaviotas. En este tramo se tendrá como condiciones de frontera; aguas arriba la estación Pueblo Nuevo ubicada en el cadenamiento 21+846.80 y aguas abajo la estación Gaviotas ubicada en el cadenamiento 0+000.00, tal como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Planta del tramo en estudio, desde el pueblo El Socorro hasta la colonia Gaviotas. Fuente Google Earth.

Objetivos

General

- Elaborar el análisis de hidráulica fluvial, con el cual se puedan conocer las características hidráulicas del río de la Sierra en el tramo en estudio y del cauce de alivio.

Particulares

- Conocer el comportamiento hidráulico del río de la Sierra en condiciones naturales y trabajando en conjunto con el cauce de alivio.
- Comparativa de los perfiles hidráulicos en condiciones naturales y con el cauce de alivio.



CAPÍTULO I: METODOLOGÍA

I.1 Metodología

Para el análisis hidráulico del río de la Sierra, se empleó un programa de cálculo para obtener el perfil hidráulico del río, tanto en un solo tramo de río como en una red compleja de cauces interconectados. Este programa fue desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), que es una división del Instituto de Recursos Hídricos (IWR), del ejército de los EE.UU.

Este software permite realizar análisis unidimensional de flujo permanente, flujo no permanente y los cálculos de transporte de sedimentos.

Su procedimiento de cálculo está basado en la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción de acuerdo con la ecuación de Manning, en el caso de que el perfil de la superficie libre del agua sea rápidamente variado, el software tiene la opción de utilizar la ecuación de momentum, esta situación incluye el cálculo de flujo mixto. Los perfiles hidráulicos son calculados de una sección transversal a la siguiente, por medio de la solución de la ecuación de la energía con un procedimiento iterativo llamado método del paso estándar.

La información de entrada que requiere el modelo matemático para flujo no permanente es;

- La geometría, la cual se representa con las secciones transversales del río, así como con la configuración en planta del trazo del río.
- Condiciones de frontera, aguas arriba y aguas abajo.
- Condiciones iniciales de la simulación.
- Intervalo de tiempo de la simulación.
- Periodo de tiempo que durará la simulación.

Se aplicó el modelo matemático en condiciones naturales, para conocer el comportamiento del río de la Sierra sin ninguna obra, tal y como se presentó en las lluvias del año 2007.

Para llegar a este punto, se colocó en el programa HEC-RAS las secciones transversales del río, con el formato que requiere el programa, los parámetros de condición de frontera con los que se hizo la simulación son los siguientes:



- Aguas Arriba: Hidrograma de los datos aforados en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo, en el periodo del 23 de agosto al 22 de septiembre del 2007.
- Aguas Abajo: Limnigrama medido en la estación hidroclimatológica Gaviotas, en el mismo periodo.

Una vez con estos datos, se procederá a realizar diversas simulaciones, ajustando la rugosidad de la "n" de Manning, para asemejar los valores medidos con los resultados del programa.

El paso siguiente será realizar el modelo matemático en condiciones con obra, con lo cual se conocerá el comportamiento actual del río de la Sierra trabajando en conjunto con el cauce de alivio El Censo.

Teniendo como base el modelo matemático calibrado en condiciones naturales, se le ingresará el cauce de alivio el Censo, geoméricamente en (HEC-RAS) esto se efectuará conectando un río con las características del vertedor del Censo al río de la Sierra.

Las condiciones de frontera a utilizar en este modelo matemático serán las siguientes:

- Aguas arriba del río de la Sierra: Hidrograma de los datos aforados en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo, en el periodo del 10 al 26 de octubre del 2011.
- Aguas abajo del río de la Sierra: Limnigrama medido en la estación hidroclimatológica Gaviotas, en el mismo periodo.
- Aguas arriba del cauce de alivio el Censo: Se colocó la unión entre el río de la Sierra y este cauce.
- Aguas abajo del cauce de alivio el Censo: Se colocó un tirante normal para una pendiente $S=0.002$

Una vez con estos datos en el programa, se procederá a realizar diversas simulaciones, ajustando la rugosidad de la "n" de Manning en el cauce de alivio y el ancho del río que simula el cauce de alivio, esto debido al azolve que este presenta, como se muestra en la figura 6, esto para semejar los valores aforados con los que arroja el programa.



Figura 6. Cauce de alivio el Censo sobre la margen derecha del río de la Sierra. Fuente CONAGUA

Teniendo los dos modelos matemáticos; en condiciones naturales y en condiciones de obra, se procederá a hacer una tercera modelación matemática, la cual contemplará las siguientes características:

- La geometría, será el río de la Sierra en condiciones naturales.
- Condición de frontera aguas arriba; Hidrograma con los datos aforados en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo en el Periodo del 10 al 26 de octubre del 2011.
- Condición de frontera aguas abajo; Limnigrama con los datos medidos en la estación hidroclimatológica Gaviotas, en el mismo periodo, incrementándole 40 cm, con el fin de representar un aumento del nivel del agua al no tener el cauce de alivio.

Con esto se tendrá un punto de comparación de los perfiles de la superficie libre del agua, y así conocer el efecto que tiene El Censo sobre el río de la Sierra.

CAPÍTULO II: ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL RÍO DE LA SIERRA EN CONDICIONES NATURALES

II.1 CONDICIONES GENERALES

Una vez contando con los trabajos de topografía los cuales consistieron principalmente en realizar levantamientos topográficos y topobatimétricos del río de la Sierra del tramo en estudio, desde el pueblo el Socorro hasta la colonia Gaviotas aguas arriba de la confluencia con el río Pichucalco en el municipio de Centro estado de Tabasco.



Figura 7. Planta del río de la Sierra del tramo en estudio y distribución de las secciones transversales del río de la Sierra. Fuente Google Earth.

El tramo del río en estudio tiene un cauce de forma irregular, cuyo ancho varía entre 80 a 150 m y cuenta con una longitud de 26933.63 m.

Gráfico 1. Sección topobatimétrica del río de la Sierra, cadenamiento 26+933.63 (año de 1999).

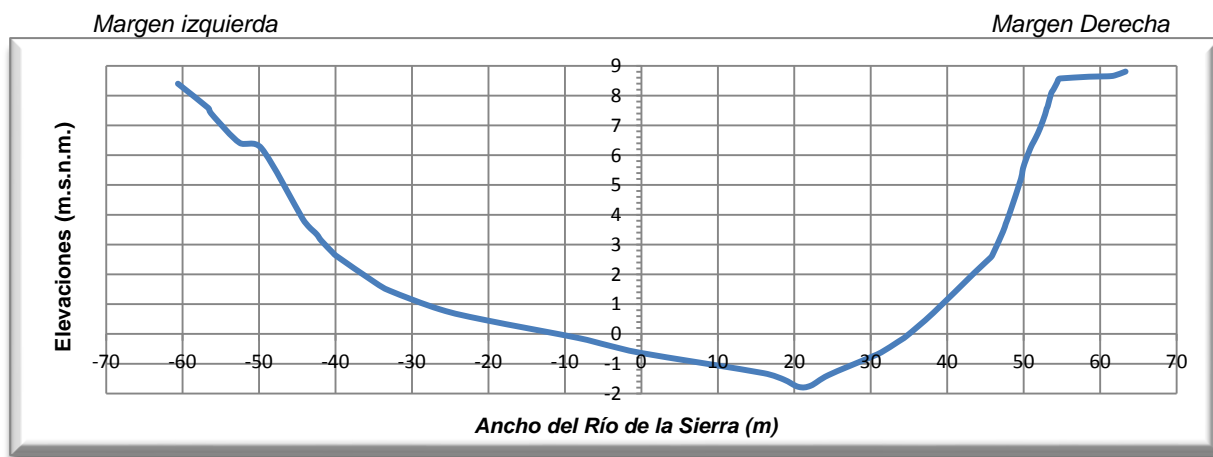
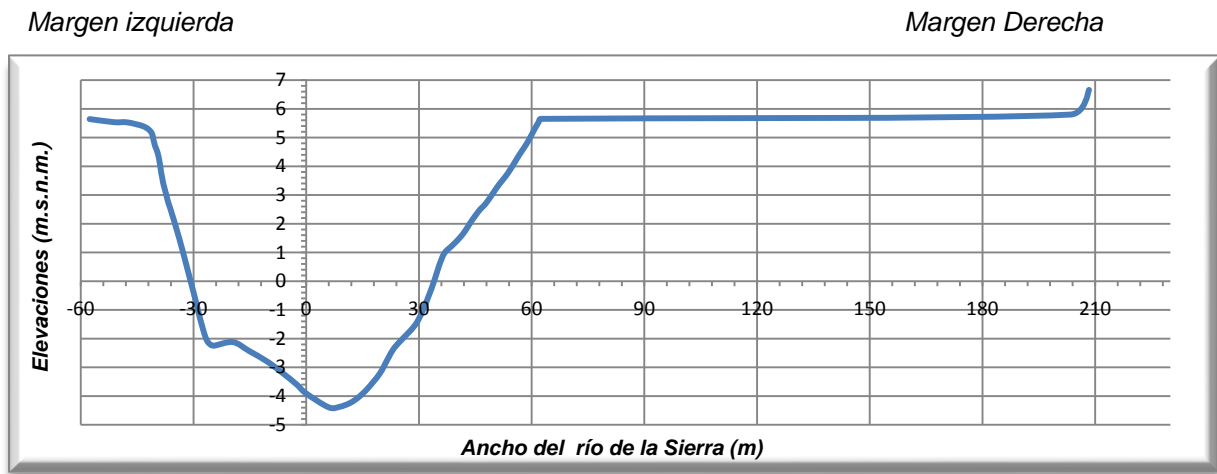


Grafico 2. Sección topobatimétrica del río de la Sierra, cadenamiento 7+752.22 (año de 1999).



En el sentido vertical también existe variación, ya que aguas arriba en la sección 26+933.63 se tiene una elevación de -1.78 m.s.n.m. del fondo del cauce y aguas abajo en la sección 0+000 la elevación del fondo del cauce es de -4.53 m.s.n.m., habiendo un desnivel de 2.75 m., lo que correspondería a un desnivel de aproximadamente 10 cm/km, con dicho parámetro podemos saber que se trata de un río en régimen subcrítico.

La información hidrológica con la cual se realizó la modelación en flujo no permanente, se obtuvo de las estaciones hidroclimatológicas Pueblo Nuevo y Gaviotas las cuales se ubican, en la margen derecha del río de la Sierra en Pueblo Nuevo de las Raíces y sobre la margen izquierda del río Grijalva a la altura del puente Majahua, respectivamente, ambas en la región hidrológica 30.- Grijalva-Usumacinta. El periodo de datos con el que se cuenta es del 23 de agosto al 22 de septiembre del 2007. Dicha información fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).



Figura 8. Estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.



Figura 9. Estación hidroclimatológica Gaviotas.

II.2 CONDICIONES DE FRONTERA Y PARÁMETROS UTILIZADOS

Las condiciones de frontera utilizadas en la modelación matemática del tramo en estudio, son los aforos realizados en las estaciones hidroclimatológicas Pueblo Nuevo y Gaviotas, en el periodo del 23 de agosto al 22 de septiembre del 2007, periodo en el cual se eliminaron los valores que se sospechara fueran erróneos, debido a que mostraban una gran diferencia con los demás datos.

Para realizar la modelación matemática en flujo no permanente, se integraron al modelo los diferentes valores aforados en los tiempos correspondientes.

- Aguas arriba se colocó el siguiente hidrograma:

Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elevación Pueblo Nuevo	Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elevación Pueblo Nuevo
Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)
1	23/08/2007	115.00	3.52	15	09/09/2007	568.00	6.75
2	24/08/2007	131.00	3.54	16	10/09/2007	453.00	6.26
3	25/08/2007	136.00	3.59	17	11/09/2007	543.00	6.75
4	26/08/2007	163.00	3.86	18	12/09/2007	471.00	6.38
5	27/08/2007	382.00	5.66	19	13/09/2007	457.00	6.35
6	31/08/2007	664.00	6.98	20	14/09/2007	406.00	6.08
7	01/09/2007	674.00	7.08	21	15/09/2007	357.00	5.59
8	02/09/2007	606.00	6.40	22	16/09/2007	320.00	5.22
9	03/09/2007	386.00	5.84	23	17/09/2007	231.00	4.98
10	04/09/2007	336.00	5.33	24	18/09/2007	263.00	4.97
11	05/09/2007	316.00	5.37	25	19/09/2007	232.00	4.76
12	06/09/2007	241.00	4.82	26	20/09/2007	202.00	4.50
13	07/09/2007	420.00	5.89	27	21/09/2007	182.00	4.40
14	08/09/2007	439.00	6.08	28	22/09/2007	179.00	4.34

Tabla 1. Valores del hidrograma aforado, el cual se ingresó en la condición de frontera aguas arriba.

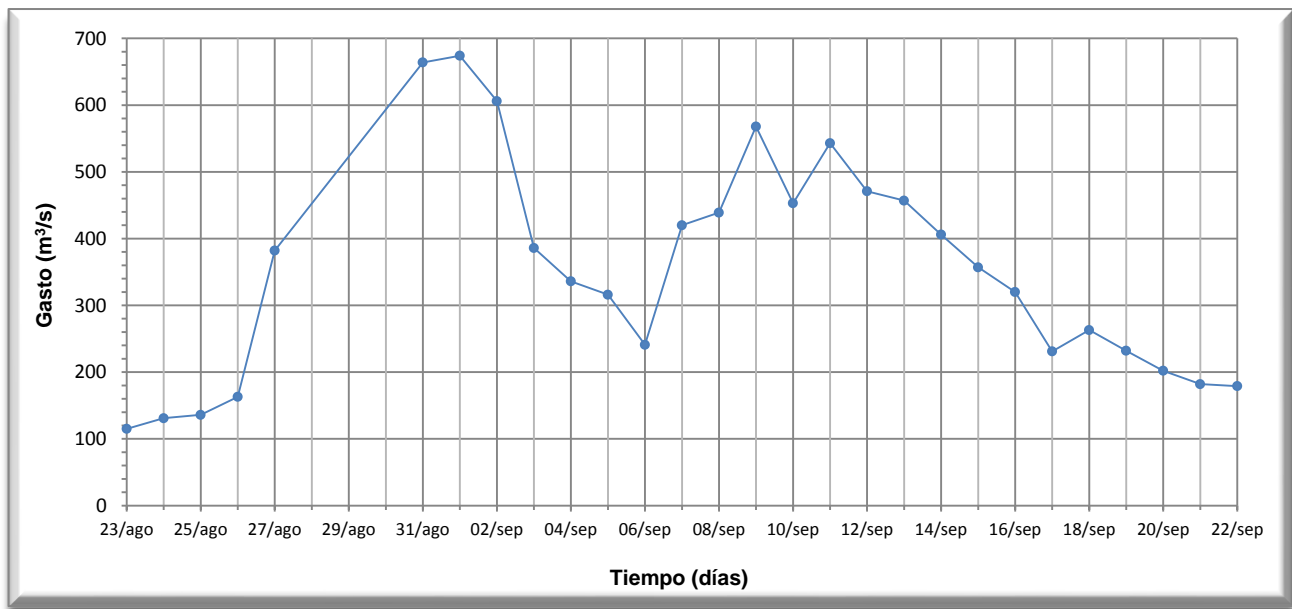


Gráfico 3. Hidrograma aforado que se colocó como condición de frontera aguas arriba del río de la Sierra.

- Aguas abajo se colocó el siguiente limnigrama

Nota: Como condición de frontera aguas abajo, se colocó un limnigrama de los datos medidos en la estación de Gaviotas, en el periodo del 23 de agosto al 22 de septiembre de 2007.

Día	Fecha	Elevación Gaviotas	Día	Fecha	Elevación Gaviotas
Num	(día)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m.s.n.m.)
1	23/08/2007	2.58	15	09/09/2007	4.27
2	24/08/2007	2.48	16	10/09/2007	4.11
3	25/08/2007	2.52	17	11/09/2007	4.16
4	26/08/2007	2.66	18	12/09/2007	4.28
5	27/08/2007	3.22	19	13/09/2007	4.28
6	31/08/2007	3.84	20	14/09/2007	4.28
7	01/09/2007	4.32	21	15/09/2007	4.24
8	02/09/2007	4.07	22	16/09/2007	4.00
9	03/09/2007	3.86	23	17/09/2007	3.81
10	04/09/2007	3.45	24	18/09/2007	3.57
11	05/09/2007	3.55	25	19/09/2007	3.73
12	06/09/2007	3.40	26	20/09/2007	3.50
13	07/09/2007	3.66	27	21/09/2007	3.42
14	08/09/2007	3.90	28	22/09/2007	3.35

Tabla 2. Elevaciones medidas en la estación Gaviotas.

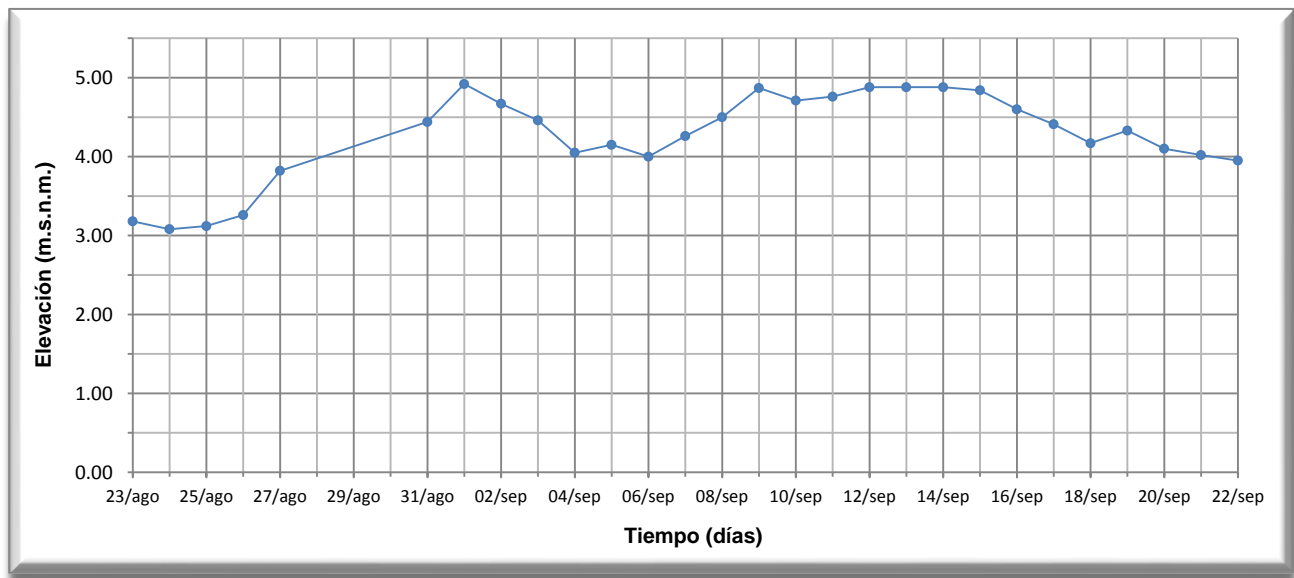


Gráfico 4. Limnigrama medido en la estación Gaviotas.

Se realizaron diversas simulaciones, ya que no se lograba calibrar el modelo matemático con resultados aceptables, por lo que se intentó variar diversos parámetros como son; el intervalo de tiempo de cálculo, la interpolación de las secciones y el periodo del hidrograma, sin embargo no se logró tener éxito.

Finalmente se propuso dejar todos los datos como se tenían en un inicio y los datos medidos en Gaviotas incrementarles 60 cm, con lo cual el modelo se calibró dando resultados aceptables como se muestran más adelante.



Finalmente el limnigrama que se ingresó como condición de frontera aguas abajo es el siguiente:

Día	Fecha	Elevación Gaviotas	Día	Fecha	Elevación Gaviotas
Num	(día)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m.s.n.m.)
1	23/08/2007	3.18	15	09/09/2007	4.87
2	24/08/2007	3.08	16	10/09/2007	4.71
3	25/08/2007	3.12	17	11/09/2007	4.76
4	26/08/2007	3.26	18	12/09/2007	4.88
5	27/08/2007	3.82	19	13/09/2007	4.88
6	31/08/2007	4.44	20	14/09/2007	4.88
7	01/09/2007	4.92	21	15/09/2007	4.84
8	02/09/2007	4.67	22	16/09/2007	4.60
9	03/09/2007	4.46	23	17/09/2007	4.41
10	04/09/2007	4.05	24	18/09/2007	4.17
11	05/09/2007	4.15	25	19/09/2007	4.33
12	06/09/2007	4.00	26	20/09/2007	4.10
13	07/09/2007	4.26	27	21/09/2007	4.02
14	08/09/2007	4.50	28	22/09/2007	3.95

Tabla 3. Valores del limnigrama que se ingresó en la condición de frontera aguas abajo, en el cual se le sumaron 60 cm a las elevaciones medidas en la estación de Gaviotas.

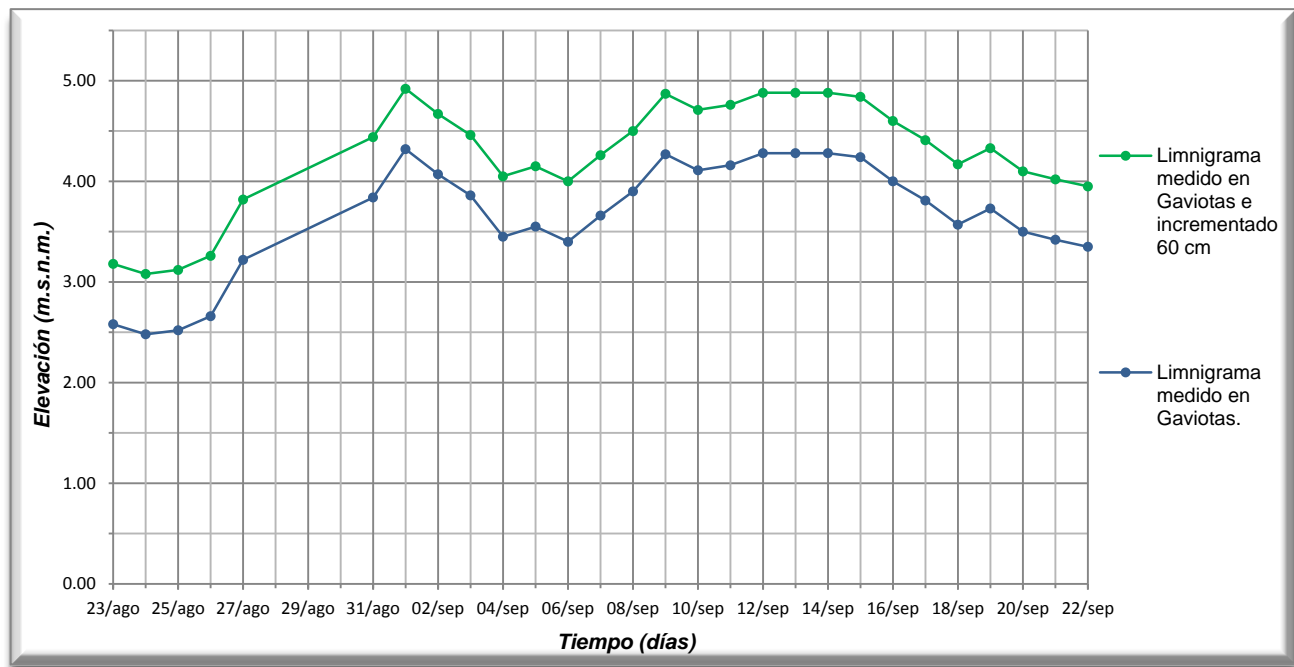


Gráfico 5. Limnigrama colocado como condición de frontera aguas abajo del río de la Sierra.

Las condiciones de frontera se especificaron en el programa como flujo no permanente, los cuales quedaron de la siguiente manera:

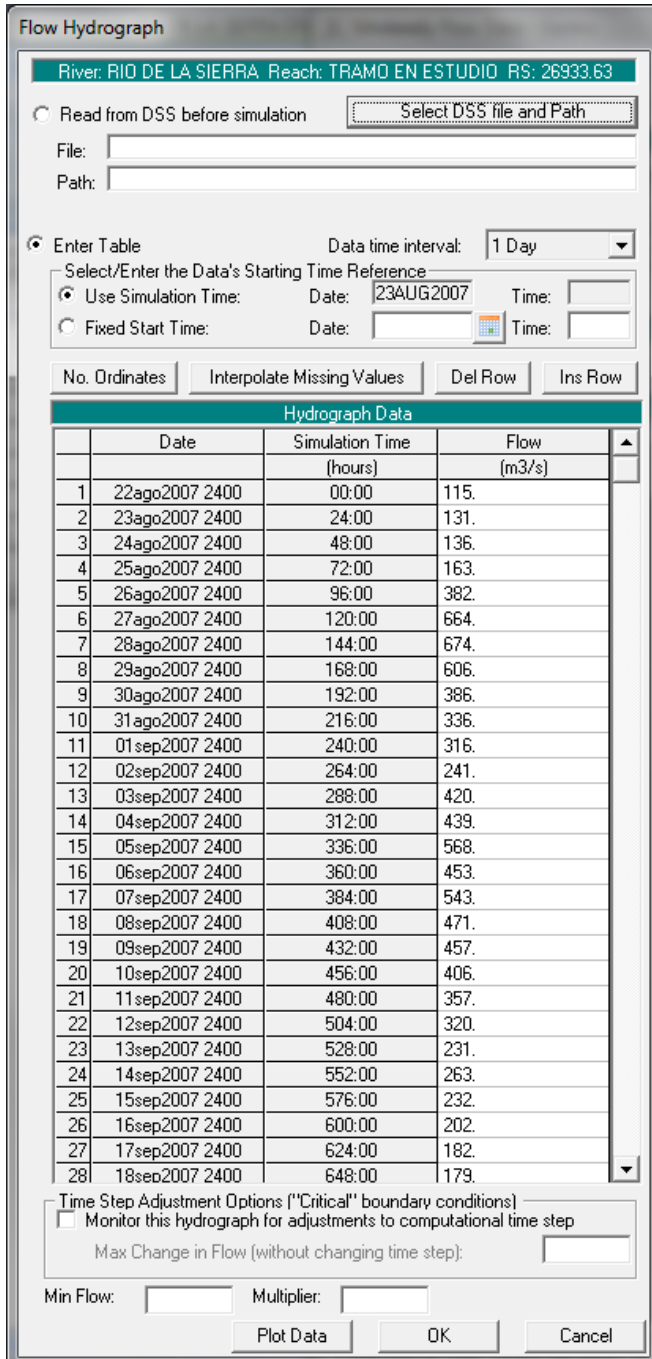


Figura 10. Condición de Frontera Aguas Arriba (HEC-RAS)

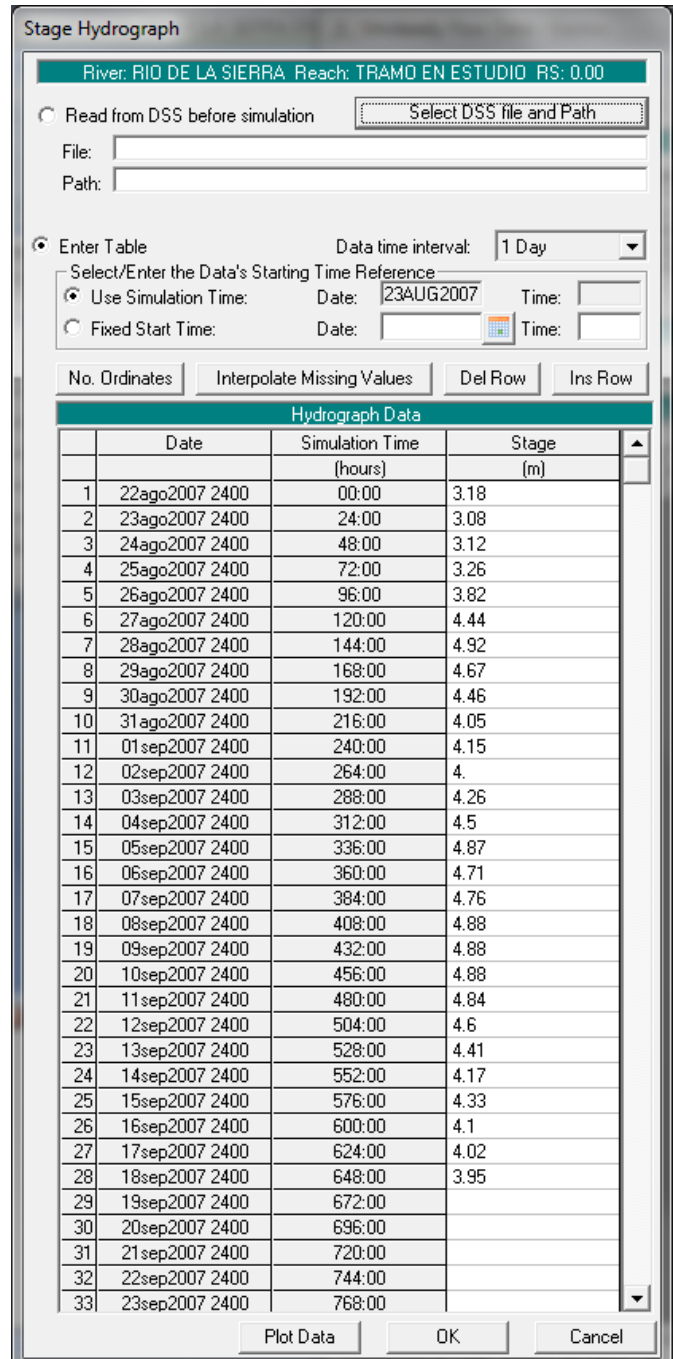


Figura 11. Condición de Frontera Aguas Abajo (HEC-RAS)



II.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Con base en las secciones topobatemétricas del cauce del río de la Sierra y las condiciones de frontera obtenidas de las estaciones hidroclimatológicas, se procedió a realizar la modelación matemática con flujo no permanente.

Para calibrar el modelo matemático en condiciones naturales, se compararon las elevaciones que arroja el modelo y las medidas en la estación hidroclimatológica de Pueblo Nuevo. La calibración se llevó a cabo mediante la variación de la rugosidad y de las elevaciones medidas en Gaviotas, dando un valor ajustado de "n" variable entre 0.032 en las márgenes y 0.0305 en el cauce principal, así también se encontró con las diversas simulaciones realizadas, que para poder llegar a los valores que están pasando físicamente, es necesario subir las elevaciones medidas en Gaviotas aproximadamente 60 cm.

Los tiempos e intervalos de la simulación son los siguientes:

El periodo de la modelación, está en función del hidrograma registrado, para este caso el periodo es del 23 de agosto al 22 de septiembre del 2007, del cual se eliminaron algunos días debido a que se encontraron datos incongruentes en los días 28, 29 y 30 de agosto, para fines de ingresar los datos al programa (HEC-RAS) quedaría el periodo del 23 de agosto al 19 de septiembre del 2007, lo cual no altera ningún resultado.

El intervalo de tiempo utilizado para que el modelo matemático realice los cálculos es de 30 minutos, con un intervalo de tiempo menor podremos conocer un poco más a detalle el comportamiento del perfil hidráulico sin embargo la simulación matemática llega a ser muy tardada.

Dichos datos se ingresan en el programa tal como se muestra en la figura 12:

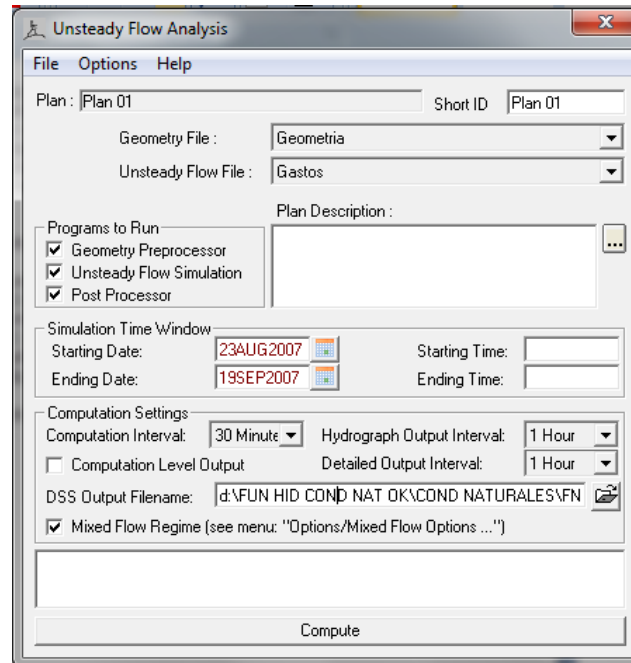


Figura 12. Datos para el análisis del flujo no permanente.

Con estos datos, se realizaron las diversas simulaciones en la que se fueron ajustando los factores como son la rugosidad (n) y la variación de las elevaciones de Gaviotas. Llegando así a los siguientes resultados.

Los resultados obtenidos de la calibración son los siguientes:

Fecha (día)	Datos Medidos		Resultados Modelo	
	Gasto en Pueblo Nuevo (m^3/s)	Elevación en Pueblo Nuevo (m.s.n.m.)	Gasto en Pueblo Nuevo (m^3/s)	Elevación en Pueblo Nuevo (m.s.n.m.)
23/08/2007	115.00	3.52	115.63	3.50
24/08/2007	131.00	3.54	131.13	3.51
25/08/2007	136.00	3.59	136.42	3.57
26/08/2007	163.00	3.86	167.57	3.83
27/08/2007	382.00	5.66	384.75	5.32
31/08/2007	664.00	6.98	658.31	6.94
01/09/2007	674.00	7.08	671.07	7.22
02/09/2007	606.00	6.40	601.65	6.82
03/09/2007	386.00	5.84	388.40	5.72
04/09/2007	336.00	5.33	337.04	5.24
05/09/2007	316.00	5.37	314.10	5.17
06/09/2007	241.00	4.82	247.14	4.75
07/09/2007	420.00	5.89	417.24	5.72
08/09/2007	439.00	6.08	441.70	5.96
09/09/2007	568.00	6.75	562.15	6.68
10/09/2007	453.00	6.26	457.43	6.15
11/09/2007	543.00	6.75	539.53	6.53
12/09/2007	471.00	6.38	471.33	6.29
13/09/2007	457.00	6.35	455.75	6.22
14/09/2007	406.00	6.08	405.28	6.01
15/09/2007	357.00	5.59	356.79	5.78
16/09/2007	320.00	5.22	318.69	5.47
17/09/2007	231.00	4.98	233.61	4.97
18/09/2007	263.00	4.97	262.24	4.94
19/09/2007	232.00	4.76	231.26	4.90
20/09/2007	202.00	4.50	202.51	4.61
21/09/2007	182.00	4.40	182.43	4.46

Tabla 4. Resultados de la calibración del modelo, con una "n" variable de 0.032 en las márgenes y 0.0305 en el cauce principal y subiendo los datos medidos de Gaviotas en 60 cm.

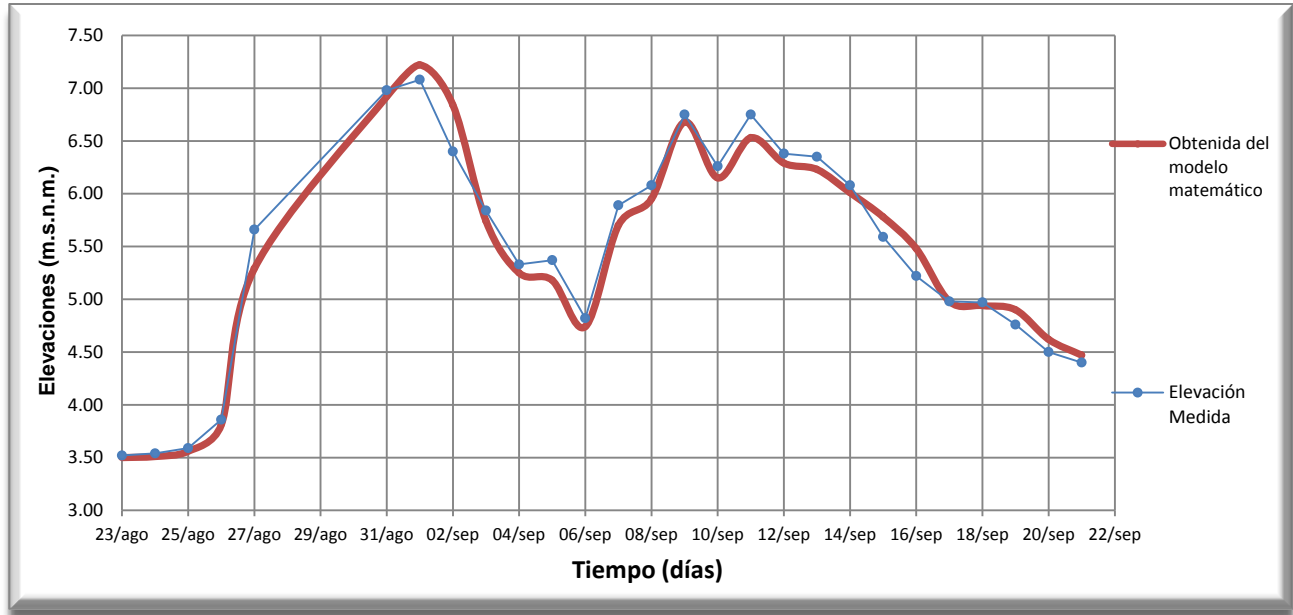


Gráfico 6. Comparación de curvas entre los datos aforados y los resultados del modelo en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

Como se puede ver en la tabla y grafica anterior la calibración es buena ya que en la mayoría de los casos se tiene un error de niveles menor al 5%.

II.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Como resultado de la simulación en el modelo matemático realizado en el programa HEC-RAS, podemos obtener tablas con los resultados, así como el perfil longitudinal y las secciones transversales del tramo del río en estudio.

A continuación se presentan tablas, perfil longitudinal y las secciones trasversales del río para diferentes gastos aforados en la estación Pueblo Nuevo, los cuales son resultado de la simulación.

Resultados del modelo matemático en condiciones naturales para un gasto de 200.46 m³/s.

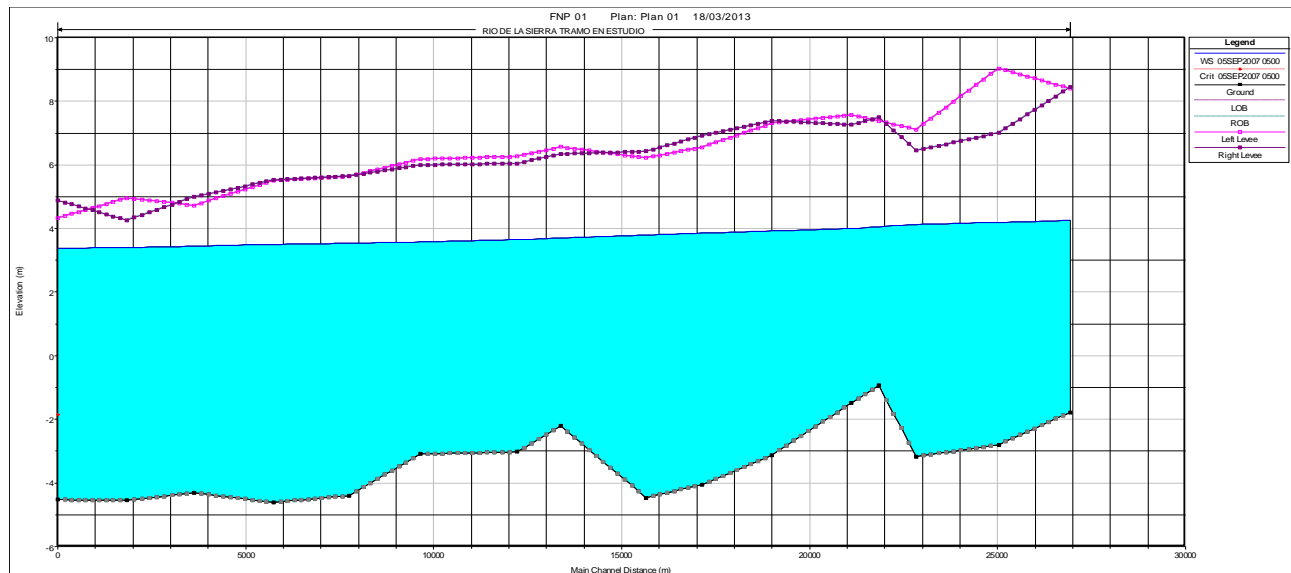
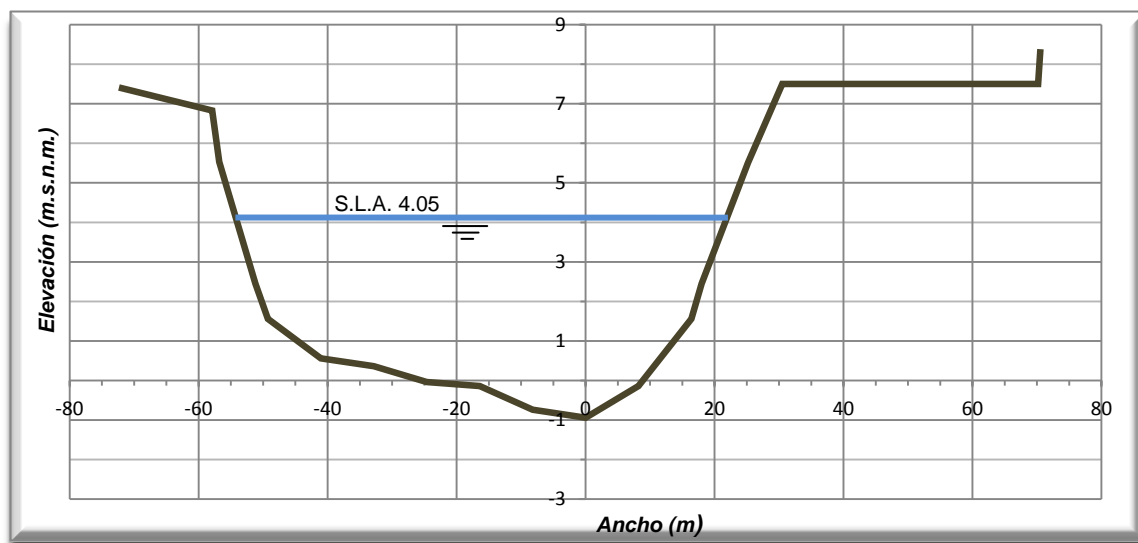
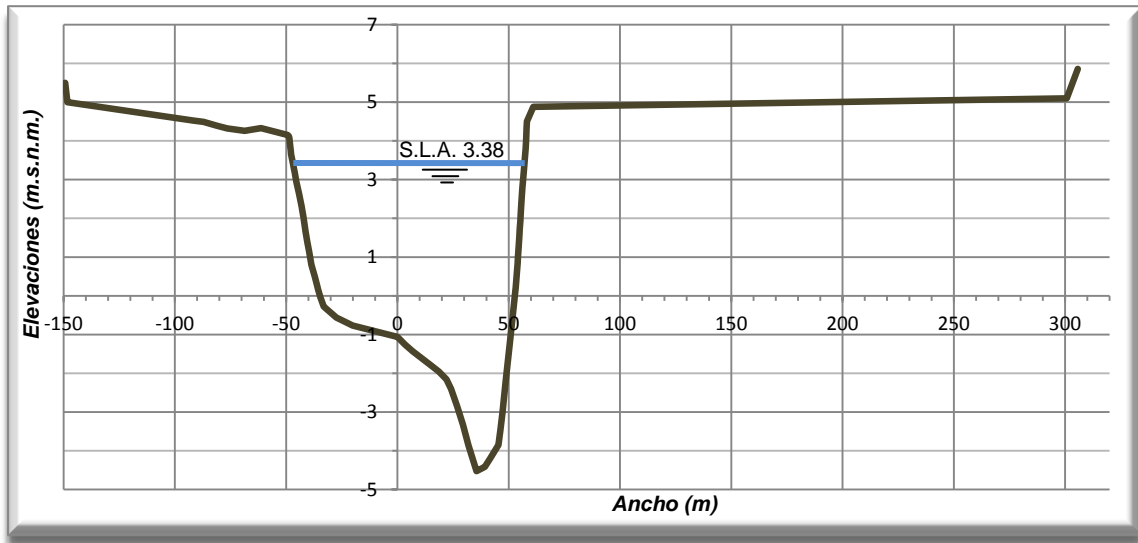


Gráfico 7. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de 200.46 m³/s en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.





Gráficos 8 y 9. Secciones transversales en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de $200.46 \text{ m}^3/\text{s}$.

Resultados del modelo matemático en condiciones naturales para un gasto de $407.63 \text{ m}^3/\text{s}$.

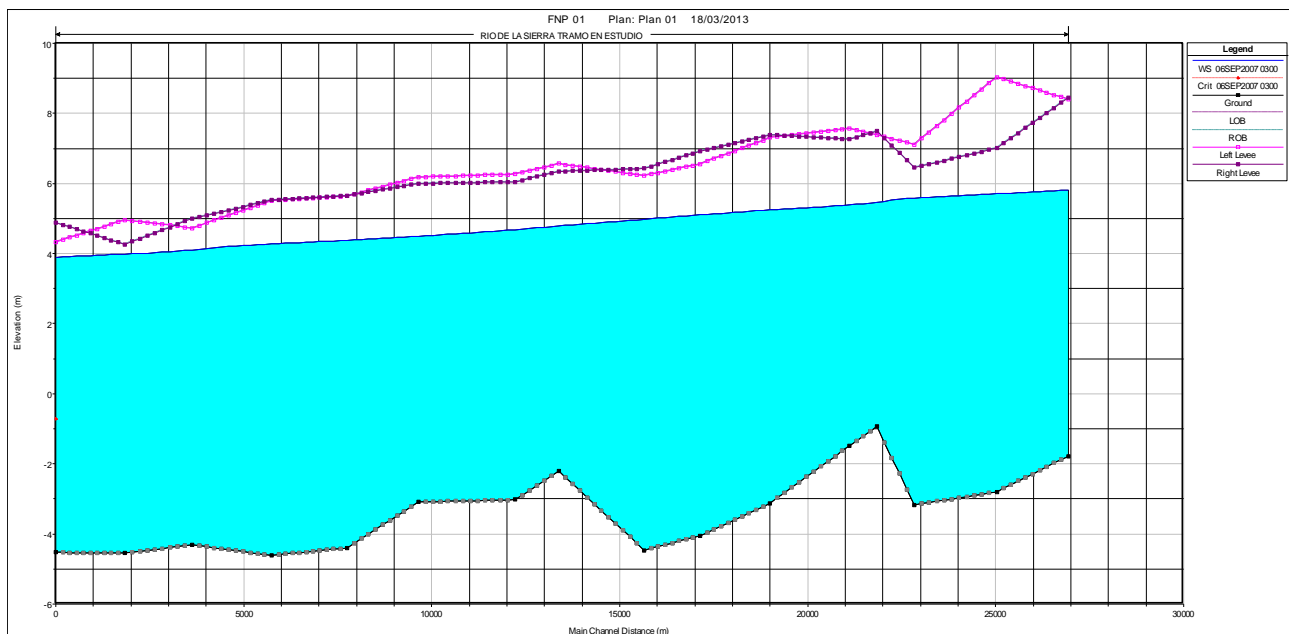
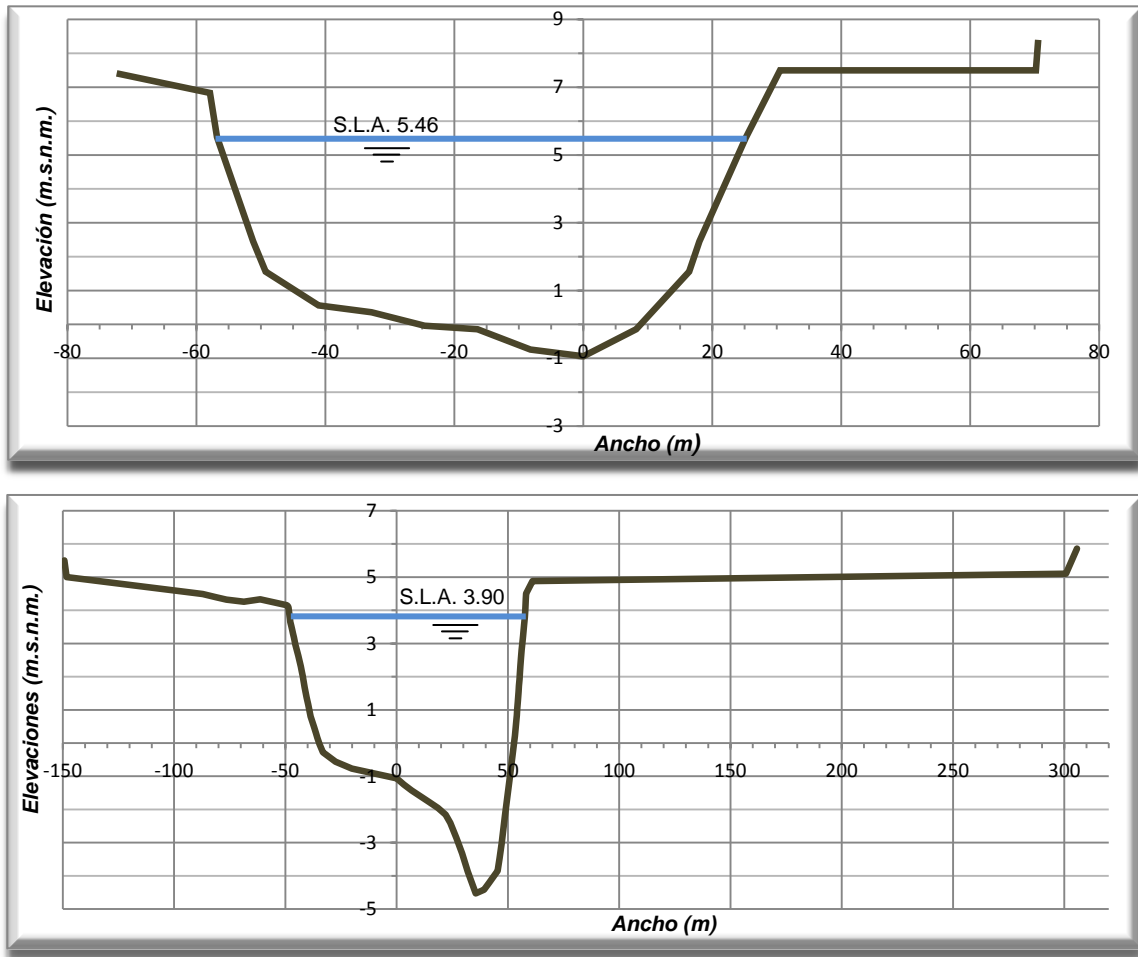


Gráfico 10. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de $407.63 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación hidroclimatólogica Pueblo Nuevo.



Gráficos 11 y 12. Secciones transversales en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de $407.63 \text{ m}^3/\text{s}$.

Resultados del modelo matemático en condiciones naturales para un gasto de $670.96 \text{ m}^3/\text{s}$.

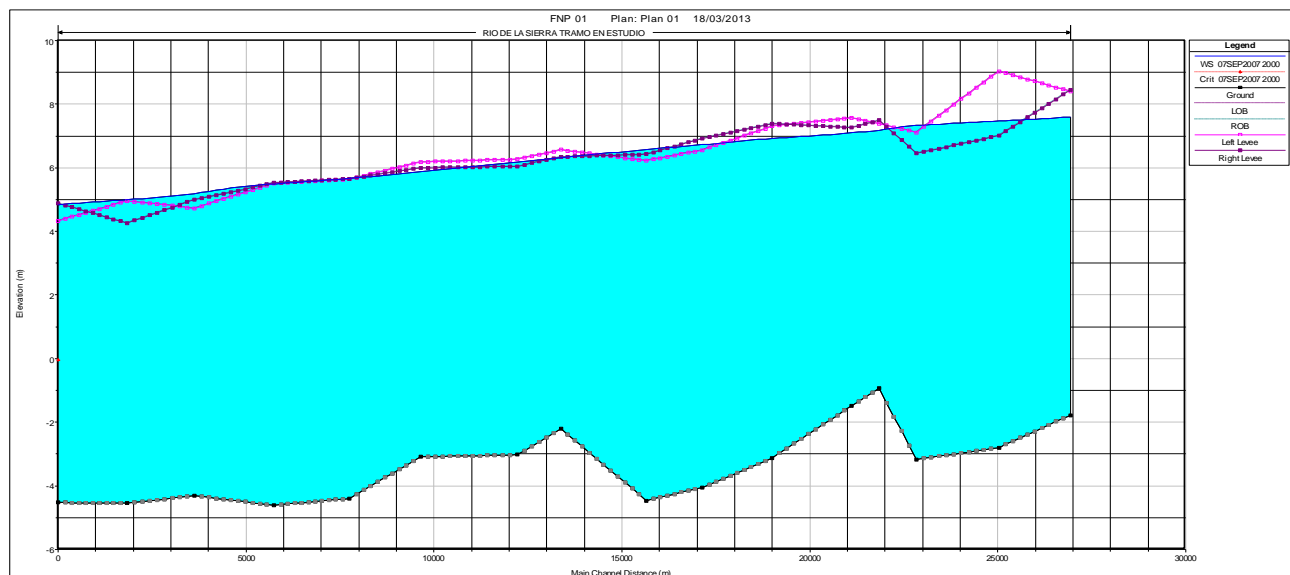


Gráfico 13. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de $670.96 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

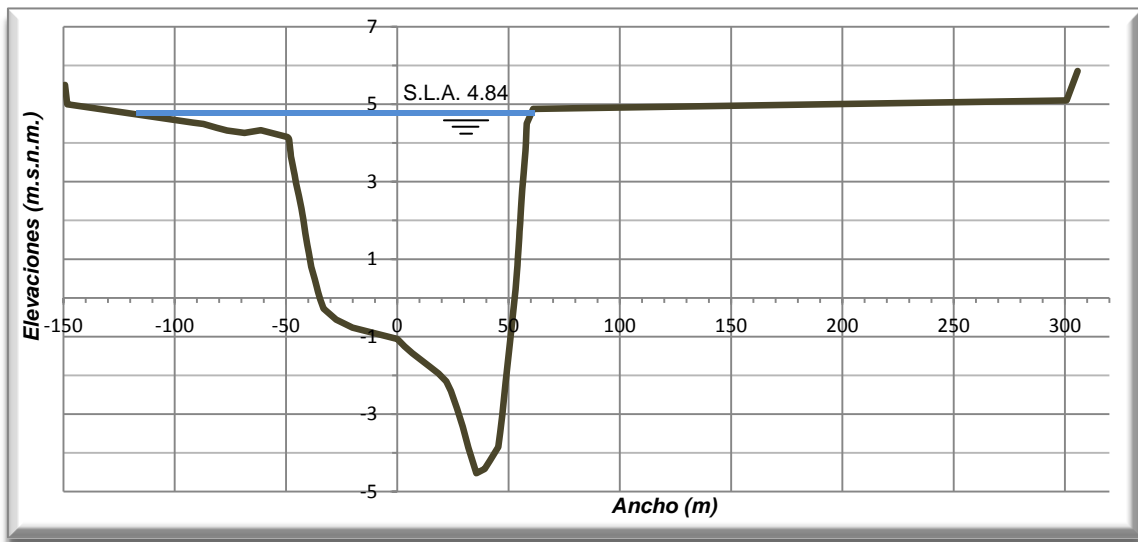
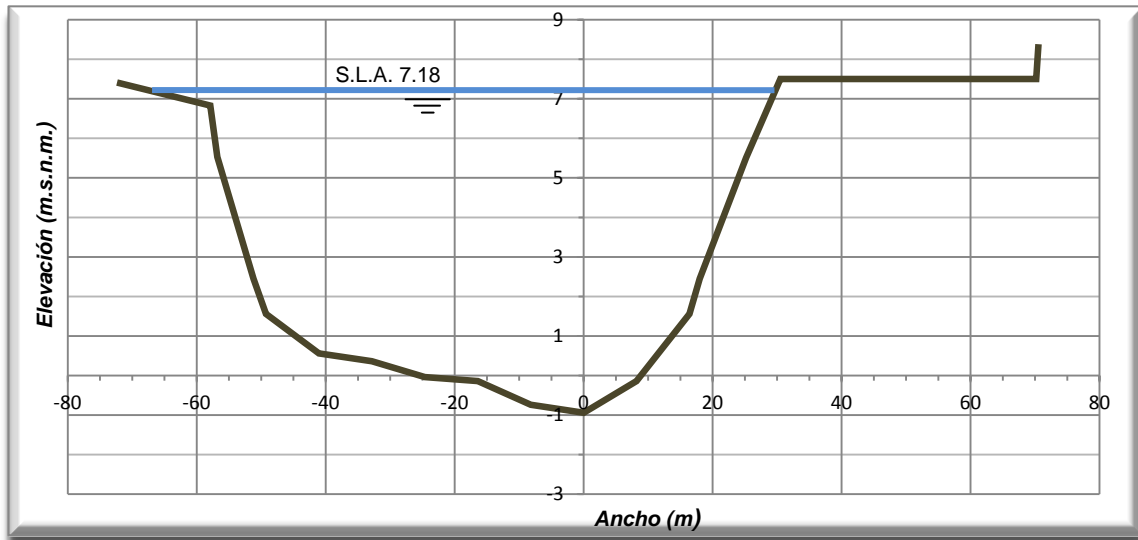


Gráfico 14 y 15. Secciones transversales en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de $670.96 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las figuras anteriores:

WS = Superficie libre del agua producido por el perfil correspondiente.

Ground = Fondo del cauce.

LOB = Margen Izquierda del río.

ROB = Margen Derecha del río.



Tabla 5. Resumen de las características hidráulicas del río de Sierra en el tramo Pueblo El Socorro- Colonia Gaviotas, correspondientes a un gasto de 200.46 m³/s aforado en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total	Elev. mínima del Canal	Elevación del Agua	Tirante Máximo	Velocidad	Área Hidráulica	Pendiente del Fondo	Número de Froude
	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m/m)	
26+933.63	208.63	-1.78	4.26	6.04	0.56	371.59	0.000048	0.09
25+026.27	205.32	-2.8	4.19	6.99	0.48	426.75	0.000026	0.07
22+829.54	201.85	-3.17	4.13	7.3	0.51	397.4	0.000036	0.07
21+846.80	200.46	-0.94	4.05	4.99	0.73	274.87	0.000093	0.12
21+116.15	199.44	-1.48	4	5.48	0.58	344.4	0.000052	0.09
18+999.55	196.47	-3.12	3.93	7.05	0.47	421.17	0.000027	0.07
17+135.79	194.26	-4.04	3.86	7.9	0.51	381.21	0.00003	0.07
15+649.13	192.56	-4.46	3.79	8.25	0.55	352.4	0.000043	0.09
13+373.42	190.03	-2.2	3.7	5.9	0.51	372.44	0.000038	0.08
12+214.62	188.86	-3.02	3.65	6.67	0.5	378.06	0.000028	0.07
9+642.83	186.31	-3.09	3.58	6.67	0.44	420.62	0.000026	0.07
7+752.22	184.52	-4.39	3.54	7.93	0.41	453.27	0.000019	0.06
5+747.83	182.82	-4.61	3.5	8.11	0.37	494.91	0.000015	0.05
3+635.27	181.35	-4.31	3.44	7.75	0.53	343.5	0.000033	0.08
1+840.01	180.25	-4.54	3.4	7.94	0.39	466.92	0.000015	0.05
0+000	179.03	-4.53	3.38	7.91	0.37	486.55		0.05

Tabla 6. Resumen de las características hidráulicas del río de Sierra, en el tramo Pueblo El Socorro- Colonia Gaviotas, correspondientes a un gasto de 407.63 m³/s aforado en la estación climatológica de Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total	Elev. mínima del Canal	Elevación del Agua	Tirante Máximo	Velocidad	Área Hidráulica	Pendiente del Fondo	Número de Froude
	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m/m)	
26+933.63	417.25	-1.78	5.81	7.59	0.8	521.13	0.000068	0.11
25+026.27	413.41	-2.8	5.71	8.51	0.74	561.53	0.000046	0.1
22+829.54	409.32	-3.17	5.59	8.76	0.78	523.1	0.000063	0.1
21+846.80	407.63	-0.94	5.46	6.4	1.06	385.97	0.000137	0.16
21+116.15	406.38	-1.48	5.39	6.87	0.86	471.26	0.000084	0.12
18+999.55	402.7	-3.12	5.25	8.37	0.75	534.43	0.000054	0.1
17+135.79	399.94	-4.04	5.11	9.15	0.84	473.94	0.000066	0.11
15+649.13	397.76	-4.46	4.98	9.44	0.87	457.57	0.000087	0.12
13+373.42	394.41	-2.2	4.79	6.99	0.84	468.86	0.000081	0.12
12+214.62	392.81	-3.02	4.68	7.7	0.86	457.18	0.00008	0.12
9+642.83	389.3	-3.09	4.49	7.58	0.76	511.05	0.000065	0.11
7+752.22	386.87	-4.39	4.38	8.77	0.73	532.28	0.000053	0.1
5+747.83	384.54	-4.61	4.28	8.89	0.68	566.59	0.000044	0.09
3+635.27	382.6	-4.31	4.1	8.41	0.97	393.03	0.0001	0.14
1+840.01	381.23	-4.54	3.98	8.52	0.73	520.46	0.00005	0.1
0+000	379.78	-4.53	3.9	8.43	0.7	541.21		0.1



Tabla 7. Resumen de las características hidráulicas del río de Sierra, en el tramo Pueblo El Socorro- Colonia Gaviotas, correspondientes a un gasto de 670.96 m³/s aforado en la estación climatológica de Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total	Elev. mínima del Canal	Elevación del Agua	Tirante Máximo	Velocidad	Área Hidráulica	Pendiente del Fondo	Número de Froude
	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m/m)	
26+933.63	672.33	-1.78	7.6	9.38	0.95	707.93	0.000074	0.12
25+026.27	671.86	-2.8	7.47	10.27	0.92	729.64	0.000055	0.11
22+829.54	671.24	-3.17	7.33	10.5	0.96	695.91	0.000075	0.12
21+846.80	670.96	-0.94	7.18	8.12	1.26	533.44	0.000156	0.17
21+116.15	670.75	-1.48	7.11	8.59	1.04	642.24	0.000105	0.14
18+999.55	670.13	-3.12	6.92	10.04	0.98	685.88	0.000071	0.12
17+135.79	669.66	-4.04	6.73	10.77	1.11	600.87	0.000092	0.13
15+649.13	669.2	-4.46	6.57	11.03	1.1	611.11	0.000107	0.14
13+373.42	668.32	-2.2	6.32	8.52	1.09	611.46	0.000112	0.14
12+214.62	667.78	-3.02	6.17	9.19	1.1	606.38	0.000126	0.15
9+642.83	666.34	-3.09	5.87	8.96	1.01	660.59	0.000115	0.14
7+752.22	665.33	-4.39	5.67	10.06	1	664.12	0.0001	0.14
5+747.83	664.33	-4.61	5.49	10.1	0.97	684.46	0.000076	0.12
3+635.27	663.09	-4.31	5.19	9.5	1.34	494.96	0.000173	0.19
1+840.01	661.82	-4.54	5	9.54	1.03	641.69	0.000087	0.13
0+000	660.02	-4.53	4.84	9.37	0.98	670.2		0.14

Conclusiones del Modelo Matemático en Condiciones Naturales.

Para conocer el comportamiento hidráulico del río de la Sierra, se utilizó un modelo matemático especializado en ríos. La modelación se llevó a cabo con flujo no permanente y régimen subcrítico.

Se llegó a realizar la modelación matemática, consiguiendo calibrar el modelo matemático hasta un punto en que para la mayoría de los gastos, la comparación de las elevaciones tanto medidas como calculadas no varían en más de un 5 %.

Para llegar a esta calibración fue necesario subir las elevaciones medidas en la estación Gaviotas incrementándole 60 cm.

El coeficiente de rugosidad "n" de Manning se consideró variable, con un valor de 0.032 en las márgenes y 0.0305 en el cauce principal, estos valores surgieron de la calibración.

Las velocidades que se presentan en el río son menores a 1.35 m/s, esto para los gastos modelados. Los números de Froude son menores a 1, con lo cual se corroboró que el régimen del río es subcrítico.

En la simulación realizada para condiciones naturales, se encontró que el gasto máximo que puede pasar por la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo sin que desborde en ningún punto del tramo en estudio del río de la Sierra es de 525.19 m³/s.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL RÍO DE LA SIERRA EN CONJUNTO CON EL CAUCE DE ALIVIO

III.1 CONDICIONES GENERALES

Una vez contando con los trabajos de topografía, los cuales consistieron principalmente en realizar levantamientos topográficos y topobtimétricos del río de la Sierra del tramo en estudio, desde el pueblo el Socorro hasta la colonia Gaviotas aguas arriba de la confluencia con el río Pichucalco en el municipio de Centro estado de Tabasco, así como contar con las secciones transversales de construcción del cauce de alivio El Censo, estas proporcionadas por la CONAGUA.



Figura 13. Planta del río de la Sierra del tramo en estudio, donde se presenta la ubicación de; estaciones hidroclimatológicas, estructura del cauce de alivio El Censo y en color rojo la carretera Torno Largo-El Censo. Fuente Google Earth.

El tramo del río en estudio tiene un cauce de forma irregular, cuyo ancho varía entre 83 a 143 m y tiene una longitud de 26933.63 m.

Tiempo atrás el río de la Sierra se comunicaba naturalmente con la laguna Zapotes, con esto, el río al llevar un gasto excedente lo vertía a la laguna Zapotes, en donde el agua se infiltraba, evaporaba o regresaba al río una vez que bajaran los niveles de este.

Con el paso de los años el hombre creó infraestructura para comunicarse, lo cual involucró la construcción de carreteras, una de ellas es Torno Largo - El Censo sobre la margen derecha del río de la Sierra, lo cual provocó que se rompiera el ciclo natural de comunicación del río de la Sierra hacia la laguna Zapotes.

Por lo cual la CONAGUA tomó la decisión de construir diversos cauces de alivio sobre el río de la Sierra entre ellos El Censo, con el fin de regresar al río su ciclo natural.

El cauce de alivio El Censo, se localiza en la margen derecha del río de la Sierra, a la altura del poblado El Censo, en las coordenadas (Latitud 17°53'7.20"N, Longitud 92°52'6.57"O), cuenta con un ancho de plantilla de 200 m. y la elevación de entrada se encuentra en la cota 5.32 m.s.n.m.

El cauce de alivio cuenta con una pendiente $S = 0.002$, y este se comunica con el dren Juan Gil, mismo que descarga a la laguna Zapotes.

En el modelo matemático se consideró el cauce de alivio con una longitud de 400 m.

A continuación se presenta el antes y después de la construcción del cauce de alivio El Censo.



Figura 14. Río de la Sierra sin Cauce de Alivio

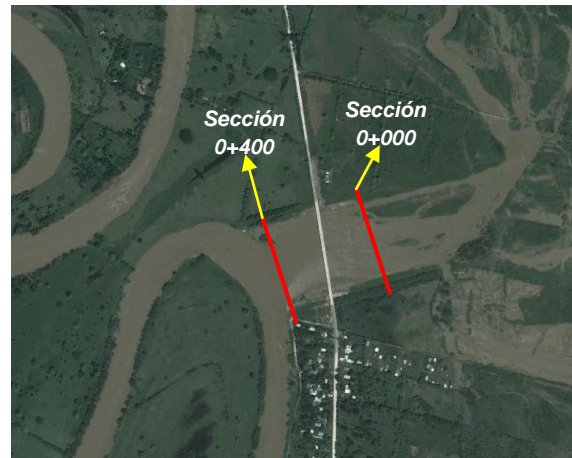
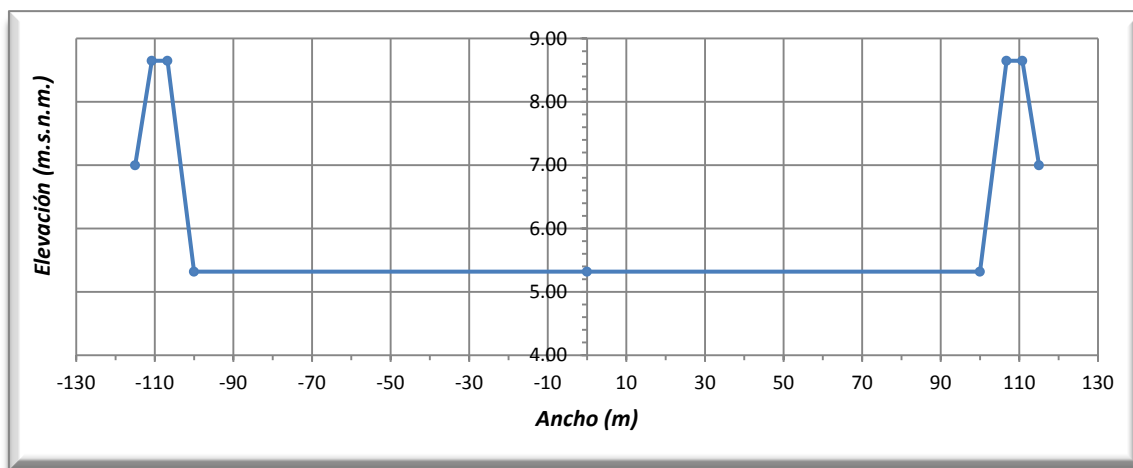


Figura 15. Río de la Sierra con Cauce de Alivio

Gráfico 16. Sección topobatimétrica del cauce de alivio El Censo, cadenamiento 0+400, (año 2010).



La información hidrológica con la cual se realizó la modelación en flujo no permanente, se obtuvo de las estaciones hidroclimatológicas Pueblo Nuevo y Gaviotas las cuales se ubican, en la margen derecha del río de la Sierra en Pueblo Nuevo de las Raíces y sobre la margen izquierda del río Grijalva a la altura del puente Majahua, respectivamente, ambas en la región hidrológica 30.-Grijalva-Usumacinta. El periodo de datos con el que se cuenta es del 10 al 26 de octubre del 2011.



Figura 16. Estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.



Figura 17. Estación hidroclimatológica Gaviotas.

III.2 CONDICIONES DE FRONTERA Y PARÁMETROS UTILIZADOS.

Las condiciones de frontera utilizadas en la modelación matemática del tramo en estudio, son las mediciones realizadas en las estaciones hidroclimatológicas Pueblo Nuevo y Gaviotas, así como los aforos realizados en el cauce de alivio El Censo, en el periodo del 10 al 26 de octubre del 2011, dicha información fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua.

Al realizar la modelación matemática en flujo no permanente, se integraron al modelo los diferentes valores aforados en los tiempos correspondientes.

- Aguas arriba del río de la Sierra se colocó el siguiente hidrograma aforado en la estación Pueblo Nuevo en el periodo antes indicado.

Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elev. Pueblo Nuevo	Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elev. Pueblo Nuevo
Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)
1	10/10/2011	586.97	7.10	9	18/10/2011	1327.00	8.24
2	11/10/2011	984.00	7.97	10	19/10/2011	1256.00	8.21
3	12/10/2011	952.00	7.97	11	20/10/2011	1100.00	8.08
4	13/10/2011	1073.00	8.00	12	21/10/2011	931.00	7.91
5	14/10/2011	923.00	7.87	13	22/10/2011	914.00	7.74
6	15/10/2011	934.00	7.98	14	23/10/2011	896.00	7.56
7	16/10/2011	958.00	8.10	15	24/10/2011	569.00	7.38
8	17/10/2011	958.00	8.10	16	25/10/2011	515.00	7.22
				17	26/10/2011	459.00	7.11

Tabla 8. Valores del hidrograma aforado en Pueblo Nuevo e ingresado como condición de frontera aguas arriba, del río de la Sierra.

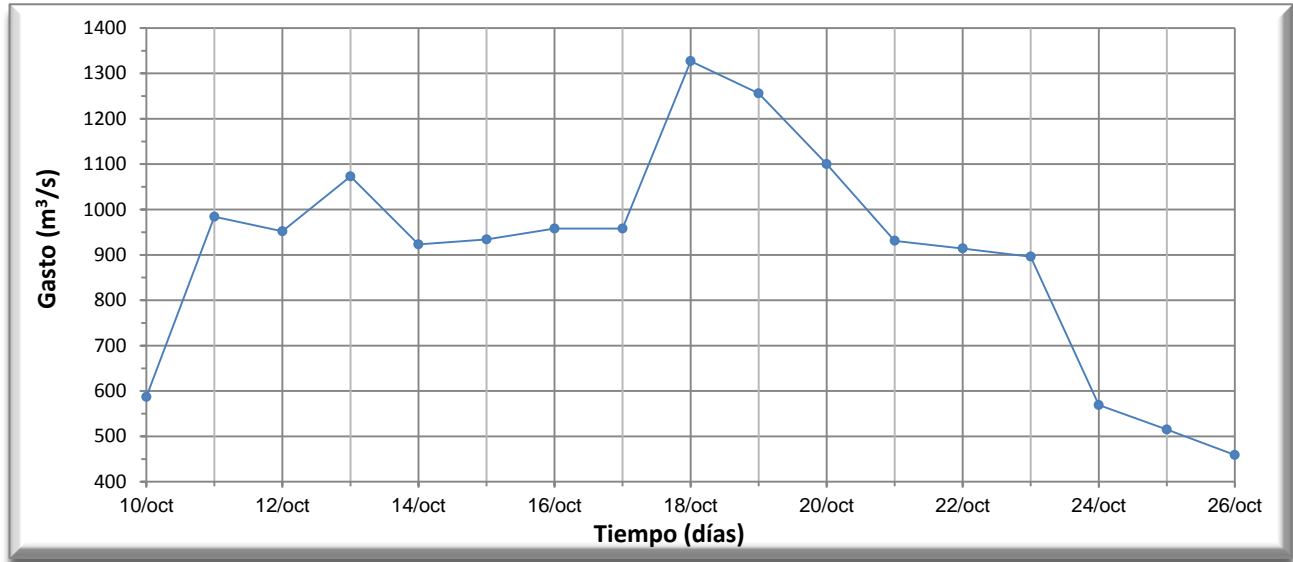


Gráfico 17. Hidrograma aforado en la estación Pueblo nuevo y colocado como condición de frontera aguas arriba del río de la Sierra.

- Aguas abajo se colocó el siguiente limnigrama, el cual son los datos medidos en la estación Gaviotas incrementándole 60 cm, esto es por la calibración que se llevo a cabo en condiciones naturales.

Día	Fecha	Elevación Gaviotas	Elevación Gaviotas Incrementado 60cm	Día	Fecha	Elevación Gaviotas	Elevación Gaviotas Incrementado 60cm
Num	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
1	10/10/2011	5.20	5.80	9	18/10/2011	6.45	7.05
2	11/10/2011	5.71	6.31	10	19/10/2011	6.53	7.13
3	12/10/2011	5.72	6.32	11	20/10/2011	6.66	7.26
4	13/10/2011	5.76	6.36	12	21/10/2011	6.69	7.29
5	14/10/2011	5.82	6.42	13	22/10/2011	6.63	7.23
6	15/10/2011	5.98	6.58	14	23/10/2011	6.54	7.14
7	16/10/2011	6.10	6.70	15	24/10/2011	6.43	7.03
8	17/10/2011	6.10	6.70	16	25/10/2011	6.29	6.89
				17	26/10/2011	6.17	6.77

Tabla 9. Elevaciones medidas en la estación Gaviotas.

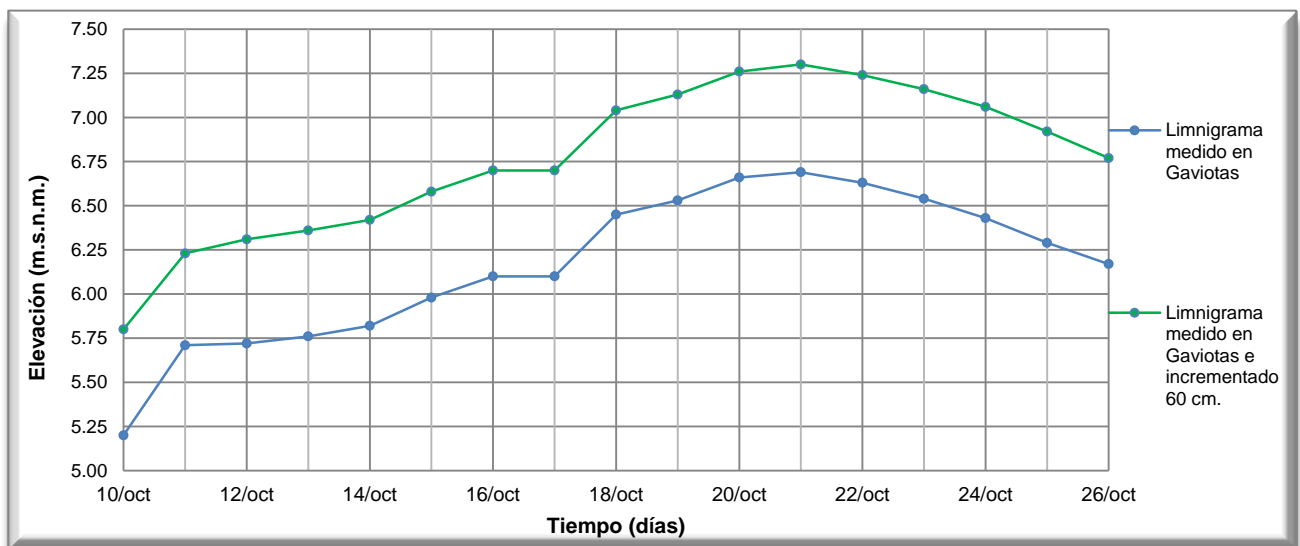


Gráfico 18. El limnigrama en color verde es el que se colocó como condición de frontera.

En el cauce de alivio El Censo, se colocó como condición de frontera aguas arriba la unión entre el río de la Sierra y el cauce de alivio, lo cual ocasionará que la elevación que tenga el río en la sección donde se encuentra la estructura, sea la misma que en el cauce.

Y como condición de frontera aguas abajo se colocó el tirante normal, correspondiente a la pendiente $S = 0.002$.

Para las pérdidas por fricción se utilizó el factor "n" de Manning, los valores utilizados en el modelo matemático son las siguientes; para el río de la Sierra se mantiene la misma rugosidad con la que se calibro en condiciones naturales, mientras que para el cauce de alivio El Censo se le considero una rugosidad de $n = 0.050$.

A continuación se presenta el ingreso de las condiciones de frontera en el programa **HEC-RAS**.

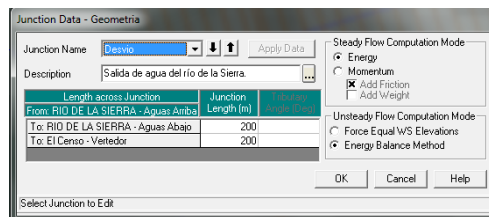


Figura 18. Condición de frontera aguas arriba del cauce de alivio El Censo.

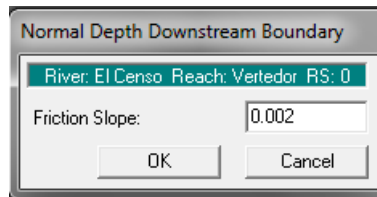


Figura 19. Condición de frontera aguas abajo del cauce de alivio El Censo.

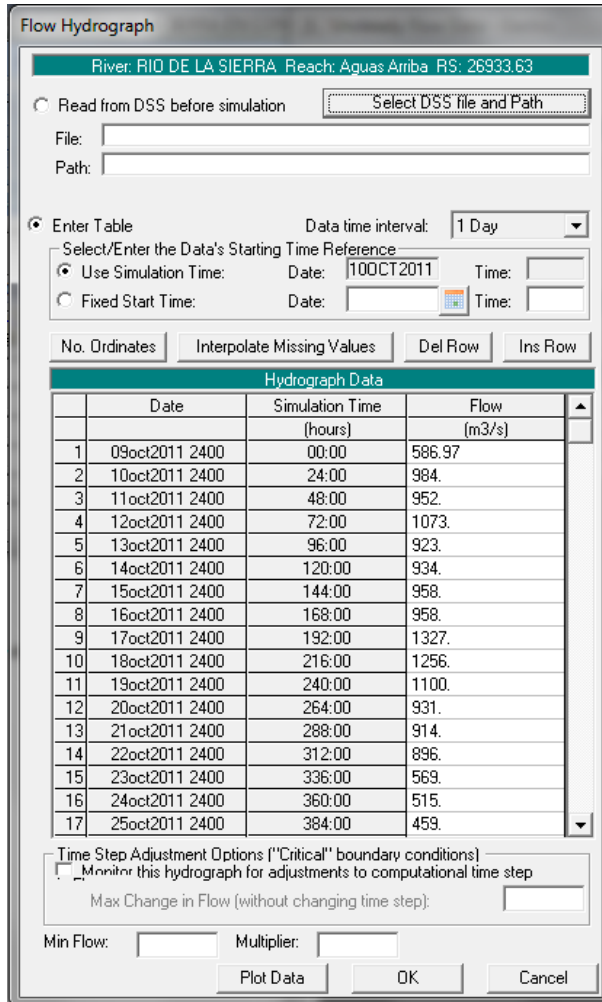


Figura 20. Condición de Frontera Aguas Arriba del Río de la Sierra (HEC-RAS)

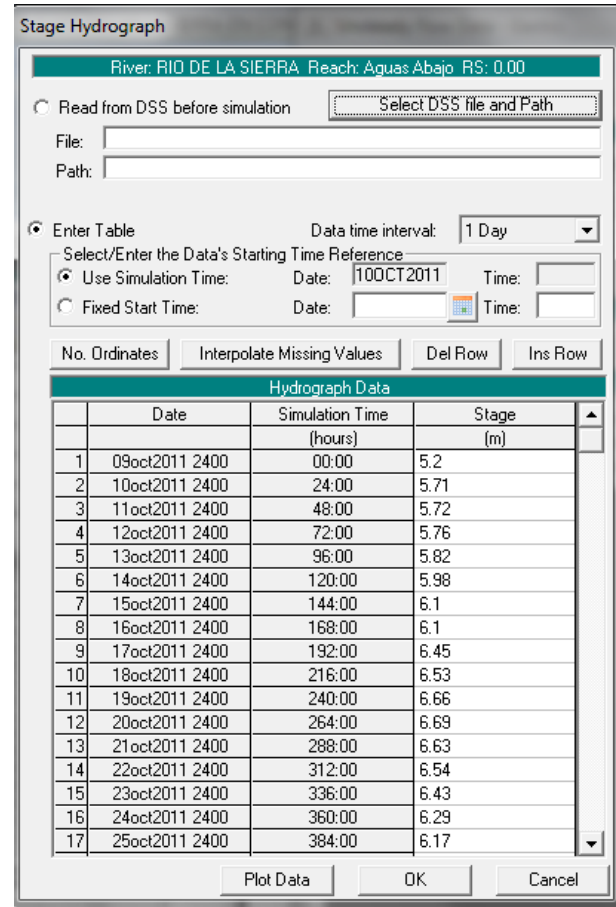


Figura 21. Condición de Frontera Aguas Abajo del Río de la Sierra (HEC-RAS)

III.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Con base en las secciones topobatemétricas de los cauces del río de la Sierra y de El Censo, condiciones de frontera con los datos obtenidos de las estaciones hidroclimatológicas así como los medidos en la estructura del Censo, se procedió a realizar la modelación matemática obteniendo así la simulación con flujo no permanente.

Para calibrar el modelo matemático en condiciones con obra, se compararon los datos que arroja el modelo matemático contra las mediciones realizadas en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo, el cauce de alivio el Censo y aguas arriba del cauce de alivio Sabanilla.

Se realizaron diversas simulaciones, con el fin de calibrar el modelo matemático de acuerdo a los datos medidos en los diferentes puntos del río de la Sierra, sin embargo no se llegó a tener un aproximación del 100% en todos los puntos medidos.

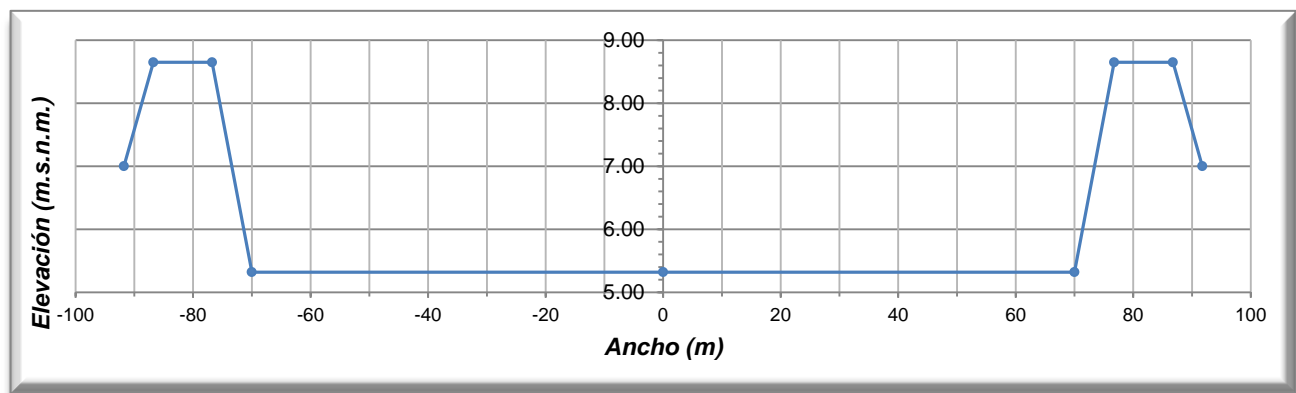
Se propuso bajar el ancho de plantilla del cauce de alivio El Censo de 200 a 140 m, esto debido al azolve que este tiene, además de que a la entrada se forma una zona muerta debido a la posición en la que se encuentra el cauce de alivio con respecto al río, con esto se intentó hacer lo más parecido el modelo matemático con lo que está pasando físicamente.



Figura 22. Cauce de alivio el Censo, en la cual se aprecia el azolve tanto a lo largo como a lo ancho. Fuente CONAGUA.

Por lo cual las secciones transversales del cauce de alivio el Censo quedan de la siguiente manera:

Gráfico 19. Sección topobatimétrica del cauce de alivio El Censo, cadenamiento 0+400 (Modificada con un ancho de plantilla de 140 m.)



A continuación se muestra la vista en planta del armado geométrico del modelo matemático en condiciones con obra:

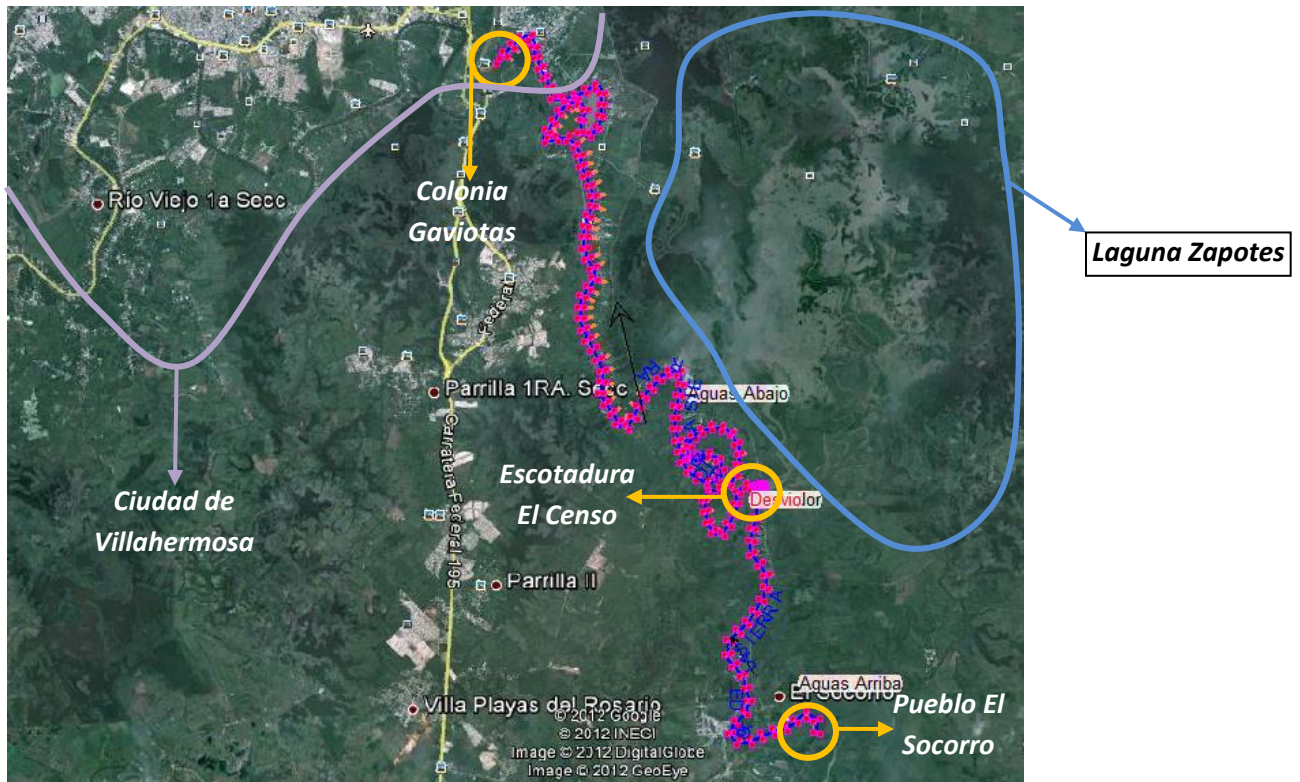


Figura 23. Armado geométrico en planta, en el modelo matemático.

Los tiempos e intervalos de la simulación son los siguientes:

El periodo de la modelación, está en función del hidrograma que se incluyó aguas arriba del río de la Sierra, para este caso el periodo es del 10 al 26 de octubre del 2011.

El intervalo de tiempo que se utilizó en la simulación es de 30 minutos.

Dichos datos se ingresaron al programa tal como se muestra en la figura 24:

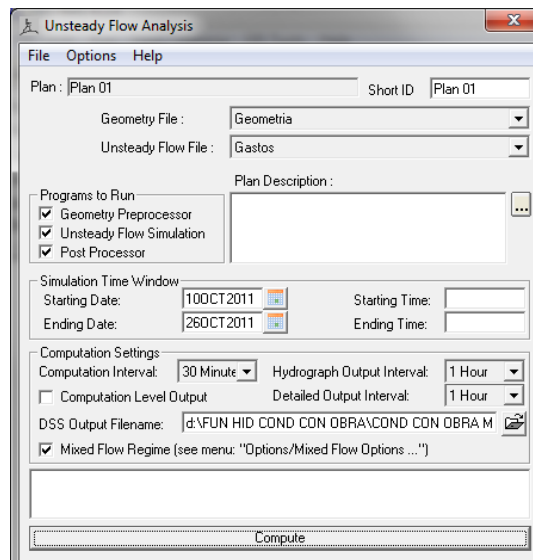


Figura 24. Datos con los que se realizó la simulación en flujo no permanente.



Después de diversas simulaciones, en donde se varió la rugosidad del cauce de alivio así como su ancho, se obtuvo como resultado la calibración que se presenta más adelante.

Para calibrar el modelo matemático, se revisaron las mediciones obtenidas en los siguientes puntos:

- En la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo: **Elevaciones.**
- En el cauce de alivio el Censo: **Gasto y velocidades.**
- Aguas arriba de la escotadura Sabanilla, este punto se encuentra en el cadenamiento 12+794 de este estudio: **Elevaciones.**

Las condiciones y parámetros del modelo matemático quedan de la siguiente manera:

- Cauce de alivio el Censo: Ancho de vertido de 140 m, rugosidad igual a 0.050, longitud del cauce de 400 m, condición de frontera aguas arriba es la unión con el río de la Sierra por lo tanto el nivel que tenga el río será el nivel con el que verterá hacia el cauce de alivio y como condición de frontera aguas abajo se tiene un tirante normal para una pendiente de 0.002.
- Río de la Sierra: Con una longitud de 29933.63 m, una rugosidad variable de 0.0305 en el cauce principal y 0.032 en las márgenes, como condición de frontera aguas arriba se ingresó un hidrograma el cual fue aforado en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo y condición de frontera aguas abajo se ingresó el limnigrama el cual fue medido en la estación hidroclimatológica Gaviotas.

A continuación se presenta la comparación de los datos medidos y los resultados del modelo matemático, en los puntos mencionados anteriormente.

1. Comparación en Pueblo Nuevo:

FECHA	Gasto Pueblo Nuevo (Medido)	Elev. Pueblo Nuevo (Medido)	Gasto Pueblo Nuevo (Modelo)	Elev. Pueblo Nuevo (Modelo)
(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)
10/10/2011	586.97	7.10	590.06	6.58
11/10/2011	984.00	7.97	981.19	7.45
12/10/2011	952.00	7.97	955.66	7.43
13/10/2011	1073.00	8.00	1,067.95	7.63
14/10/2011	923.00	7.87	923.62	7.42
15/10/2011	934.00	7.98	934.40	7.49
16/10/2011	958.00	8.10	957.75	7.57
17/10/2011	958.00	8.10	969.21	7.59
18/10/2011	1327.00	8.24	1,323.47	8.20
19/10/2011	1256.00	8.21	1,251.06	8.13
20/10/2011	1100.00	8.08	1,094.74	7.98
21/10/2011	931.00	7.91	930.70	7.79
22/10/2011	914.00	7.74	913.66	7.74
23/10/2011	896.00	7.56	885.99	7.67
24/10/2011	569.00	7.38	567.78	7.24
25/10/2011	515.00	7.22	513.78	7.09
26/10/2011	459.00	7.11		

Tabla 10. Resultados de la calibración del modelo matemático en condiciones con obra, en relación a las elevaciones medidas a la altura de la estación Pueblo Nuevo.

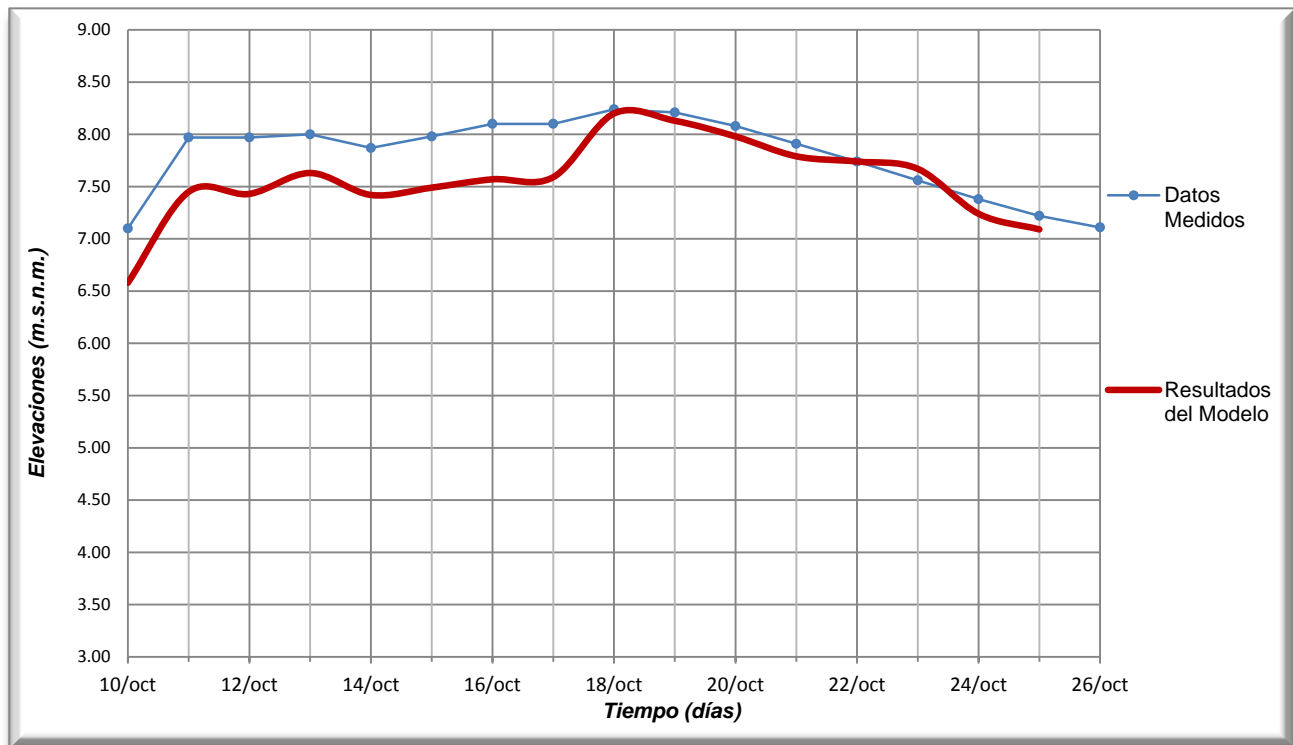


Gráfico 20. Comparación de los datos medidos y los resultados del modelo con respecto a las elevaciones en la estación Pueblo Nuevo.



2.- Comparación de gastos en el Cauce de Alivio El Censo.

Día	Fecha	Gasto El Censo (Medido)	Gasto El Censo (Modelo)	Día	Fecha	Gasto El Censo (Medido)	Gasto El Censo (Modelo)
Num	(día)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	Num	(día)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
1	10/10/2011	260.90	148.410	9	18/10/2011	570.30	606.88
2	11/10/2011	343.74	356.740	10	19/10/2011	513.48	587.380
3	12/10/2011	322.94	354.270	11	20/10/2011	455.33	539.540
4	13/10/2011	373.20	411.300	12	21/10/2011	405.08	482.400
5	14/10/2011	329.82	352.290	13	22/10/2011	360.58	465.250
6	15/10/2011	392.02	374.840	14	23/10/2011	309.48	441.180
7	16/10/2011	464.27	399.670	15	24/10/2011	243.67	321.300
8	17/10/2011	470.52	404.37	16	25/10/2011	206.87	279.870
				17	26/10/2011	171.39	

Tabla 11. Resultados de la calibración del modelo en condiciones con el cauce de alivio, referente a los gastos aforados y los resultados de la simulación en el cauce de alivio El Censo.

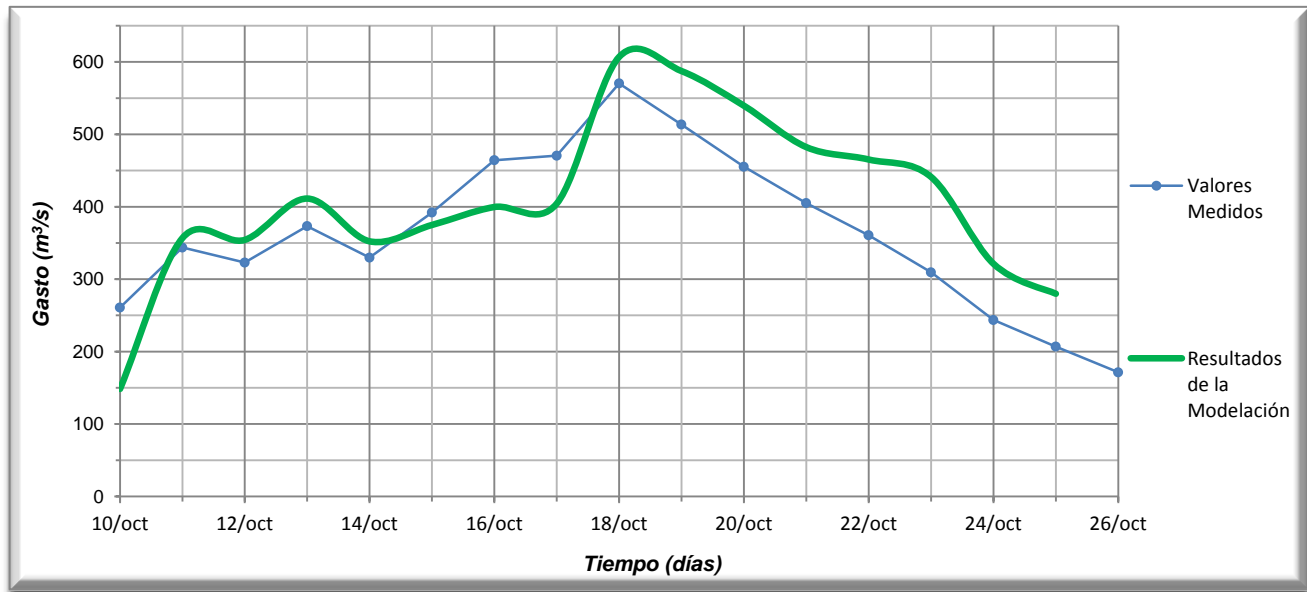


Gráfico 21. Comparación de curvas entre los datos aforados y los resultados del modelo en condiciones con el cauce de alivio, con respecto a los gastos en el cauce de alivio el Censo.

Después de ver los resultados de la gráfica anterior, se procedió a revisar las velocidades en el cauce de alivio, debido a la diferencia de gastos en diversos tiempos que van desde 17 a 131 m³/s.

Día	Fecha	Vel. El Censo (Medido)	Vel. El Censo (Modelo)	Día	Fecha	Vel. El Censo (Medido)	Vel. El Censo (Modelo)
Num	(día)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	Num	(día)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
1	10/10/2011	0.908	0.73	9	18/10/2011	1.284	1.47
2	11/10/2011	1.044	1.17	10	19/10/2011	1.304	1.44
3	12/10/2011	1.014	1.16	11	20/10/2011	1.249	1.37
4	13/10/2011	1.084	1.25	12	21/10/2011	1.176	1.29
5	14/10/2011	1.047	1.15	13	22/10/2011	1.118	1.27
6	15/10/2011	1.111	1.18	14	23/10/2011	0.998	1.24
7	16/10/2011	1.121	1.21	15	24/10/2011	0.892	1.02
8	17/10/2011	1.232	1.22	16	25/10/2011	0.834	0.94
				17	26/10/2011	0.792	

Tabla 12. Resultados de la calibración del modelo en condiciones con obra, referente a las velocidades medidas y los resultados de la simulación en el cauce de alivio El Censo.

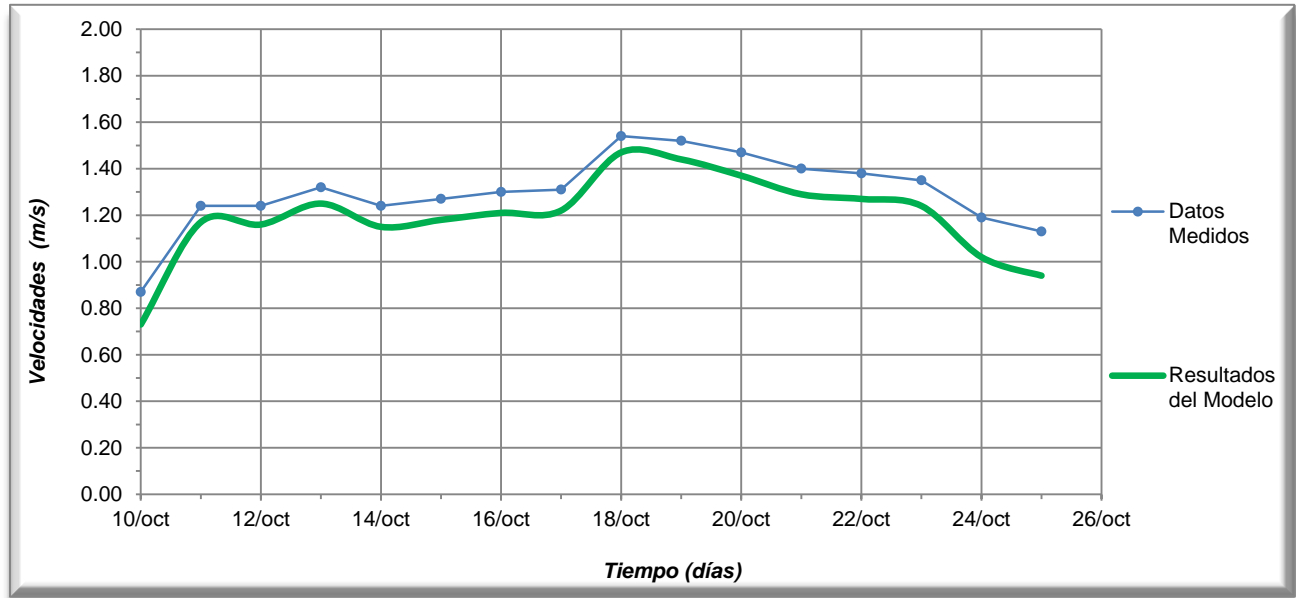


Gráfico 22. Comparación de curvas entre los datos medidos y los resultados del modelo en condiciones con el cauce de alivio, con respecto a las velocidades en el cauce de alivio el Censo.

De la tabla y gráfica anterior podemos ver que el modelo está dando como resultado velocidades un poco menores en el cauce de alivio, que van desde los 0.07 hasta los 0.19 m/s.

Para poder identificar el motivo por el cual se están teniendo estas variaciones, se tendría que revisar físicamente el estado de la obra; en algunas imágenes proporcionadas por la CONAGUA se puede apreciar que se tienen azolves aguas abajo del puente de la carretera Torno Largo – El Censo y en las márgenes.

En las siguientes imágenes se muestra el cauce de alivio, en condiciones iniciales y tiempo después con la presencia de azolve así como material de construcción (tapetes de concreto).



Figura 25. Condiciones iniciales del Cauce de Alivio El Censo.



Figura 26. Condiciones del Cauce de Alivio en 2011. En rojo la presencia de azolve y material de construcción.

3.- Comparación de elevaciones aguas arriba de Sabanilla.

La estructura (cauce de alivio) Sabanilla se encuentra sobre la margen derecha del río de la Sierra, aguas abajo del Censo, su cadenamamiento en este estudio se encuentra en el Km 12+600.80, a continuación se muestra su ubicación así como la estructura.



Figura 27. En azul el sentido del flujo, en amarillo El Censo y en rojo Sabanilla.



Figura 28. Cauce de alivio Sabanilla. Fuente CONAGUA.

Día	Fecha	Elev. aguas arriba de Sabanilla (Medido)	Elev. aguas arriba de Sabanilla +0.60 m	Elev. aguas arriba de Sabanilla (Modelo)	Día	Fecha	Elev. aguas arriba de Sabanilla (Medido)	Elev. aguas arriba de Sabanilla +0.60 m	Elev. aguas arriba de Sabanilla (Modelo)
Num	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
1	10/10/2011	6.17	6.77	6.19	9	18/10/2011	6.66	7.34	7.57
2	11/10/2011	6.22	6.82	6.83	10	19/10/2011	6.74	7.34	7.58
3	12/10/2011	6.30	6.9	6.86	11	20/10/2011	6.74	7.3	7.57
4	13/10/2011	6.39	6.99	6.98	12	21/10/2011	6.70	7.23	7.5
5	14/10/2011	6.32	6.92	6.9	13	22/10/2011	6.63	7.15	7.44
6	15/10/2011	6.47	7.07	7	14	23/10/2011	6.55	7.02	7.37
7	16/10/2011	6.57	7.17	7.1	15	24/10/2011	6.42	6.86	7.13
8	17/10/2011	6.60	7.26	7.11	16	25/10/2011	6.26	6.81	6.98
					17	26/10/2011	6.21		

Tabla 13. Resultados de la calibración del modelo en condiciones con el cauce de alivio, referente a las elevaciones medidas y los resultados de la simulación aguas arriba del cauce de alivio Sabanilla.

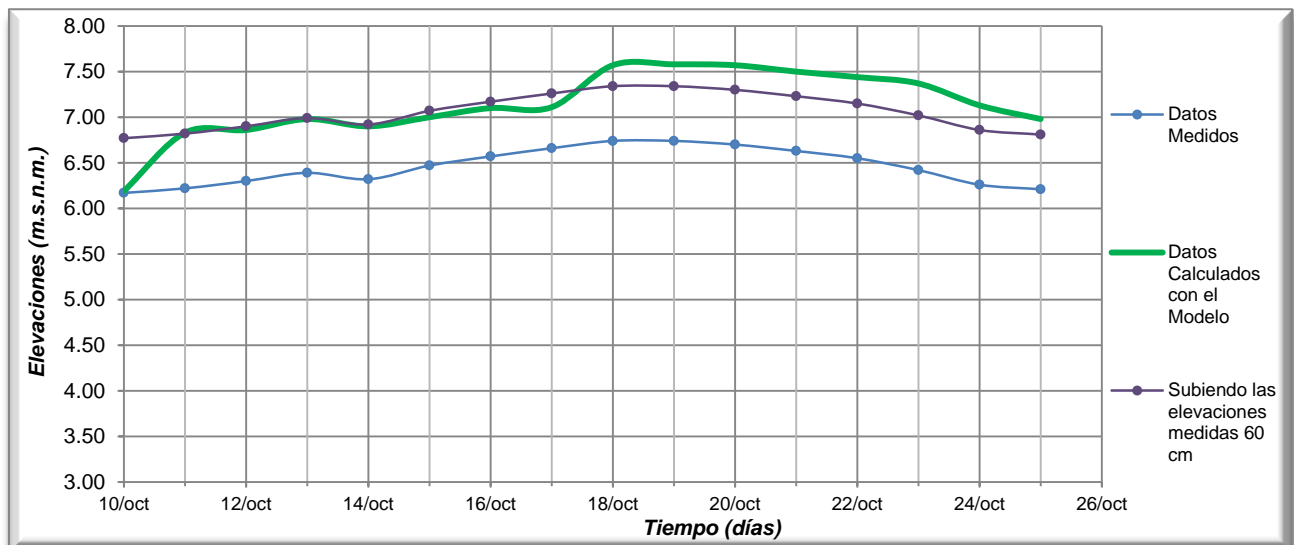


Gráfico 23. Comparación de curvas entre los datos medidos y los resultados del modelo en condiciones con el cauce de alivio, con respecto a las elevaciones aguas arriba del cauce de alivio Sabanilla.

Como se puede ver en las tablas y graficas anteriores, la correlación de las elevaciones en Pueblo Nuevo no varían en más de un 10%, por lo cual podríamos considerarlo como aceptable.

Por otro lado la comparación que se tiene de los gastos aforados en el cauce de alivio el Censo, tiene cierta variación en diversos tiempos cuya diferencia varía entre el 4% y 43%.

Con respecto a la comparativa de las elevaciones aguas arriba de Sabanilla, se puede ver en el gráfico que al incrementar a las elevaciones medidas los mismos 60 cm que se sumaron en Gaviotas, la comparación de los datos medidos y los resultados del modelo son aceptables.

III.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Como resultado de la simulación generada con el modelo matemático con la obra construida, realizada en el programa HEC-RAS, se obtuvieron los resultados en forma de tablas, perfiles longitudinales y secciones transversales del tramo del río en estudio.

A continuación se presentan tablas, perfiles longitudinales y las secciones trasversales para diferentes gastos aforados en la estación Pueblo Nuevo, como resultado de la simulación.

Resultados del modelo matemático en condiciones con obra para un gasto de 590.06 m³/s.

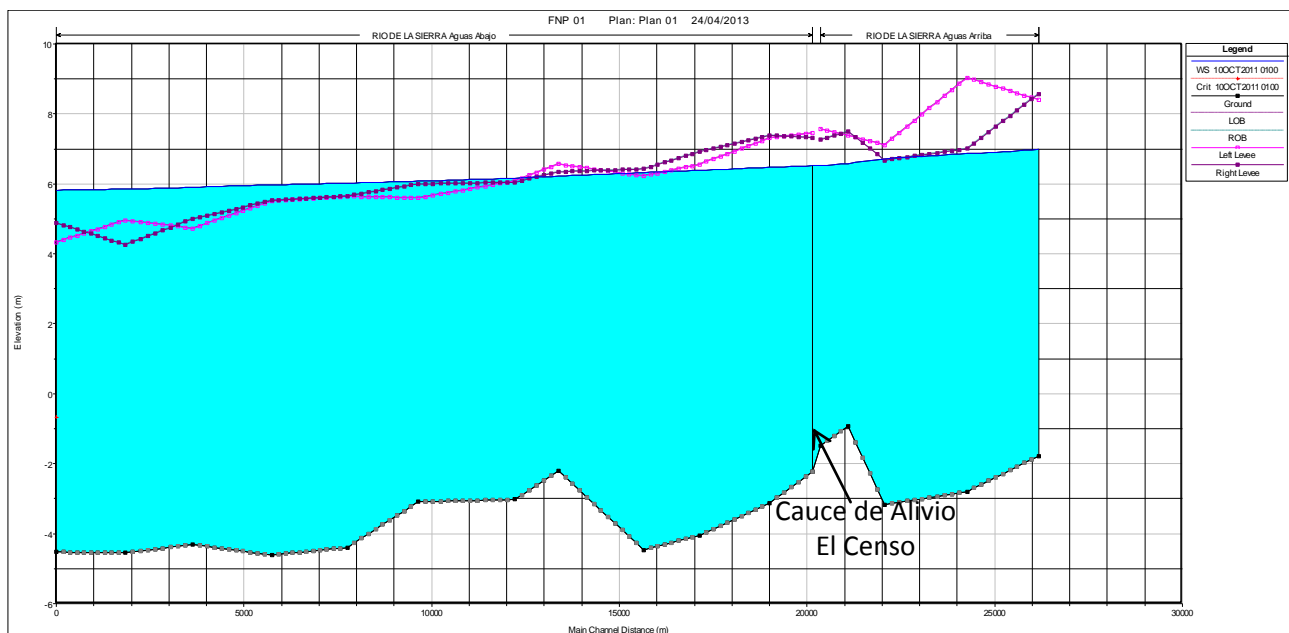


Gráfico 24. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de 590.06 m³/s en la estación hidroclimatólogica Pueblo Nuevo.

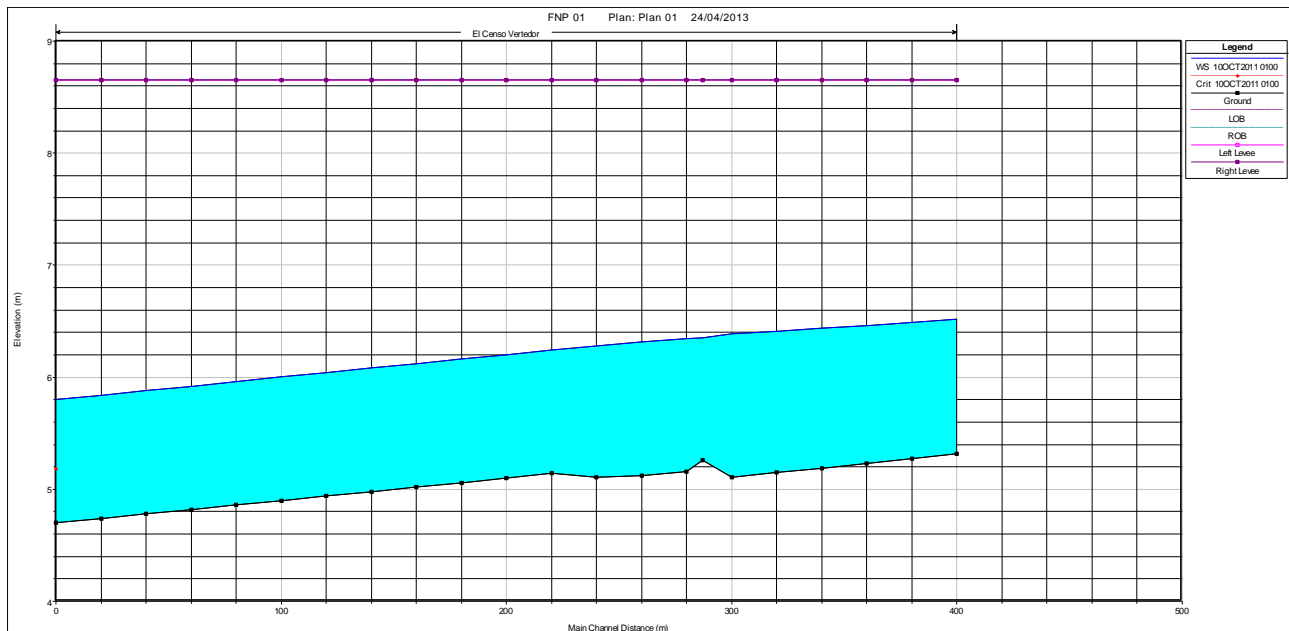


Gráfico 25. Perfil longitudinal del cauce de alivio El Censo para un gasto de $590.06 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

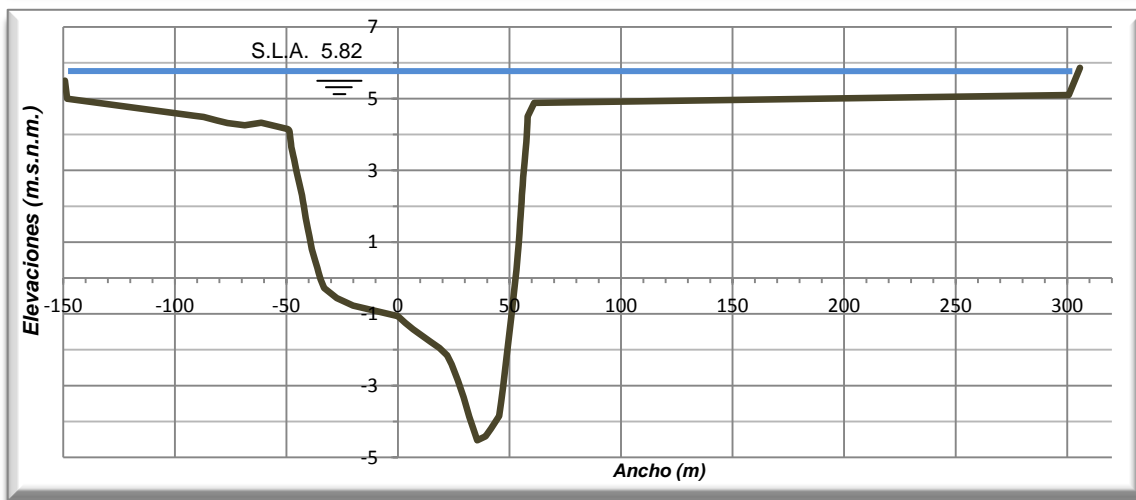
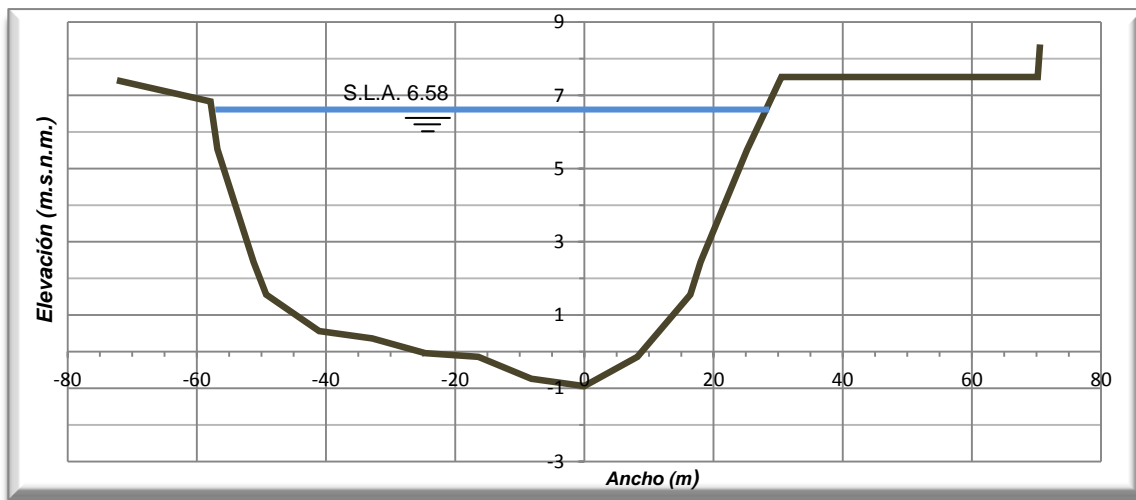


Gráfico 26 y 27. Secciones transversales del río de la Sierra en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de $590.06 \text{ m}^3/\text{s}$.

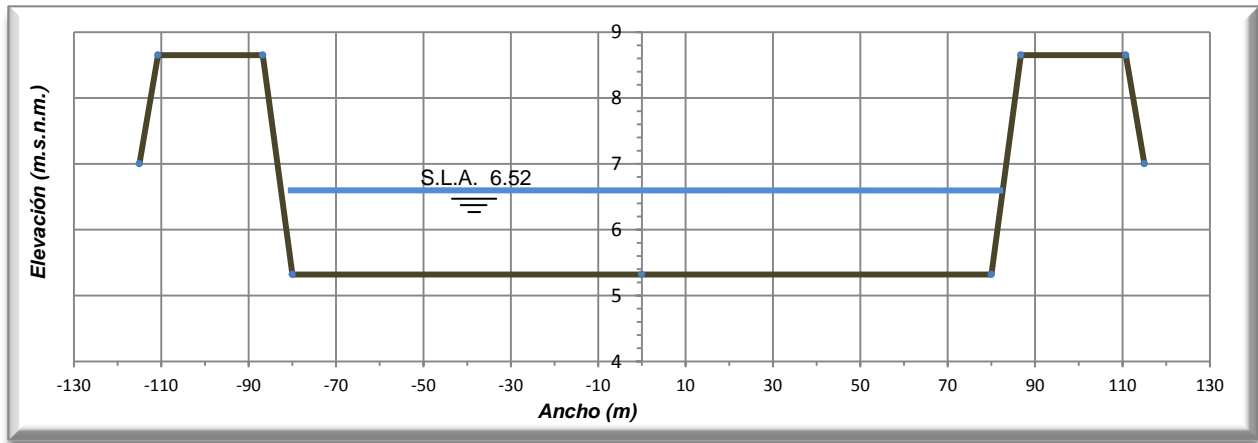


Gráfico 28. Sección transversal de la entrada del cauce de alivio el Censo, cadenamiento 0+400, para un gasto de 590.06 m³/s en Pueblo Nuevo.

Tabla 14. Resumen de las características hidráulicas de la modelación en condiciones con obra, para el río de la Sierra tramo de Pueblo El Socorro - Colonia Gaviotas y del cauce de alivio el Censo en un tramo de 400 m de longitud, correspondientes a un gasto de 590.06 m³/s aforado en la estación hidroclimatológica de Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total (m ³ /s)	Elev. mínima del Canal (m.s.n.m.)	Elevación del Agua (m.s.n.m.)	Tirante Máximo (m)	Velocidad (m/s)	Área Hidráulica (m ²)	Pendiente de Fondo	Número de Froude
Río de la Sierra								
26933.63	603.51	-1.78	6.99	8.77	0.94	641.72	0.000075	0.12
25026.27	598	-2.80	6.86	9.66	0.89	670.64	0.000057	0.11
22829.54	592.28	-3.17	6.72	9.89	0.94	626.89	0.000076	0.12
21846.8	590.06	-0.94	6.58	7.52	1.23	479.94	0.000141	0.17
21116.15	588.57	-1.48	6.52	8.00	1.01	579.88	0.000063	0.13
18999.55	437.87	-3.12	6.48	9.60	0.68	644.51	0.000034	0.08
17135.79	434.62	-4.04	6.39	10.43	0.76	573.83	0.000041	0.09
15649.13	431.97	-4.46	6.32	10.78	0.74	584.98	0.000048	0.1
13373.42	427.52	-2.20	6.22	8.42	0.71	601.87	0.000044	0.09
12214.62	424.96	-3.02	6.17	9.19	0.7	605.88	0.000044	0.09
9642.83	417.8	-3.09	6.08	9.17	0.61	690.57	0.000031	0.08
7752.22	411.2	-4.39	6.02	10.41	0.55	748.36	0.000029	0.08
5747.83	404.24	-4.61	5.97	10.58	0.51	785.2	0.000021	0.06
3635.27	399.23	-4.31	5.9	10.21	0.65	609.83	0.00004	0.09
1840.01	396.82	-4.54	5.85	10.39	0.5	787.87	0.000019	0.06
0	394.47	-4.53	5.82	10.35	0.43	915.34		0.06
Cauce de Alivio El Censo								
400	148.41	5.32	6.52	1.20	0.87	170.53	0.001485	0.26
380	148.35	5.27	6.49	1.22	0.85	173.62	0.001417	0.25
360	148.29	5.23	6.46	1.23	0.85	175.39	0.001367	0.25
340	148.23	5.19	6.43	1.24	0.84	177.3	0.001315	0.24
320	148.17	5.15	6.41	1.26	0.83	179.43	0.001262	0.24
300	148.1	5.11	6.39	1.28	0.82	181.69	0.001574	0.23
287	148.07	5.26	6.35	1.09	0.95	155.23	0.001798	0.29
280	148.05	5.16	6.35	1.19	0.88	168.76	0.001552	0.26
260	147.99	5.12	6.32	1.20	0.87	170.14	0.00158	0.26
240	147.93	5.11	6.28	1.17	0.89	166.78	0.001809	0.26
220	147.87	5.14	6.24	1.10	0.95	156.42	0.002015	0.29
200	147.81	5.10	6.2	1.10	0.95	156.4	0.002013	0.29
180	147.75	5.06	6.16	1.10	0.94	156.37	0.002012	0.29
160	147.7	5.02	6.12	1.10	0.94	156.34	0.002011	0.29
140	147.64	4.98	6.08	1.10	0.94	156.32	0.002009	0.29
120	147.58	4.94	6.04	1.10	0.94	156.34	0.002006	0.29
100	147.52	4.90	6	1.10	0.94	156.32	0.002005	0.29
80	147.47	4.86	5.96	1.10	0.94	156.29	0.002005	0.29
60	147.41	4.82	5.92	1.10	0.94	156.23	0.002004	0.29
40	147.35	4.78	5.88	1.10	0.94	156.25	0.002001	0.29
20	147.29	4.74	5.84	1.10	0.94	156.23	0.002001	0.29
0	147.23	4.70	5.8	1.10	0.94	156.16		0.29



Resultados del modelo matemático en condiciones con obra para un gasto de 1060.06 m³/s.

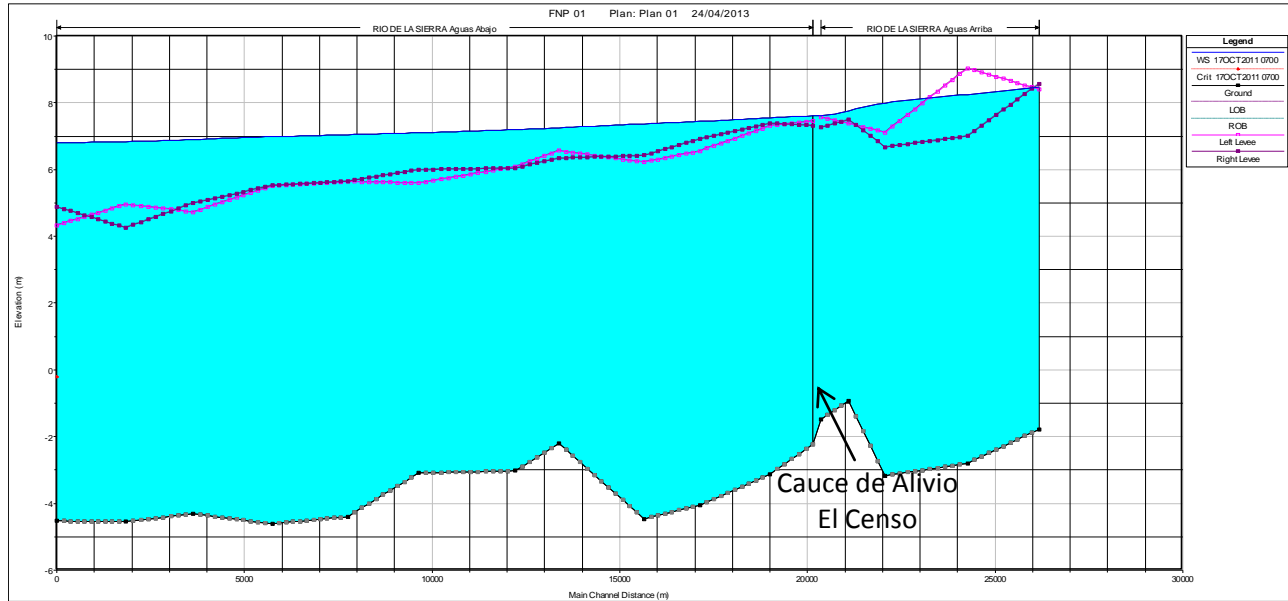


Gráfico 29. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de 1060.06 m³/s en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

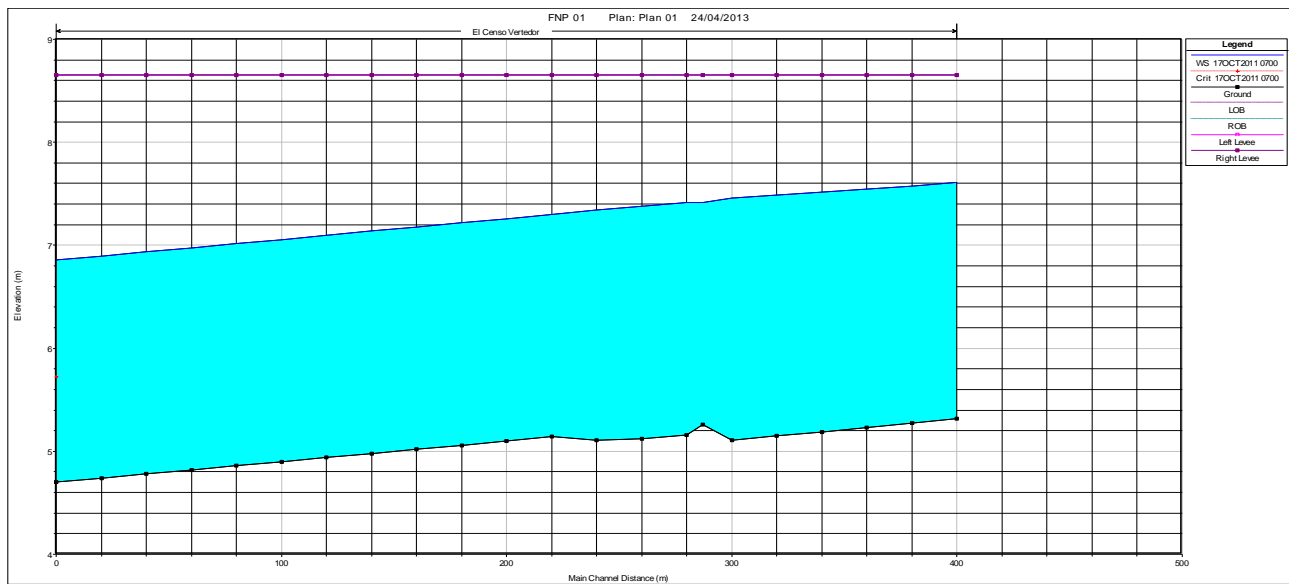


Gráfico 30. Perfil longitudinal del cauce de alivio El Censo para un gasto de 1060.06 m³/s en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

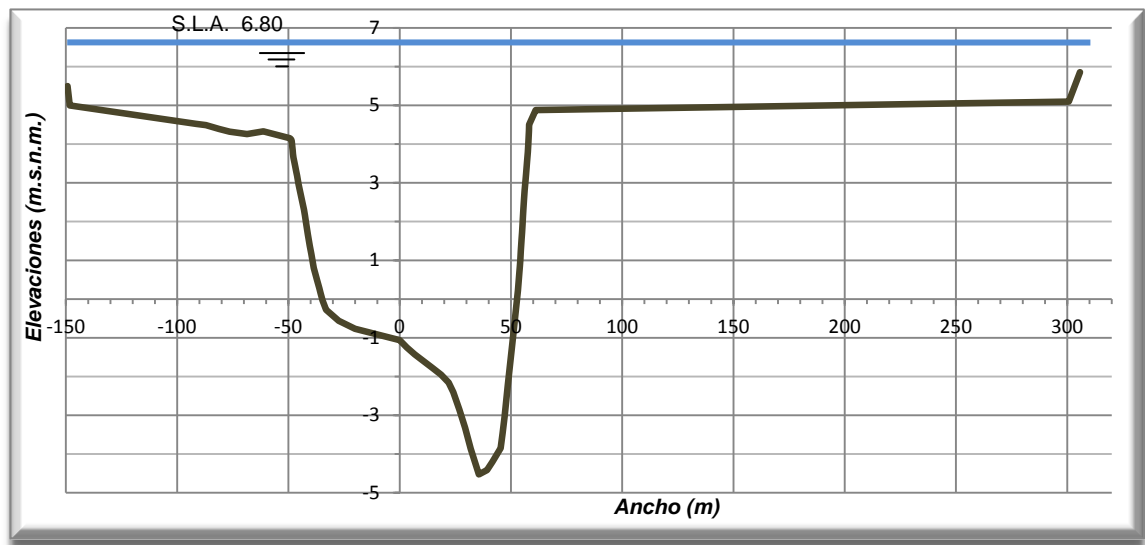
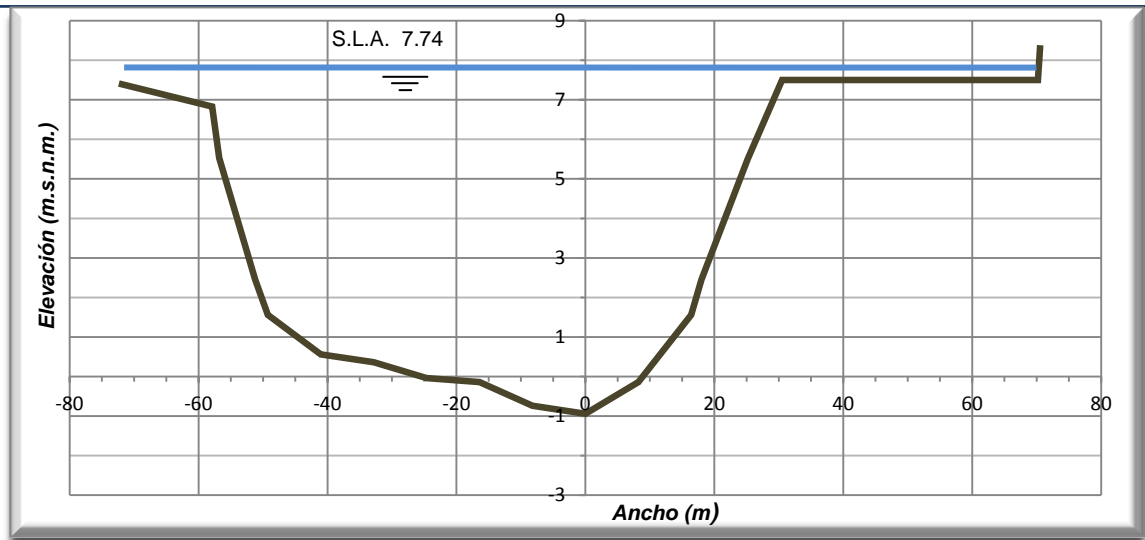


Gráfico 31 y 32. Secciones transversales del río de la Sierra en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de $1060.06 \text{ m}^3/\text{s}$.

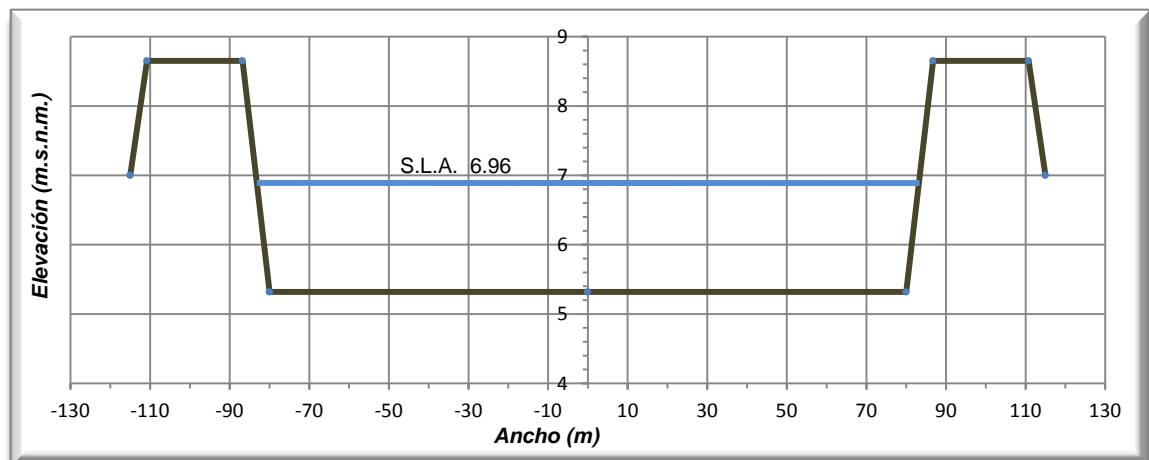


Gráfico 33. Sección transversal de la entrada del cauce de alivio el Censo, cadenamiento 0+400, para un gasto de $1060.06 \text{ m}^3/\text{s}$ en Pueblo Nuevo.



Tabla 15. Resumen de las características hidráulicas de la modelación en condiciones con obra, para el río de la Sierra tramo de Pueblo El Socorro - Colonia Gaviotas y del cauce de alivio el Censo en un tramo de 400 m de longitud, correspondientes a un gasto de 1060.06 m³/s aforado en la estación hidroclimatológica de Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total	Elev. mínima del Canal	Elevación del Agua	Tirante Máximo	Velocidad	Área Hidráulica	Pendiente de Fondo	Número de Froude
	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m)	(m/s)	(m ²)		
Río de la Sierra								
26933.63	1065.63	-1.78	8.47	10.25	1.32	805.65	0.000122	0.16
25026.27	1063.51	-2.80	8.25	11.05	1.32	806.18	0.000102	0.15
22829.54	1061.15	-3.17	8.00	11.17	1.36	781.62	0.000134	0.16
21846.8	1060.06	-0.94	7.74	8.68	1.77	599.77	0.000284	0.24
21116.15	1059.25	-1.48	7.61	9.09	1.47	718.77	0.000108	0.2
18999.55	604.91	-3.12	7.55	10.67	0.8	754.42	0.000045	0.09
17135.79	603.3	-4.04	7.44	11.48	0.89	681.67	0.000052	0.1
15649.13	602	-4.46	7.37	11.83	0.83	726.05	0.000053	0.1
13373.42	599.96	-2.20	7.25	9.45	0.8	751.49	0.000053	0.1
12214.62	598.87	-3.02	7.20	10.22	0.76	790.24	0.000047	0.1
9642.83	595.67	-3.09	7.10	10.19	0.61	969.44	0.000034	0.08
7752.22	593.03	-4.39	7.04	11.43	0.58	1018.71	0.000031	0.08
5747.83	590.51	-4.61	6.99	11.60	0.57	1037.47	0.000026	0.07
3635.27	588.47	-4.31	6.90	11.21	0.76	778.9	0.000048	0.1
1840.01	587.17	-4.54	6.84	11.38	0.61	960.69	0.000026	0.08
0.00	585.56	-4.53	6.80	11.33	0.5	1170.8		0.07
Cauce de Alivio El Censo								
400	453.4	5.32	7.61	2.29	1.37	331.06	0.001615	0.29
380	453.38	5.27	7.58	2.31	1.36	333.77	0.001582	0.29
360	453.35	5.23	7.55	2.32	1.35	335.01	0.001562	0.29
340	453.33	5.19	7.52	2.33	1.35	336.25	0.001541	0.29
320	453.31	5.15	7.49	2.34	1.34	337.67	0.001518	0.28
300	453.29	5.11	7.46	2.35	1.34	339.09	0.001726	0.28
287	453.28	5.26	7.42	2.16	1.46	311.31	0.001854	0.32
280	453.27	5.16	7.41	2.25	1.39	325.31	0.001719	0.3
260	453.25	5.12	7.38	2.26	1.39	326.1	0.001746	0.3
240	453.23	5.11	7.34	2.23	1.41	322	0.001886	0.31
220	453.21	5.14	7.30	2.16	1.46	310.91	0.001999	0.32
200	453.19	5.10	7.26	2.16	1.46	310.85	0.001999	0.32
180	453.17	5.06	7.22	2.16	1.46	310.75	0.001999	0.32
160	453.15	5.02	7.18	2.16	1.46	310.66	0.002	0.32
140	453.13	4.98	7.14	2.16	1.46	310.52	0.002	0.32
120	453.11	4.94	7.10	2.16	1.46	310.47	0.002	0.32
100	453.09	4.90	7.06	2.16	1.46	310.38	0.002001	0.32
80	453.07	4.86	7.02	2.16	1.46	310.24	0.002002	0.32
60	453.05	4.82	6.98	2.16	1.46	310.16	0.002003	0.32
40	453.03	4.78	6.94	2.16	1.46	310.07	0.002003	0.32
20	453.01	4.74	6.90	2.16	1.46	309.99	0.002004	0.32
0	452.99	4.70	6.86	2.16	1.46	309.91		0.32



Resultados del modelo matemático en condiciones con obra para un gasto de 1323.47 m³/s.

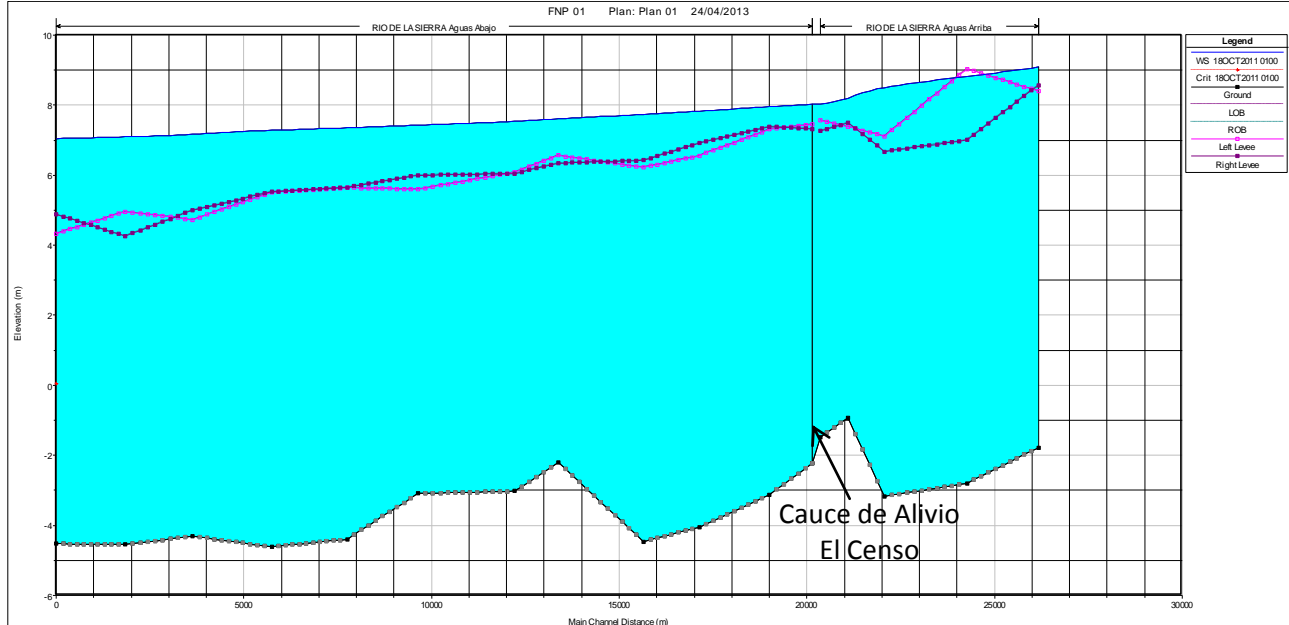


Gráfico 34. Perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de 1323.47 m³/s en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

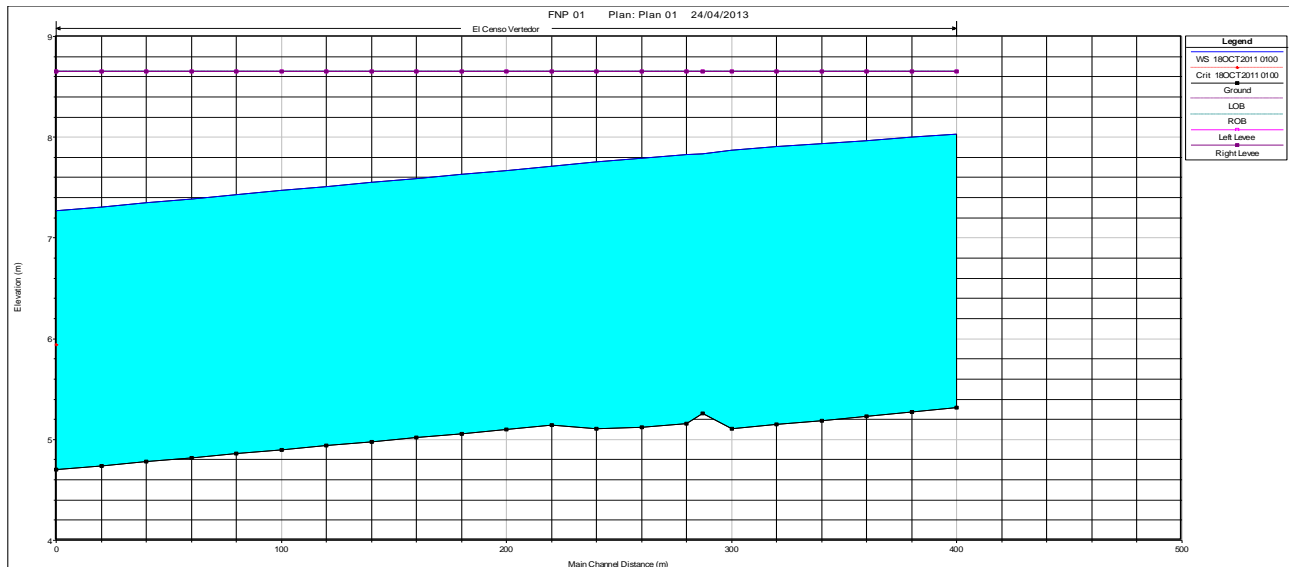


Gráfico 35. Perfil longitudinal del cauce de alivio El Censo para un gasto de 1323.47 m³/s en la estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo.

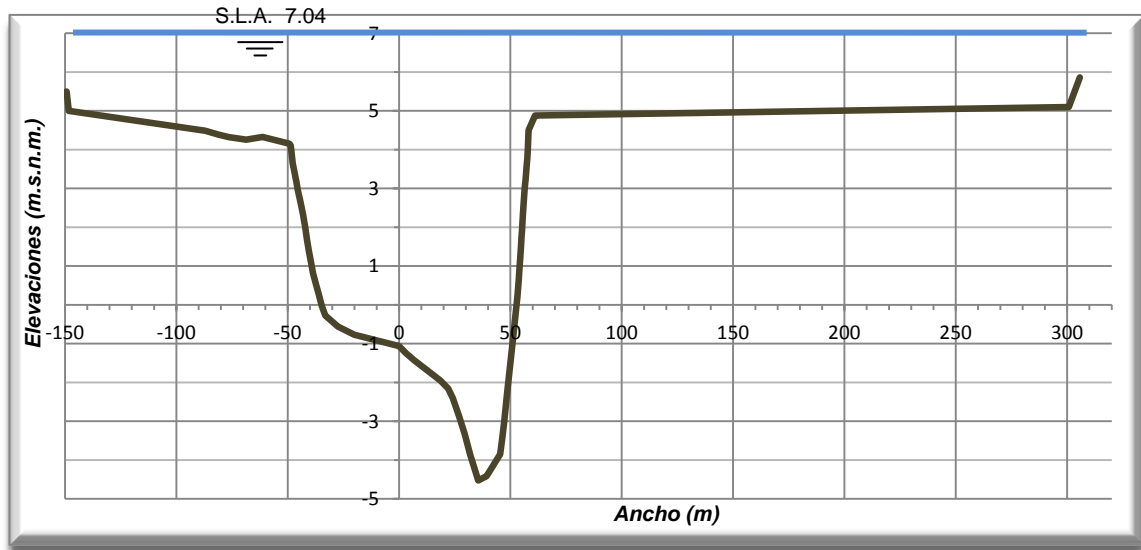
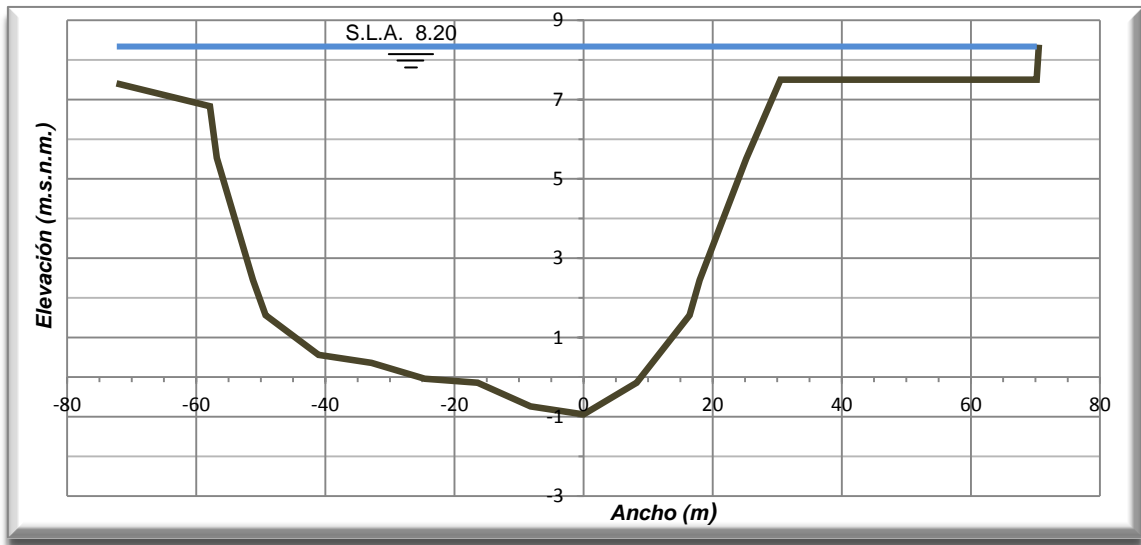


Gráfico 36 y 37. Secciones transversales del río de la Sierra en la estación Pueblo Nuevo y en la última sección aguas abajo a la altura de la colonia Gaviotas respectivamente, para un gasto de 1323.47 m³/s.

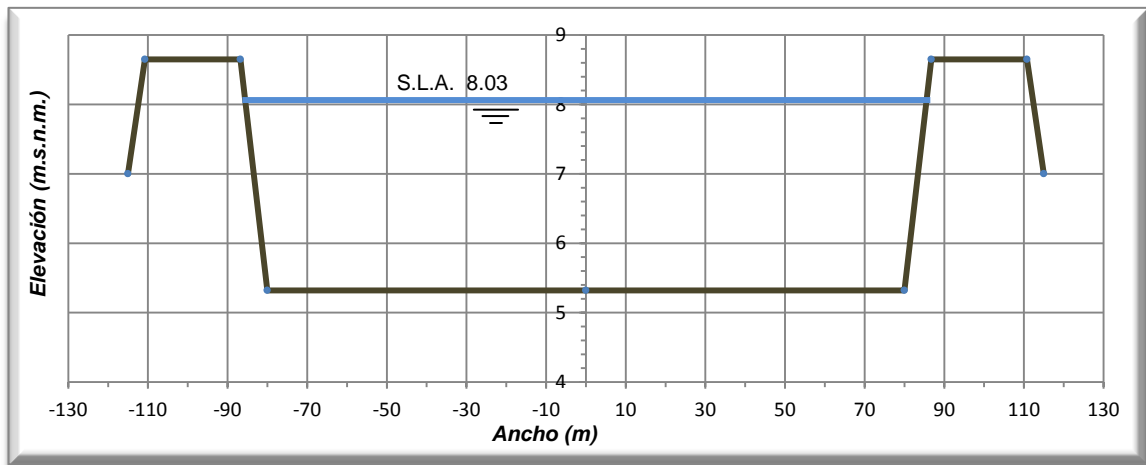


Gráfico 38. Sección transversal de la entrada del cauce de alivio el Censo, cadenamiento 0+400, para un gasto de 1323.47 m³/s en Pueblo Nuevo.



Tabla 16. Resumen de las características hidráulicas de la modelación en condiciones con obra, para el río de la Sierra tramo de Pueblo El Socorro - Colonia Gaviotas y del cauce de alivio el Censo en un tramo de 400 m de longitud, correspondientes a un gasto de 1323.47 m³/s aforado en la estación hidroclimatológica de Pueblo Nuevo.

Sección	Gasto Total (m ³ /s)	Elev. mínima del Canal (m.s.n.m.)	Elevación del Agua (m.s.n.m.)	Tirante Máximo (m)	Velocidad (m/s)	Área Hidráulica (m ²)	Pendiente de Fondo	Número de Froude
Río de la Sierra								
26933.63	1324.04	-1.78	9.09	10.87	1.5	881.42	0.000143	0.17
25026.27	1323.91	-2.8	8.82	11.62	1.53	862.98	0.000129	0.17
22829.54	1323.65	-3.17	8.51	11.68	1.55	851.48	0.000166	0.18
21846.8	1323.47	-0.94	8.2	9.14	1.99	664.51	0.000341	0.26
21116.15	1323.29	-1.48	8.03	9.51	1.68	789.05	0.00013	0.22
18999.55	716.17	-3.12	7.96	11.08	0.88	815.62	0.000053	0.1
17135.79	715.68	-4.04	7.83	11.87	0.98	733.05	0.000062	0.11
15649.13	715.22	-4.46	7.74	12.20	0.92	781.39	0.000063	0.11
13373.42	714.4	-2.2	7.61	9.81	0.89	806.5	0.000062	0.11
12214.62	713.93	-3.02	7.54	10.56	0.84	851.81	0.000056	0.11
9642.83	712.46	-3.09	7.43	10.52	0.67	1062.29	0.00004	0.09
7752.22	711.24	-4.39	7.35	11.74	0.65	1101.73	0.000038	0.09
5747.83	710.12	-4.61	7.28	11.89	0.64	1112.2	0.000032	0.08
3635.27	709.29	-4.31	7.17	11.48	0.86	825.31	0.00006	0.11
1840.01	708.85	-4.54	7.09	11.63	0.7	1005.55	0.000033	0.09
0.00	708.4	-4.53	7.04	11.57	0.57	1234.45		0.08
Cauce de Alivio El Censo								
400	606.88	5.32	8.03	2.71	1.54	394.21	0.001648	0.3
380	606.88	5.27	8	2.73	1.53	396.8	0.001622	0.3
360	606.87	5.23	7.97	2.74	1.53	397.87	0.001606	0.3
340	606.87	5.19	7.93	2.74	1.52	398.98	0.00159	0.3
320	606.86	5.15	7.9	2.75	1.52	400.19	0.001573	0.3
300	606.86	5.11	7.87	2.76	1.51	401.4	0.001756	0.3
287	606.85	5.26	7.83	2.57	1.63	373.26	0.001866	0.33
280	606.85	5.16	7.83	2.67	1.57	387.39	0.001751	0.31
260	606.85	5.12	7.79	2.67	1.56	388.01	0.001777	0.31
240	606.84	5.11	7.76	2.65	1.58	383.71	0.001899	0.32
220	606.84	5.14	7.71	2.57	1.63	372.44	0.001994	0.33
200	606.83	5.1	7.67	2.57	1.63	372.34	0.001995	0.33
180	606.83	5.06	7.63	2.57	1.63	372.2	0.001995	0.33
160	606.82	5.02	7.59	2.57	1.63	372.07	0.001996	0.33
140	606.82	4.98	7.55	2.57	1.63	371.93	0.001997	0.33
120	606.81	4.94	7.51	2.57	1.63	371.8	0.001998	0.33
100	606.81	4.9	7.47	2.57	1.63	371.67	0.001998	0.33
80	606.8	4.86	7.43	2.57	1.63	371.55	0.001999	0.33
60	606.79	4.82	7.39	2.57	1.63	371.42	0.002	0.33
40	606.79	4.78	7.35	2.57	1.63	371.3	0.002	0.33
20	606.78	4.74	7.31	2.57	1.63	371.19	0.002001	0.33
0	606.78	4.7	7.27	2.57	1.64	371.02		0.33

En las figuras anteriores:

- WS = Superficie libre del agua producido por el perfil correspondiente.
- Ground = Fondo del cauce.
- LOB = Margen Izquierda del río.
- ROB = Margen Derecha del río.



Conclusiones del Modelo Matemático en Condiciones con el cauce de Alivio.

Para conocer el comportamiento hidráulico del río de la Sierra en conjunto con el cauce de alivio, se utilizó un modelo matemático especializado en ríos (HEC-RAS). La modelación se llevó a cabo con flujo no permanente y régimen subcrítico.

Se realizó la simulación en el modelo matemático del río de la Sierra en conjunto con el cauce de alivio, el cual se calibro con las mediciones que se tienen en tres puntos diferentes a lo largo del tramo en estudio del río, llegando a tener una calibración aceptable en los sitios: estación Pueblo Nuevo y el cauce de alivio el Censo, sin embargo en el punto de comparación aguas arriba de Sabanilla se encontró que para tener una calibración aceptable se tendrían que sumar 60 cm a las elevaciones medidas en Sabanilla, los cuales corresponden a los mismos 60 cm que se sumaron a las mediciones de Gaviotas, valor que se encontró con la calibración del modelo en condiciones naturales.

El coeficiente de rugosidad "n" de Manning se consideró variable en el río de la Sierra, con un valor de 0.032 en las márgenes y 0.0305 en el cauce principal, mientras que en el cauce de alivio se consideró un coeficiente de 0.050 en toda la sección, este coeficiente de rugosidad en el cauce de alivio puede ser resultado de la cantidad de azolve que este tiene, los valores de la rugosidad surgen de la calibración.

Para los gastos simulados en este trabajo, la velocidad máxima en el río de la Sierra es de 1.99 m/s que corresponde a un gasto 1323.78 m³/s, estas velocidades altas se presentan aguas arriba del cauce de alivio El Censo, lo cual podría estar sucediendo debido a que la estructura al verter agua a la laguna Zapotes disminuye el remanso que tiene el río, provocando un aumento de velocidad en el mismo.

Los números de Froude son menores a 1, con lo cual se corroboró que el régimen del río y del cauce son subcríticos.

III.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS, ENTRE CONDICIONES NATURALES Y CONDICIONES CON CAUCE DE ALIVIO

Se realizó una tercera modelación matemática, con la cual se pretende comparar los perfiles hidráulicos del río de la Sierra en condiciones naturales y con obra construida, conociendo así los efectos del cauce de alivio sobre el río.

Esta tercera modelación matemática, consiste en hacer una simulación del río de la Sierra con su geometría en condiciones naturales pero con el hidrograma aforado en 2011.

- Como condición de frontera aguas arriba del río de la Sierra se colocó el siguiente hidrograma:

Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elev. Pueblo Nuevo	Día	Fecha	Gasto Pueblo Nuevo	Elev. Pueblo Nuevo
Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)	Num	(día)	(m ³ /s)	(m.s.n.m.)
1	10/10/2011	586.97	7.10	9	18/10/2011	1327.00	8.24
2	11/10/2011	984.00	7.97	10	19/10/2011	1256.00	8.21
3	12/10/2011	952.00	7.97	11	20/10/2011	1100.00	8.08
4	13/10/2011	1073.00	8.00	12	21/10/2011	931.00	7.91
5	14/10/2011	923.00	7.87	13	22/10/2011	914.00	7.74
6	15/10/2011	934.00	7.98	14	23/10/2011	896.00	7.56
7	16/10/2011	958.00	8.10	15	24/10/2011	569.00	7.38
8	17/10/2011	958.00	8.10	16	25/10/2011	515.00	7.22
				17	26/10/2011	459.00	7.11

Tabla 17. Valores del hidrograma aforado en la estación Pueblo Nuevo y se ingresó en la condición de frontera aguas arriba.

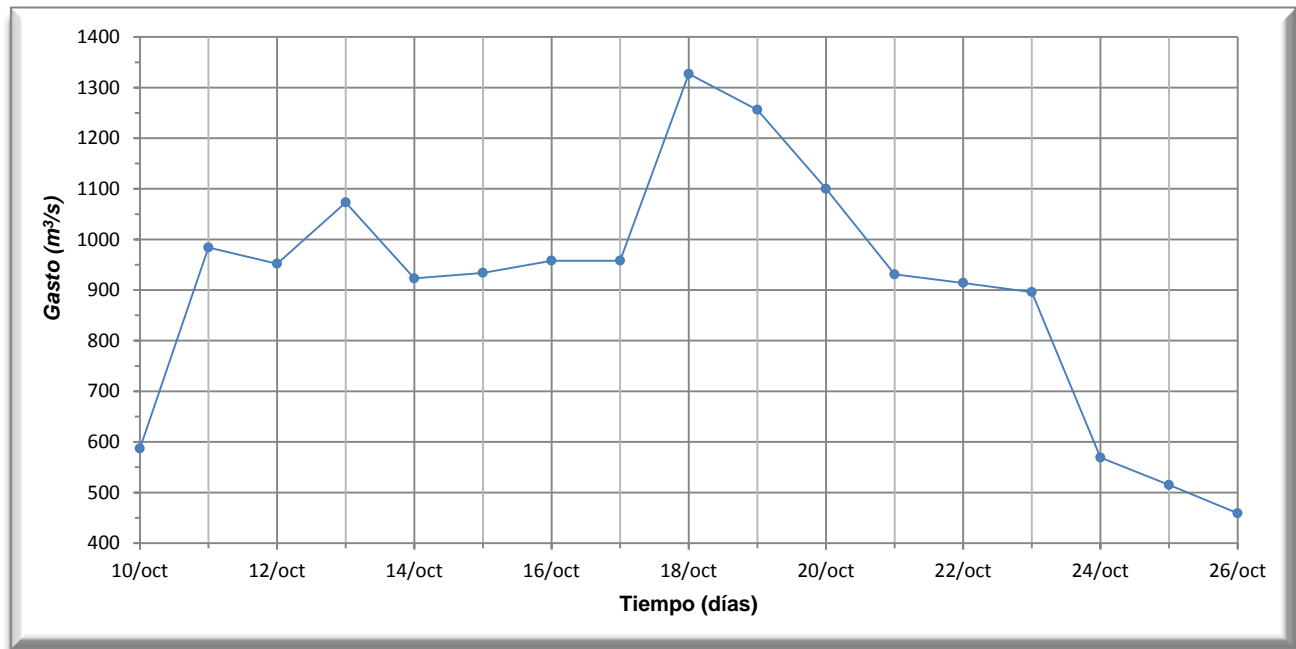


Gráfico 39. Hidrograma aforado en la estación Pueblo Nuevo, el cual se ingreso como condición de frontera aguas arriba del río de la Sierra.



Cabe destacar, que en la condición de frontera aguas abajo del río de la Sierra, se utilizó el limnigrama con el cual se simuló en condiciones con obra, incrementándole 40 cm, esto al suponer que la superficie libre del agua se elevaría, ya que ahora recibe el agua que salía por el Censo.

- Limnigrama colocado como condición de frontera aguas abajo del río de la Sierra; Datos medidos en la estación Gaviotas, a los cuales se le incremento 60 cm, este valor surge debido a la calibración en condiciones naturales y aunado a esto se le sumo 40 cm por considerar que el nivel del agua se elevaría al no tener la estructura El Censo.

Día	Fecha	Elev. En Gaviota (Medidas)	Elev. En Gaviota +0.60 m	Elev. Gaviotas +0.60 y +0.40 (m)	Día	Fecha	Elev. En Gaviota (Medidas)	Elev. En Gaviota +0.60 m	Elev. Gaviotas +0.60 y +0.40 (m)
(Num)	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(Num)	(día)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
1	10/10/2011	5.20	5.80	6.20	9	18/10/2011	6.45	7.05	7.45
2	11/10/2011	5.71	6.31	6.71	10	19/10/2011	6.53	7.13	7.53
3	12/10/2011	5.72	6.32	6.72	11	20/10/2011	6.66	7.26	7.66
4	13/10/2011	5.76	6.36	6.76	12	21/10/2011	6.69	7.29	7.69
5	14/10/2011	5.82	6.42	6.82	13	22/10/2011	6.63	7.23	7.63
6	15/10/2011	5.98	6.58	6.98	14	23/10/2011	6.54	7.14	7.54
7	16/10/2011	6.10	6.70	7.10	15	24/10/2011	6.43	7.03	7.43
8	17/10/2011	6.10	6.70	7.10	16	25/10/2011	6.29	6.89	7.29
					17	26/10/2011	6.17	6.77	7.17

Tabla 18. Elevaciones medidas en la estación Gaviotas y sus respectivos incrementos en las elevaciones.

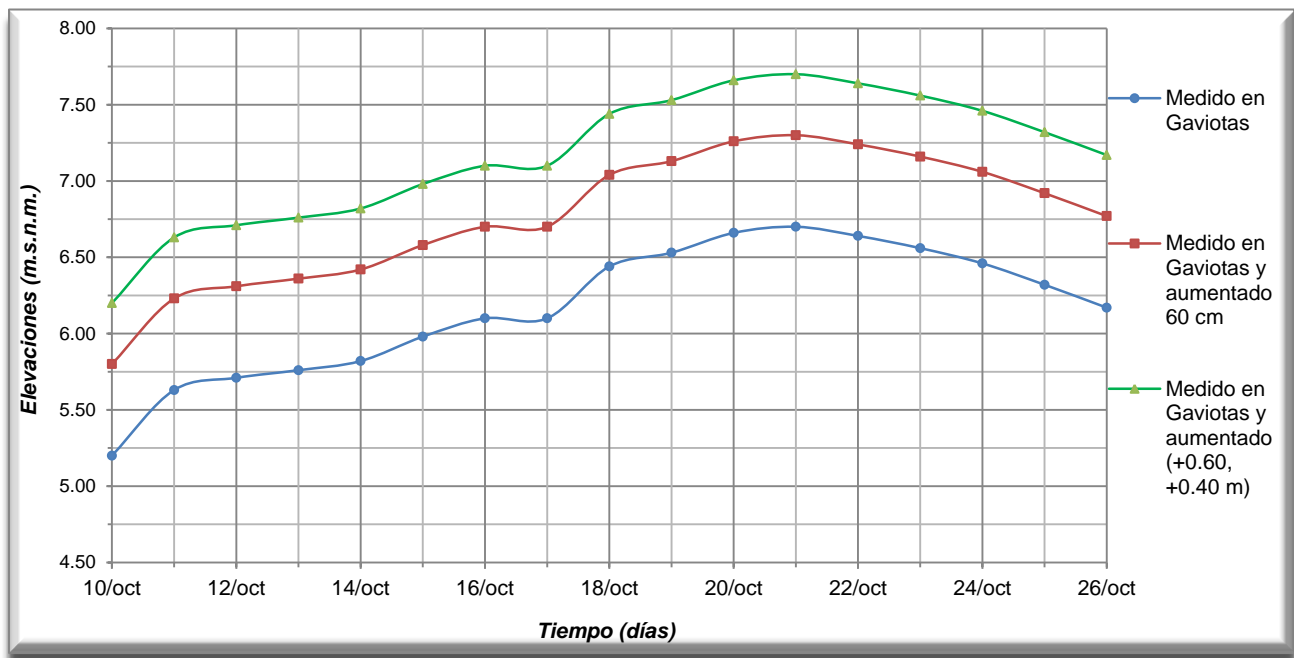


Gráfico 40. Limnigrama medido en la estación Gaviotas y sus respectivos incrementos.

A continuación se muestra el perfil longitudinal del río de la Sierra para un gasto de $1320 \text{ m}^3/\text{s}$, aforado en la estación Pueblo Nuevo, esto para condiciones naturales y con obra construida, en donde se puede observar la comparación de los perfiles de la superficie libre del agua.

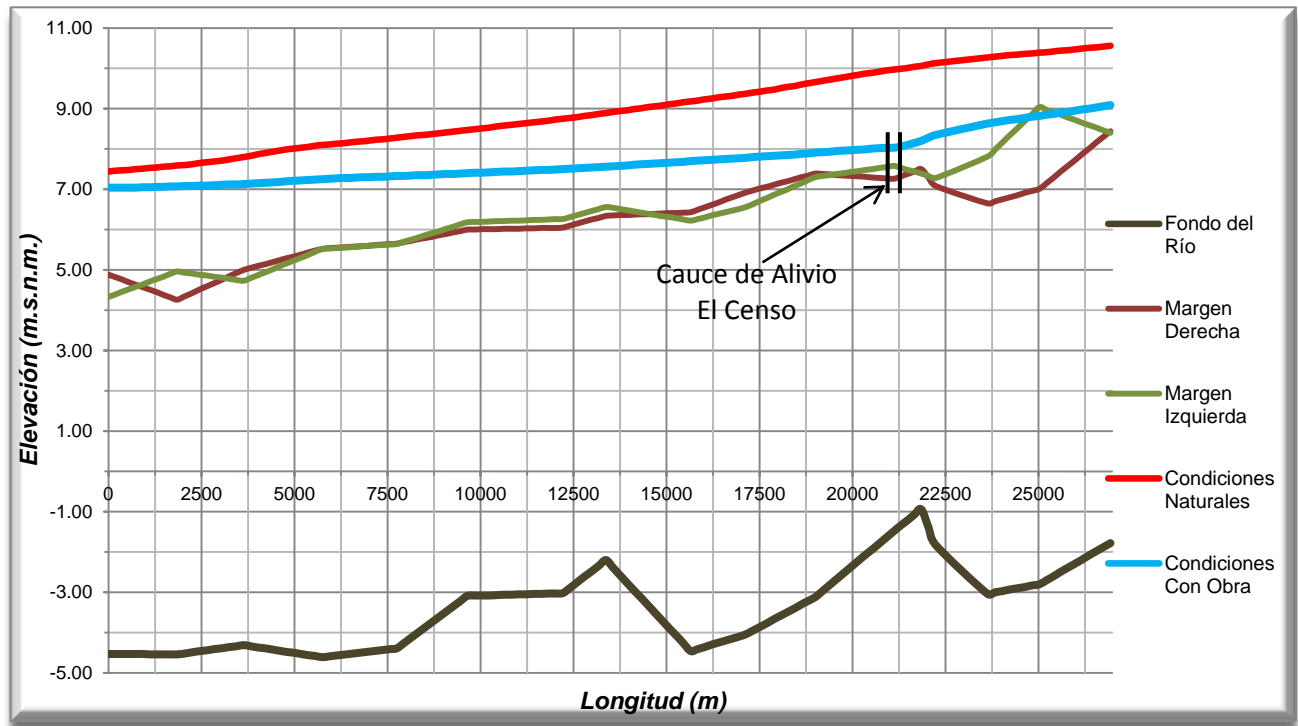


Gráfico 41. Comparativa de los perfiles hidráulicos de condiciones naturales y condiciones con obra.

Es apreciable el descenso de niveles con el cauce de alivio El Censo. Esto se genera tanto aguas abajo del cauce como aguas arriba, debido a que al quitarle agua al río se disminuye el remanso que este tiene, por lo cual ayuda de forma constante.

Por otro lado se puede ver que aun con la obra construida el río desborda, ya que el perfil del agua está por arriba de las márgenes izquierda y derecha, sin embargo otra de las obras construidas por la CONAGUA es la sobreelevación de la margen derecha a la cota 8.50 m.s.n.m. , aunado a esto se tiene otro cauce de alivio "Sabanilla" a la altura del cadenamamiento $12+600$, dicha sobreelevación del bordo y el cauce de alivio Sabanilla no se consideraron en el presente trabajo, debido a que se encuentra fuera de los alcances.



CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cauce de alivio El Censo, fue construido en la margen derecha del río de la Sierra a la altura del poblado El Censo y para conocer el comportamiento hidráulico tanto del río, cauce de alivio y en conjunto se utilizó un modelo matemático especializado en ríos (HEC-RAS), llevando a cabo la modelación en flujo no permanente.

De manera general, como resultado de la comparación de los niveles de la superficie libre del agua de las modelaciones en condiciones naturales y con obra construida, se pueden reducir los niveles máximos alcanzados por el agua en más de 1.50 m a la altura de la estación Pueblo Nuevo, para el gasto máximo que se presentó en el mes de octubre del 2011 de 1327 m³/s.

La calibración de los modelos matemáticos se ajustado con el coeficiente de Manning y el ancho del vertedor, en el río se consideró una rugosidad variable de 0.0305 en el cauce principal y 0.032 en las márgenes, y para el cauce de alivio se considero una rugosidad de 0.050 y un ancho del vertedor de 140 m.

Para el modelo en condiciones naturales, se llegó a tener una calibración adecuada al incrementar 0.60 m las elevaciones de la estación hidroclimatológica Gaviotas, lo mismo sucedió para la calibración del modelo matemático del río de la Sierra en conjunto con el cauce de alivio, en el que también se modificó el ancho del vertedor del cauce de alivio, disminuyéndolo de 200 m. a 140 m., esto por la cantidad de azolve que tiene, para esté modelo se logró tener una calibración adecuada en los puntos de comparación; estación hidroclimatológica Pueblo Nuevo así como en el cauce de alivio el Censo, sin embargo se encontró con las simulaciones que posiblemente las mediciones aguas arriba de Sabanilla están mal referenciadas, ya que al subir las elevaciones medidas de Sanilla 60 cm se tendrían valores muy similares con los resultados del modelo matemático.

Las diferencias de la comparación de los datos aforados y los resultados del modelo en el cauce de alivio van desde los 17 hasta los 131 m³/s, para conocer el motivo de esta diferencia de gastos se tendría que revisar el sitio de la obra (ancho efectivo, pendiente del cauce, obstrucciones, azolve aguas abajo del puente, descarga al dren Juan Gil, etc.), como se mostró en imágenes anteriores el cauce tiene azolve y tapetes de concreto que obstruyen el paso del agua, lo cual podría estar generando un remanso en el cauce.

Se recomienda revisar los posibles efectos en el río de la Sierra debido a la construcción del cauce de alivio, esto aguas arriba del mismo, ya que en el presente trabajo se observó que el cauce de



alivio está aumentando las velocidades en el río de la Sierra, lo cual podría generar un lavado de material provocando el caído de márgenes.

Al igual revisar los puntos de aforo así como los bancos de nivel con los cuales las estaciones están arrojando datos, así como un constante monitoreo y revisión de las mediciones que se están llevando a cabo, con lo que se podrán hacer las correcciones pertinentes oportunamente, esto permitirá que las personas que realizan los estudios y modelaciones tengan información más confiable y por lo tanto los resultados sean más certeros.

Este tipo de estructuras cuya función es mitigar las inundaciones, pueden llegar a dar una idea falsa a la población, la cual piensa que se ha eliminado el riesgo de inundación en vez de pensar que este solo se ha reducido.

Esta idea falsa en la población, provoca que se tengan desarrollos en los terrenos que son vulnerables a la inundación ante precipitaciones atípicas, ya que cada estructura de protección se diseña para determinado gasto.

Por lo cual es necesario complementar estas obras, con una mayor coordinación entre el Sistema Meteorológico Nacional, CONAGUA y Protección Civil, esto con el fin de avisar oportunamente a la población, dando prioridad a la protección de centros de población.

Aunado a esto crear planes de desarrollo urbano que considere crecimientos fuera de zonas de riesgo y en la manera de lo posible modificar las leyes para poder ejecutar dichas acciones.

Son de suma importancia las obras que ha realizado la CONAGUA en Tabasco, las cuales como se vio en los resultados de este trabajo, reducen el riesgo de inundación en el estado, siendo necesario revisar permanentemente el funcionamiento y estado de conservación de la infraestructura, dando el debido mantenimiento en los casos necesarios; un ejemplo es la estructura que se estudio en el presenta trabajo, la cual presenta azolve. Y así como las obras es necesario tener una base de datos históricos, ya que con estos se puede estudiar la evolución del río y en su caso predecir su futuro comportamiento.

El río de la Sierra tiene en su longitud dos cauces de alivio, el primero aguas arriba es El Censo y aguas abajo se encuentra Sabanilla. Se recomienda ampliar el presente trabajo incluyendo ahora la modelación de los dos cauces así como la sobreelevación del bordo de la margen derecha, y de manera integral conocer el comportamiento del río.



Este trabajo tiene la aportación de dar una revisión a las mediciones y aforos que se están llevando a cabo de las obras realizadas en el Plan Hídrico Integral de Tabasco, así como revisar la eficacia de las obras realizadas por la CONAGUA.

Aunado a esto se da a conocer el funcionamiento del río de la Sierra en conjunto con el cauce de alivio, con esto se conoce que está ocurriendo en el tramo del río estudiado y los posibles efectos que podría tener el río debido a la construcción del cauce de alivio.



GLOSARIO

Cauce de Alivio ó Escotadura: Son canales de desvío naturales o artificiales, que envían las aguas fuera de los centros urbanos o áreas pobladas de alta densidad, aguas abajo el agua puede ser devuelta al río.

Cauce Principal: Corriente donde convergen todos los escurrimientos, estructurados por una red de escorrentías a la que se le denomina red hidrológica.

Ecuación de la Energía: Es la ecuación que contiene tres componentes principales, que son la carga de posición, carga de presión y carga de velocidad; se expresa de la siguiente manera:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Estación Hidroclimatológica: Área destinada a la obtención y medición de datos generados por instrumentos que registran los distintos fenómenos meteorológicos que se producen en la atmósfera.

Gasto: Mide la cantidad de volumen de un fluido que pasa por un punto en la unidad de tiempo, su unidad de medida está dada en (m³/s).

Hidrograma: Es el gráfico que muestra la variación del gasto en el tiempo.

Limnigrama: Es el gráfico que proporciona altura del agua en función del tiempo.

Método del Paso Estándar: Este cálculo se lleva a cabo mediante pasos de sección a sección en las cuales se han determinado las características hidráulicas. En tales casos la distancia entre las secciones es conocida y el procedimiento es determinar el tirante del flujo de las estaciones. Tal procedimiento a menudo se lleva a cabo mediante un proceso de prueba y error.

Modelo Matemático: Conjunto de ecuaciones que relacionan las variables del proceso de interés y representan adecuadamente su comportamiento.

Número de Froude: Es un número dimensional, con el cual se conocer el régimen del río, el cual tiene las siguientes características:

Froude = 1; Régimen crítico.

Froude > 1; Régimen supercrítico.

Froude < 1; Régimen subcrítico.



Pérdidas de Energía por Fricción: Hay varias ecuaciones teorías y empíricas, que nos permiten estimar las pérdidas por fricción asociadas con el flujo a través de determinada sección. Entre las de uso más común se encuentran las siguientes:

- Ecuación de Manning: Es la ecuación utilizada por excelencia en el estudio del flujo a superficie libre (aquel en donde el flujo está abierto a la atmósfera, como es el caso de los canales y ríos).
- Ecuación de Darcy-Weisbach: Es una ecuación teórica utilizada para el cálculo de pérdidas por fricción en sistemas operando bajo presión.
- Ecuación de Hazen-Williams: Está es una ecuación empírica de extendido uso en el campo de la ingeniería civil para el cálculo de las pérdidas por fricción en conducciones bajo presión.

Perfil Hidráulico: Es el plano vertical que pasa por el eje hidráulico. En este plano o perfil longitudinal, suelen representarse las magnitudes que caracterizan o definen a la corriente: cotas, velocidades, gasto, etc.

Red Hidrológica: Todo el conjunto de escurrimientos de una cuenca.

Sección Topobatimétrica: Es el levantamiento topográfico de las secciones transversales de un río.

BIBLIOGRAFÍA

- <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/principios-de-la-hidraulica-que-necesitas-conocer-las-perdidas-de-energia-%E2%80%93-parte-i-perdidas-por-friccion/>
- <http://espanol.answers.yahoo.com/question/index?qid=20080131074032AAYQIMk>
- http://212.128.130.23/eduCommons/cienciasexperimentales/hidrologia/contenidos/04.Hidrologia_%20superficial_1.pdf
- Sotelo Ávila, Gilverto, Hidráulica General, Volumen 1 Fundamentos, Editorial: Limusa, Año: 2008.
- Boletín de Información Hidrométrica, Climatológica y de Presas, de la Subgerencia Técnica, Dirección Local Tabasco.
- Información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, referente a la topografía del río de la Sierra y del cauce de alivio El Censo, fotografías e información hidrológica.