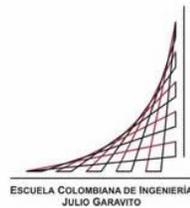


ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO HIDRÁULICO DEL DESVÍO DE  
CAUCES CON TÚNEL, MEDIANTE TEORÍA BÁSICA Y LA HERRAMIENTA  
COMPUTACIONAL HEC RAS

FERNANDO JAVIER ORTIZ PÉREZ



Escuela Colombiana Julio Garavito

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C, septiembre 2020

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO HIDRÁULICO DEL DESVÍO DE  
CAUCES CON TÚNEL, MEDIANTE TEORÍA BÁSICA Y LA HERRAMIENTA  
COMPUTACIONAL HEC RAS

FERNANDO JAVIER ORTIZ PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN  
RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE

ING. GERMÁN SANTOS RICARDO SANTOS GRANADOS. PhD  
DIRECTOR



Escuela Colombiana Julio Garavito

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C septiembre 2020

## AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a Dios y a la vida por esta oportunidad que me dio la familia Escuela Colombiana de Ingeniería en mi crecimiento profesional. Una especial mención al ingeniero Germán Santos por su paciencia en la realización de este trabajo y durante mi estadía como estudiante en el programa.

Dedicación especial a ti Javier, motor de mi vida.

## RESUMEN

En el estado de arte del diseño de obras de desvío tipo túnel para cauces en la construcción de presas, el diseño hidráulico de este tipo de obras comúnmente se realiza mediante hojas de cálculo programadas con la teoría básica de diseño y la modelación física de la obra.

Con el presente trabajo se buscó comparar los resultados arrojados con los análisis de la teoría básica y la utilización de la herramienta computacional Hec-Ras. Para esto, inicialmente se describe la teoría básica de diseño de túnel de desvío y los conceptos fundamentales utilizados por la herramienta computacional Hec-Ras.

Se incluye también consideraciones generales de diseño que se tienen en cuenta para el dimensionamiento de este tipo de obras, basados en recomendaciones de autores y manuales de referencia.

Posteriormente se indica la información base utilizada del caso de estudio y se realizan los análisis con la teoría básica y el software Hec-Ras, con el fin comparar los resultados obtenidos con las dos metodologías y validar las diferencias que se puedan obtener.

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	8
2	OBJETIVOS .....	9
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2	OBJETIVO ESPECIFICOS.....	9
3	ANTECEDENTES .....	10
4	METODOLOGIA.....	11
5	MARCO TEÓRICO.....	12
5.1	TEORÍA BÁSICA.....	12
5.2	CONCEPTOS BÁSICOS EN HEC – RAS .....	21
5.2.1	Ecuación de energía.....	22
5.2.2	Flujo no permanente.....	25
6	CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN EL ESTADO DEL ARTE PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE TUNÉL DE DESVIO DE CAUCES.....	26
7	INFORMACIÓN BÁSICA UTILIZADA .....	29
8	DISEÑO HIDRÁULICO CON TEORÍA BÁSICA .....	32
8.1	CURVA DE CAPACIDAD DE DESCARGA .....	32
8.2	DATOS DE ENTRADA.....	33
8.2.1	Funcionamiento a superficie a libre .....	34
8.2.2	Fase en transición .....	35
8.2.3	Funcionamiento a presión .....	35
8.2.4	Curva de capacidad de descarga.....	36
8.3	TRÁNSITO DE LA CRECIENTE POR EL TÚNEL .....	38
9	DISEÑO HIDRÁULICO CON LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HEC RAS.....	42
9.1	SIMULACIÓN CON EL MODULO CULVERT .....	43
9.1.1	Simulación en condición de flujo permanente .....	47
9.1.2	Simulación en condición de flujo no permanente .....	50
9.2	SIMULACIÓN CON EL MODULO ADD A LID TO XS .....	53
9.2.1	Simulación en condición de flujo permanente .....	53

9.3	Simulación en condición de flujo no permanente .....	55
10	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	57
10.1	Análisis de resultados en flujo permanente .....	57
10.2	Análisis de resultados en flujo no permanente .....	59
11	CONCLUSIONES.....	60
12	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## LISTAS DE TABLAS

Tabla 1. Valores de fin tramo a superficie libre e inicio de presión.....	37
Tabla 2. Tránsito de la creciente de diseño.....	39
Tabla 3. Caudales simulados .....	47
Tabla 4. Resumen de características hidráulicas en el túnel .....	48

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Perfil hidráulico en el túnel para $h < Y_t$ y $Y_t > Y \geq Y_c$ .....	14
Figura 2. Perfil hidráulico en el túnel para $1.5Y_t > h > Y_t$ y $Y_t > Y \geq Y_c$ .....	15
Figura 3. Perfil hidráulico en el túnel para $h > 1.5Y_t$ y $Y_t > h \geq Y_c$ .....	17
Figura 4. Perfil hidráulico en el túnel para $h > 1.5Y_t$ y $Y_t = h = Y_c$ .....	18
Figura 5. Perfil hidráulico en el túnel para $h > 1.5Y_t$ y $Y_t < Y$ .....	18
Figura 6. Esquema del flujo a superficie libre en régimen supercrítico .....	19
Figura 7. Esquema del flujo a presión régimen supercrítico.....	20
Figura 8. Representación gráfica del balance de energía .....	23
Figura 9. Distribución de la sección para estimar el factor de transporte .....	24
Figura 10. Ponderación de la energía cinética .....	24
Figura 11. Hidrogramas de entrada y salida a un volumen de almacenamiento. ...	28
Figura 12. Vista en planta de la topografía del cauce utilizada .....	29
Figura 13. Localización del túnel de desvío .....	30
Figura 14. Sección transversal adoptada del túnel de desvío .....	30
Figura 15. Hidrograma de diseño .....	31
Figura 16. Curva de capacidad del cauce aguas arriba del túnel.....	33
Figura 17. Curva de capacidad del cauce en la entrega del túnel.....	34
Figura 18. Curva de capacidad de descarga del túnel con diámetro 5,6 m.....	37
Figura 19. Hidrograma de entrada y salida .....	41
Figura 20. Principales componentes del programa Hec-Ras .....	42
Figura 21 Planteamiento ecuación de energía en Culvert, Hec - Ras.....	44
Figura 22. Configuración en planta en Hec-Ras.....	46
Figura 23. Sección transversal del túnel .....	46
Figura 24. Ventana de ingresos de datos de caudal – régimen permanente .....	47
Figura 25. Ventana de ingreso de condiciones de contorno régimen permanente	47
Figura 26. Venta de simulación régimen permanente .....	48
Figura 27. Curva de descarga del túnel – opción Culvert.....	49
Figura 28. Condiciones de contorno en régimen variable .....	50
Figura 29. Ventana de simulación .....	51
Figura 30. Curva de descarga del túnel – Hec Ras.....	51
Figura 31. Hidrograma obtenido en el túnel – Hec Ras.....	52
Figura 32. Resumen de los resultados de la simulación en el túnel – Hec Ras ....	52
Figura 33. Ventana de edición de secciones – opción Add a lid to XS.....	53
Figura 34. Perfil de la línea piezométrica y de energía, en un conducto con tapa	54
Figura 35. Curva de descarga túnel con tapa – flujo permanente.....	55
Figura 36. Curva de descarga túnel con tapa – flujo no permanente .....	56
Figura 37. Curva de caudal vs altura de flujo .....	57
Figura 38. Curva de descargas Teórica vs Hec Ras .....	58
Figura 39. Hidrogramas resultantes del tránsito en el túnel, Teoría vs Hec Ras... 59	59

## LISTAS DE ANEXOS

Anexo 1. Memorias hoja de cálculo.....	63
Anexo 2. Memoria de cálculo del Hec Ras.....	64

## 1 INTRODUCCIÓN

Como parte de los requisitos para obtener el título de especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, se debe realizar un trabajo de grado enfocado en alguna de las cuatro áreas que ofrece el programa.

En el presente trabajo de grado se realiza un análisis comparativo entre los cálculos hidráulicos con la teoría fundamental apoyados en hoja de cálculo y la herramienta computacional del programa HEC-RAS del cuerpo de ingenieros militares de los Estados Unidos, en el diseño hidráulico para túnel de desvío de cauce.

En la concepción de grandes obras hidráulicas como lo son las presas, independiente de su uso, ya sea, para aprovechamiento energético, riego, abastecimiento de poblaciones o recreativo, para su construcción y emplazamiento sobre un cauce natural es vital darle el mejor manejo o derivación de la corriente, con el fin de ejecutar de la mejor manera las actividades de construcción.

El sistema de derivación de las corrientes dependerá del tipo y envergadura de la presa proyectada y de los caudales naturales del cauce.

El método de derivación que se escoja dependerá de un análisis económico, que tome en cuenta el costo de las obras de derivación y de los riesgos asociado. Buscando minimizar los daños que se puedan producir por un eventual fallo de las obras de derivación.

Por lo tanto, en los análisis resulta importante, conocer las características del cauce, el caudal de diseño que se defina y el sistema de derivación.

## **2 OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

El principal objetivo del presente trabajo es presentar los fundamentos teóricos del diseño hidráulico del túnel de desvío de cauce y, el análisis comparativo del diseño utilizando hoja de cálculo y la herramienta computacional HEC-RAS, de un caso de estudio.

### **1.2 OBJETIVO ESPECIFICOS**

- Identificar la teoría hidráulica de diseño de desvío de cauces.
- Conocer las consideraciones de diseño hidráulico para el desvío de cauces.
- Simulación de un caso de estudio de desviación de cauce en túnel, mediante hoja de cálculo y la herramienta computacional HEC-RAS.
- Comparar los resultados obtenidos mediante hoja de cálculo y la herramienta computacional HEC-RAS.

### 3 ANTECEDENTES

Entre los aspectos importantes de la construcción de proyectos de grandes infraestructuras como las presas, está la derivación del cauce, ya sea a un lado o a través del emplazamiento de la presa. La magnitud de las obras de desvío del cauce estará en función del caudal, de la geomorfología de la zona de ubicación de la presa, del tipo de presa y de las obras auxiliares (Vertedero, captación, conducciones, etc.). El objetivo es elegir el método de desvío óptimo en cuanto a viabilidad técnica - ambiental, costos y riesgos asociados.

Entre los métodos comunes de derivación de cauces para construcción de presas se pueden citar: túneles perforados en las laderas del cauce, ductos debajo o a través de la presa, canales provisionales, derivaciones a diferentes niveles en el caso de presas en concreto.

En el caso del desvío mediante túneles, son muy útiles en el caso de secciones del río muy angostas, donde el cauce se deriva por un costado ya sea por un estribo o por los dos estribos de la sección de construcción de la presa. En algunos casos, cuándo entre las obras asociadas se proyectan obras de toma, descarga de fondo o vertedero de excedencias, el conducto de desviación se puede utilizar posteriormente para alguna obra asociada. En función de la calidad de la roca donde se planteó el túnel, se estudiará la necesidad de reforzar el ducto con revestimiento para conservar la estabilidad de este. En el caso de requerir revestimiento la sección de excavación del túnel será mayor a la hidráulica requerida.

## 4 METODOLOGIA

Para la ejecución de los trabajos se desarrollaron las siguientes actividades:

- Se determinaron las variables de diseño bases para las simulaciones.
- Se establecieron las condiciones geométricas del túnel de estudio.
- Se realizaron las modelaciones con la hoja de cálculo y el HEC-RAS.
- Se realizaron los respectivos análisis comparativos en los resultados obtenidos.
- Finalmente se plantearon las conclusiones de los análisis realizados.

## 5 MARCO TEÓRICO

El desvío de cauces a través de túneles obedece básicamente a lo estrecho del valle donde se desea emplazar el cuerpo de la presa.

El comportamiento hidráulico del túnel está enmarcado en la teoría del flujo gradualmente variado y se diseñan para flujo a presión o superficie libre. Los túneles se pueden diseñar para que trabajen en condición de flujo subcrítico o supercrítico, todo dependerá de las condiciones de localización y particularidades del cauce. Como consideraciones del análisis, se debe comenzar con caudales pequeños e ir aumentado progresivamente con el fin de simular condiciones de flujo a superficie libre, condiciones de entrada y salida ahogada, con el fin de obtener la curva de descarga del conducto, en el caso de presentarse distintos eventos. En el caso común de análisis la teoría supone que el régimen del flujo aguas arriba del túnel es lento.

### 5.1 TEORÍA BÁSICA

A continuación, se describe la teoría de análisis para los tipos de régimen de flujo que se pueden presentar en el túnel, en el caso de régimen lento (Comisión Federal de Electricidad de México, 1983).

- 1) El caso en que el desvío tenga pendiente tales que su pendiente sea menor que la crítica ( $S_0 < S_c$ ), que la profundidad del río sea menor que la altura del túnel ( $h < Y_t$ ) y que el tirante a la salida sea a superficie libre y mayor que el crítico ( $Y_t > Y \geq Y_c$ ), se aplican las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli desde la sección de la salida hacia aguas arriba para determinar la  $h$  para cada gasto, mediante la Ecu. 1 y Ecu. 2. En la Figura 1 se presenta de manera gráfica lo anteriormente descrito.

$$Y_e + \frac{Q^2}{2gA_e^2} = Y_c + \frac{Q^2}{2gA_c^2} + \left(\frac{V_m n}{R_m^{2/3}}\right)^2 L - S_0 L \quad \text{Para } Y = Y_c \quad \text{Ecu. 1}$$

$$Y_e + \frac{Q^2}{2gA_e^2} = Y + \frac{Q^2}{2gA^2} + \left(\frac{V_m n}{R_m^{2/3}}\right)^2 L - S_0 L \quad \text{Para } Y > Y_c \quad \text{Ecu. 2}$$

Donde:

$Y_e$  = Tirante inmediatamente después de la entrada del túnel, (m).

$Q$  = Caudal de diseño, (m<sup>3</sup>/s).

$g$  = Aceleración de la gravedad, (m/s<sup>2</sup>).

$A_e$  = Área hidráulica correspondiente al tirante  $Y_e$ , (m<sup>2</sup>).

$A_c$  = Área hidráulica correspondiente al tirante crítico  $Y_c$ , (m<sup>2</sup>).

$V_m$  = Velocidad promedio entre las velocidades a la salida del túnel y del tirante  $Y_e$ , (m/s).

$n$  = Rugosidad de Manning.

$R_m$  = Radio hidráulico promedio entre los radios hidráulicos de la salida del túnel y del tirante  $Y_e$ , (m).

$A$  = Área hidráulica correspondiente al  $Y$ , en m<sup>2</sup>.

$S$  = Pendiente de la solera del túnel.

$S_c$  = Pendiente crítica del túnel.

$h$  = Altura del flujo en el río antes de la entrada del túnel medido desde la plantilla del túnel en la sección de entrada, en m.

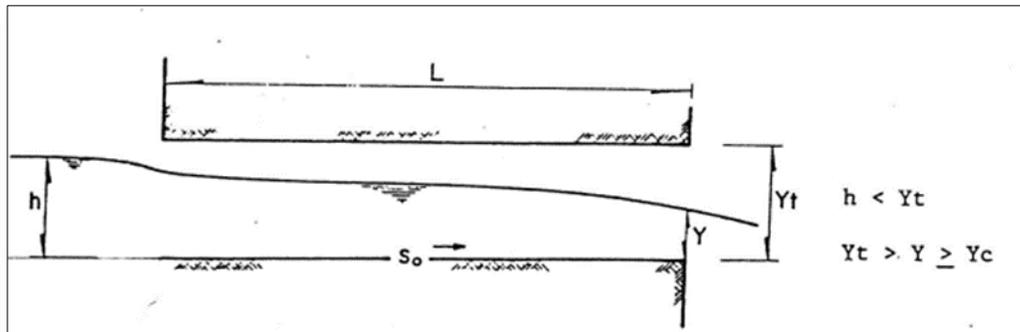
$Y_t$  = Altura del flujo a tubo lleno, en m.

$Y$  = Altura del flujo a la salida del túnel, en m.

$Y_c$  = Altura crítica, en m.

$L$  = Longitud del túnel, en m.

Figura 1. Perfil hidráulico en el túnel para  $h < Y_t$  y  $Y_t > Y \geq Y_c$



Fuente: Comisión Federal de Electricidad, México.

Igualmente se deben calcular las características hidráulicas del túnel en la sección inmediata después de la entrada, para conocer la altura de flujo en la entrada se utiliza la Ecu. 3.

$$h + \frac{Q^2}{2gA_r^2} = Y_e + (1 + K_e) \frac{Q^2}{2gA_e^2} \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde:

$A_r$  = Área hidráulica del río, en m.

$K_e$  = Coeficiente de entrada, se considera de 0.15, para bordes angulados y de 0.015 bordes redondeados.

- 2) El caso en que el desvío tenga pendiente tales que  $S_o < S_c$ ,  $1.5Y_t > h > Y_t$  y  $Y_t > h \geq Y_c$ , se aplican las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli desde la sección de la salida hacia aguas arriba para determinar la  $Y_e$  para cada gasto, mediante la Ecu. 4 y Ecu. 5. En la Figura 2 se presenta de manera gráfica lo anteriormente descrito.

$$Y_e + \frac{Q^2}{2gA_e^2} = Y_c + \frac{Q^2}{2gA_c^2} + \left(\frac{V_m n}{R_m^{2/3}}\right)^2 L - S_0 L \quad \text{Para } Y = Y_c \quad \text{Ecu. 4}$$

$$Y_e + \frac{Q^2}{2gA_e^2} = Y + \frac{Q^2}{2gA^2} + \left(\frac{V_m n}{R_m^{2/3}}\right)^2 L - S_0 L \quad \text{Para } Y > Y_c \quad \text{Ecu. 5}$$

Para conocer la altura de flujo en la entrada se utiliza la Ecu. 6.

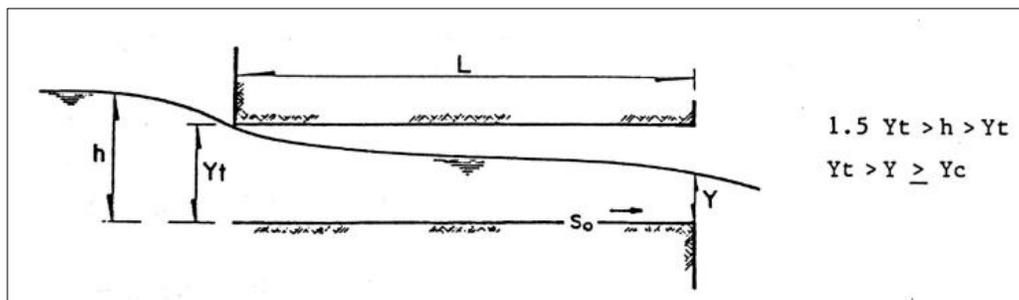
$$h + \frac{Q^2}{2gA_r^2} = Y_e + (1 + K_e) \frac{Q^2}{2gA_e^2} \quad \text{Ecu. 6}$$

Donde:

$K_e$  = Coeficiente de entrada, se considera de 0.25, para bordes angulados y de 0.025 bordes redondeados.

Sin embargo, se debe verificar para cada caudal que  $h < 1.5Y_t$  para aceptar el análisis planteado en este segundo caso.

Figura 2. Perfil hidráulico en el túnel para  $1.5Y_t > h > Y_t$  y  $Y_t > Y \geq Y_c$



Fuente: Comisión Federal de Electricidad, México.

- 3) El caso en que el desvío tenga pendiente tales que  $S_0 < S_c$ ,  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t > h \geq Y_c$ , se aplica primero la ecuación de energía entre la sección de salida y la intermedia del túnel en donde termina el ahogamiento del mismo, la posición de la sección de ahogamiento no se conoce y es lo que primero se determina mediante la Ecuación 4 y Ecuación 5, teniendo en cuenta las siguientes premisas.

Si la altura de flujo a la salida  $Y = Y_c$ , se tiene que:

$$Y_t + \frac{Q^2}{2gA_t^2} = Y_c + \frac{Q^2}{2gA_c^2} + \left( \frac{V'_m n}{R'_m \frac{2}{3}} \right)^2 (L - l) - S_0(L - l) \quad \text{Para } Y = Y_c \quad \text{Ecu. 7}$$

En caso, que la altura de flujo a la salida  $Y > Y_c$ , se tiene que:

$$Y_t + \frac{Q^2}{2gA_t^2} = Y_c + \frac{Q^2}{2gA^2} + \left( \frac{V'_m n}{R'_m \frac{2}{3}} \right)^2 (L - l) - S_0(L - l) \quad \text{Para } Y > Y_c \quad \text{Ecu. 8}$$

Y según sea el caso, se debe despejar  $l$ .

Donde:

$A_t$  = Área hidráulica para sección llena, (m<sup>2</sup>).

$V_t$  = Velocidad para sección llena, (m/s).

$R_t$  = Radio hidráulico para sección llena, (m).

$l$  = Longitud del túnel que trabaja a sección llena, (m).

$V'_m$  = Velocidad promedio entre la velocidad a la salida del túnel y la de sección llena, (m/s).

$R'_m$  = Radio hidráulico promedio entre el radio hidráulico a la salida del túnel y el de sección llena, (m).

Seguidamente, se aplica la ecuación de energía entre la sección donde termina el ahogamiento y el cauce, mediante la Ecu. 9.

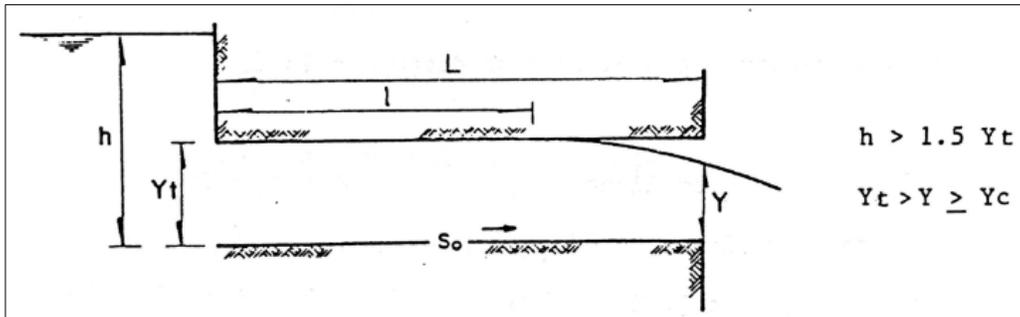
$$h + \frac{Q^2}{2gA_r^2} = Y_t + (1 + K'_e) \frac{Q^2}{2gA_t^2} + \left( \frac{V_t n}{R_t \frac{2}{3}} \right)^2 (l) - S_0(l) \quad \text{Para } Y > Y_c \quad \text{Ecu. 9}$$

Donde:

$K_e$  = Coeficiente, que se considera 0.5, para bordes angulados y de 0.08 bordes redondeados.

La altura de flujo  $h$  se determina por tanteo. En la Figura 3 se describe las condiciones de flujo anteriormente expuesto.

Figura 3. Perfil hidráulico en el túnel para  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t > h \geq Y_c$



Fuente: Comisión Federal de Electricidad, México.

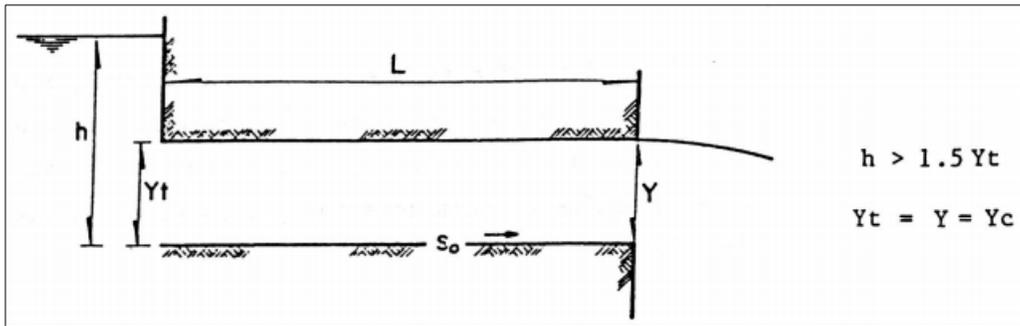
Cuando las alturas de flujo aguas arriba del túnel comienzan a subir, el túnel se ahoga parcialmente.

- 4) El caso en que el desvío tenga pendiente tales que  $S_0 < S_c$ ,  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t = h = Y_c$ , se asume que el túnel estará totalmente ahogado y el  $h$  se determinará por tanteos, mediante la Ecu. 10.

$$h + \frac{Q^2}{2gA_r^2} = Y_t + (1 + K'_e) \frac{Q^2}{2gA_t^2} + \left( \frac{V_t n}{R_t^{2/3}} \right)^2 (l) - S_0(l) \quad \text{Ecu. 10}$$

A partir de ciertos valores de alturas de flujo aguas arriba del túnel, el túnel se ahoga totalmente y para alturas mayores lo único que aumenta es la velocidad del flujo. En la Figura 4 se describe las condiciones de flujo expuestas anteriormente.

Figura 4. Perfil hidráulico en el túnel para  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t = h = Y_c$



Fuente: Comisión Federal de Electricidad, México.

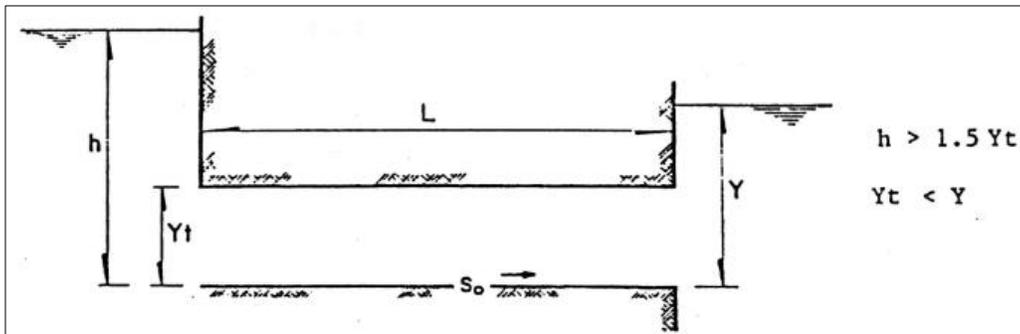
- 5) El caso en que el desvío tenga pendiente tales que  $S_0 < S_c$ ,  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t < Y$ , el  $h$  se determinará por tanteos, mediante la Ecu. 11 y en la Figura 5 se presenta las condiciones de flujo para el caso de análisis.

$$h + \frac{Q^2}{2gA_r^2} = Y_t + (K'_e) \frac{Q^2}{2gA_t^2} + \left( \frac{V_t n}{R_t^{2/3}} \right)^2 (L) + \left( \frac{1}{A_t} - \frac{1}{A_r} \right)^2 \left( \frac{Q^2}{2g} \right) - S_0(L) \quad \text{Ecu. 11}$$

Donde:

$K_e$  = Coeficiente, que se considera 0.5, para bordes angulados y de 0.08 bordes redondeados.

Figura 5. Perfil hidráulico en el túnel para  $h > 1.5Y_t$  y  $Y_t < Y$



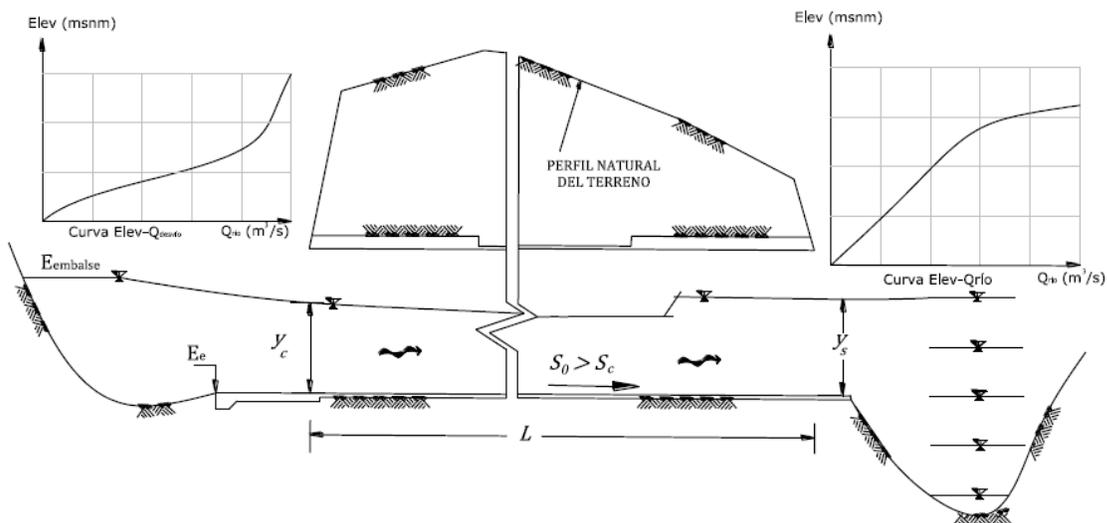
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, México.

En el caso de un régimen de flujo supercrítico, el agua tiende a fluir de manera rápida con su tirante normal, para los análisis se recomienda:

- Estimar el caudal: Suponiendo que el tirante crítico se presenta a la entrada del túnel, se determina el caudal descargado.
- En el caso de régimen de flujo supercrítico puede existir la posibilidad que en el túnel se presente un resalto hidráulico, presentándose el tirante crítico a la salida (Ver Figura 6)
- Para estimar la altura de flujo a la entrada se aplica la ecuación de la conservación de energía entrada del túnel y la sección del cauce o embalse aguas arriba del túnel.
- Para estimar el perfil de flujo en el túnel se utiliza la ecuación de energía que se expresa mediante la Ecu. 12.

$$E_1 = E_2 + \Delta h_f - \Delta Z \quad \text{Ecu. 12}$$

Figura 6. Esquema del flujo a superficie libre en régimen supercrítico

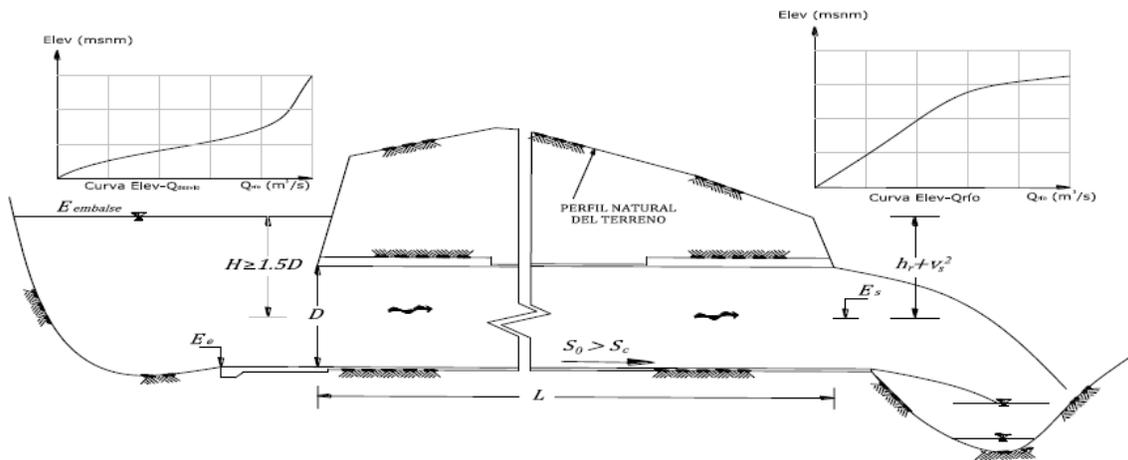


Fuente: Instituto de ingeniería, UNAM México.

Finalmente, la altura de flujo en la entrada se estima sumando la altura de flujo, la cabeza de velocidad y la pérdida por entrada.

En el caso que el túnel las condiciones del flujo lo presuricen, se puede presentar que la descarga sea libre o esta ahogada, Ver Figura 7.

Figura 7. Esquema del flujo a presión régimen supercrítico



Fuente: Instituto de ingeniería, UNAM México.

Para la estimación del caudal se realiza el procedimiento anterior y la ecuación de energía se expresa mediante la Ecu. 13.

$$E_{EMBALSE} = E_{SALIDA} + Y_S + \frac{V_S^2}{2g} + \sum h_r \quad \text{Ecu. 13}$$

Donde:

$E_{SALIDA}$  = Es la elevación de altura de flujo a la salida

$Y_S$  = Es la altura de flujo a la salida y se estima mediante la siguiente expresión

$$Y_S = 1,015(D_e) - \frac{0,20}{A} \sqrt{\frac{D_e}{g}} Q$$

$h_r$  = Es la pérdida de energía

Para determinar el nivel de flujo a la entrada la ecuación de energía se expresa en función del caudal, mediante la siguiente expresión

$$E_{EMBALSE} = 1,015D_{ei} - \frac{0,2}{A_i} \sqrt{\frac{D_{ei}}{g}} + \frac{Q_S^2}{2gA_i^2} \left[ 1 + 2g \frac{n^2 l_i}{A^2 R_h^{\frac{4}{3}}} + k_{con} + k_{ei} + k_{cdir} + 1,2 \left[ (1 - \beta^2) + \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right)^2 \right] \right] + E_{Salida}$$

## 5.2 CONCEPTOS BÁSICOS EN HEC – RAS

Para la simulación de flujo gradualmente variado en régimen permanente el modelo computacional HEC-RAS realiza análisis a partir de la ecuación de balance de energía entre dos secciones dadas, exceptuando las simulaciones de puentes, vertederos o alcantarillas etc. donde resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.

El modelo computacional HEC-RAS en su versión actual permite la simulación de flujo no permanente en una y dos dimensiones, sin embargo, para el presente trabajo se considerará simulación en una dimensión. En el caso de flujo unidimensional se considera una sola componente de la velocidad en el sentido del movimiento y las otras direcciones vertical y transversal despreciables.

El modelo para el análisis unidimensional contiene tres componentes:

- Simulación en régimen permanente gradualmente variado la estimación del perfil de flujo puede simular en régimen lento, rápido y combinación de los dos. Para el cálculo utiliza el método de balance de energía entre dos secciones dadas por el método iterativo paso a paso. Las pérdidas de energía las estima a partir de la ecuación de Manning y utiliza por defecto coeficientes de pérdida localizadas por expansión y contracción. La ecuación

de cantidad de movimiento se utiliza en el caso de flujo en régimen rápidamente variado, hidráulicas de puentes y confluencias de ríos.

- Simulación en régimen no permanente.
- Simulación de transporte de sedimentos.

El modelo cuenta con interfaz gráfica donde los componentes están separados, a continuación, se realiza una descripción general de los conceptos básicos del programa\*.

### 5.2.1 Ecuación de energía

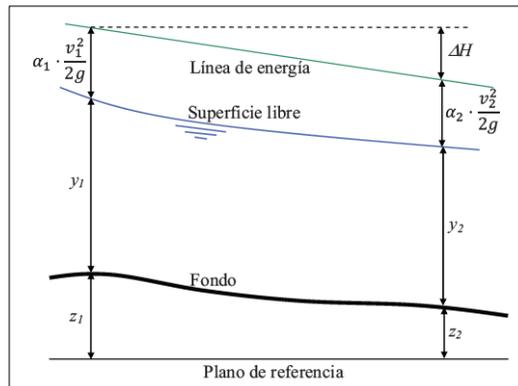
La ecuación básica para el análisis a superficie libre en régimen permanente la ecuación del balance de energía considera que la pendiente longitudinal del río es tan pequeña y que la vertical y la perpendicular en un punto cualquiera coincidan. Si la sección 1 es una sección aguas arriba de la 2, HEC-RAS considera el balance de energía entre ambas secciones transversales como se presenta en la Ecu. 14 y Figura 8.

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad \text{Ecu. 14}$$

---

\* Para el detalle de las teorías y funcionalidades del modelo computacional HEC-RAS, consultar el Hydraulic Reference Manual del programa.

Figura 8. Representación gráfica del balance de energía



Fuente: Manual Hec-Ras.

Donde:

$z_1$  y  $z_2$  Cota de la sección respecto a un plano de referencia arbitrario.

$y_1$  e  $y_2$  Calados en cada una de las secciones consideradas.

$v_1$  y  $v_2$  Velocidades medias en cada sección.

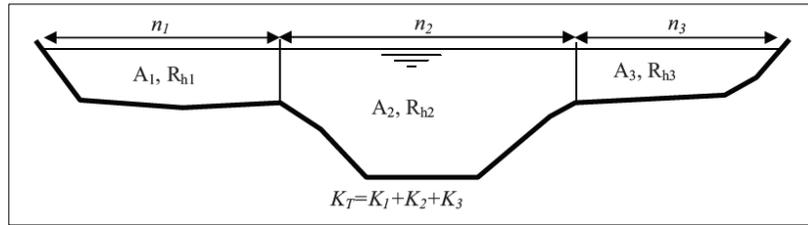
$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  Coeficientes de Coriolis estimados en cada sección.

$\Delta H$  La energía por unidad de peso que se disipa entre las secciones.

Por otra parte, el modelo HEC – RAS permite representar la sección caracterizándola según las llanuras de inundación derecha, izquierda y el cauce principal, por lo que cada una se representa con su valor de coeficiente de Manning y distancia a la sección aguas abajo.

El factor de transporte el modelo lo calcula subdividiendo la sección acorde con el cambio del coeficiente de Manning, en la Figura 9 se ilustra la subdivisión.

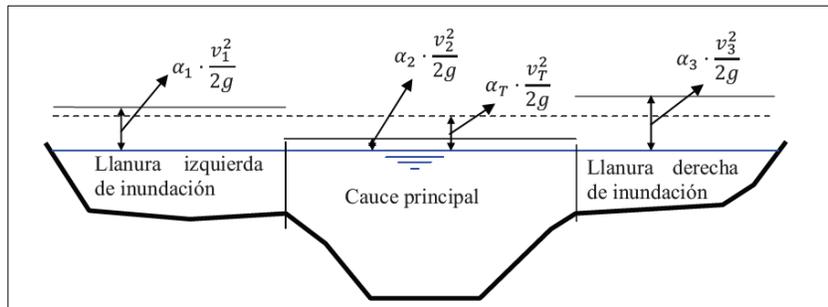
Figura 9. Distribución de la sección para estimar el factor de transporte



Fuente: Manual Hec-Ras

Para el coeficiente de Coriolis el modelo realiza una aproximación, mediante de un procedimiento que pondera la energía cinética dentro de la sección, en la Figura 10 se presenta la configuración de la ponderación.

Figura 10. Ponderación de la energía cinética



Fuente: Manual Hec-Ras

Las pérdidas localizadas el modelo las considera por defecto y corresponden a pérdidas por ensanchamiento y contracción y, se expresa mediante la Ecu. 15.

$$\Delta H_{LOCAL} = \lambda \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecu. 15}$$

Donde  $\lambda$  es el coeficiente de pérdidas de carga localizadas, por defecto Hec-Ras considera 0.1 en el caso de existir contracción y 0.3 en el caso de expansión.

### 5.2.2 Flujo no permanente

Para la modelación numérica de flujo no permanente se deben resolver las ecuaciones de Saint Venant. Se deducen de las ecuaciones de la física de conservación de la masa y de la conservación de cantidad de movimiento de un flujo unidimensional que varía con el tiempo.

En el caso de los problemas generales de hidráulica e hidráulica fluvial, en particular el análisis está enmarcado en una dimensión, por ser una aproximación adecuada en la mayoría de los casos.

Para el caso del estudio unidimensional las ecuaciones de Saint Venant se pueden obtener tomando en cuenta las siguientes premisas: 1) de la ecuación bidimensional eliminar la dimensión *y transversal*, lo que supone un promedio del ancho. 2) obtener las ecuaciones utilizando las leyes de conservación de la masa y cantidad de movimiento.

Para el caso de las ecuaciones incorporando la ecuación de continuidad en la de movimiento, se obtiene la forma conservativa expresada por las Ecu. 16 y Ecu. 17.

$$\frac{\partial A}{\partial T} + \frac{\delta Q}{\delta X} = 0 \quad \text{Ecu. 16}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad \text{Ecu. 17}$$

Para la solución de las ecuaciones de Saint Venant el HEC-RAS utiliza el esquema de Preissman, que es un esquema implícito en diferencias finitas. La solución en general para un tramo de cauce dividido en n secciones donde las incógnitas son el caudal y el tirante, se obtienen las ecuaciones y se requieren otras dos, una aguas arriba y otra aguas abajo, en el caso de flujo subcrítico para resolver el sistema.

Los sistemas de ecuaciones no son lineales y se resuelven en una serie de iteraciones.

## 6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN EL ESTADO DEL ARTE PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE TUNÉL DE DESVIO DE CAUCES

En el diseño hidráulico del túnel de desvío se han planteado a lo largo del desarrollo del estado del arte, premisas mínimas con la cuales deben cumplir los diseños de este tipo de obra y que igual dependerá en gran medida de la magnitud de las obras y condiciones del proyecto. A continuación, se describirán las que tienen pertinencia con el diseño hidráulico.

1) *Creciente de diseño*: el criterio para la selección de la creciente de diseño del sistema de desvío es el riesgo potencial asumible, este riesgo se relaciona principalmente con la altura de la ataguía, el volumen del reservorio y al riesgo de pérdidas económicas y de vida humanas aguas abajo de la presa.

La creciente de diseño, se adopta de acuerdo con el concepto de riesgo hidrológico o riesgo de largo plazo (USACE, 1987), el cual se expresa a partir de la Ecu. 18.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad \text{Ecu. 18}$$

Donde:

R : Riesgo hidrológico de falla.

Tr : Periodo de retorno de la crecida (años).

n : Periodo de construcción de las obras (años).

Como criterio se selecciona una crecida de diseño correspondiente a un periodo de retorno asociado a un riesgo hidrológico no mayor al 10%, el cual depende del periodo de exposición y de las dimensiones de la ataguía.

2) *Trazado y posicionamiento*: en términos generales, se busca un trazado lo más recto y corto posible. Desde un punto de vista hidráulico, el túnel con flujo a presión es más flexible, mientras que en el túnel a flujo libre se pueden presentar problemas tales como altas velocidades de flujo, alta turbulencia, cavitación, y vibración manifiesta. Bajo la misma cabeza y caudal estos fenómenos no se presentan en un túnel a presión (Chen S.H., 2015. NOVAK et al, 2007). De acuerdo con lo anterior, se definen como principales criterios hidráulicos para el trazado del túnel los siguientes:

- Un radio de curvatura mínima de cinco veces el diámetro del túnel ( $R > 5D$ ).
- Longitudes rectas no menores a cinco veces el diámetro o ancho del túnel ( $L_r > 5D$ ).
- El ángulo de las curvas no debe ser menor que  $60^\circ$ .

Adicionalmente, el trazado del túnel será aquel que permita cumplir con la cobertura mínima requerida por las condiciones geológicas del macizo rocoso.

El portal de salida del túnel debe posicionarse en la cota más baja que evite el control hidráulico del río sobre la descarga del túnel, para la creciente de diseño del sistema de desviación.

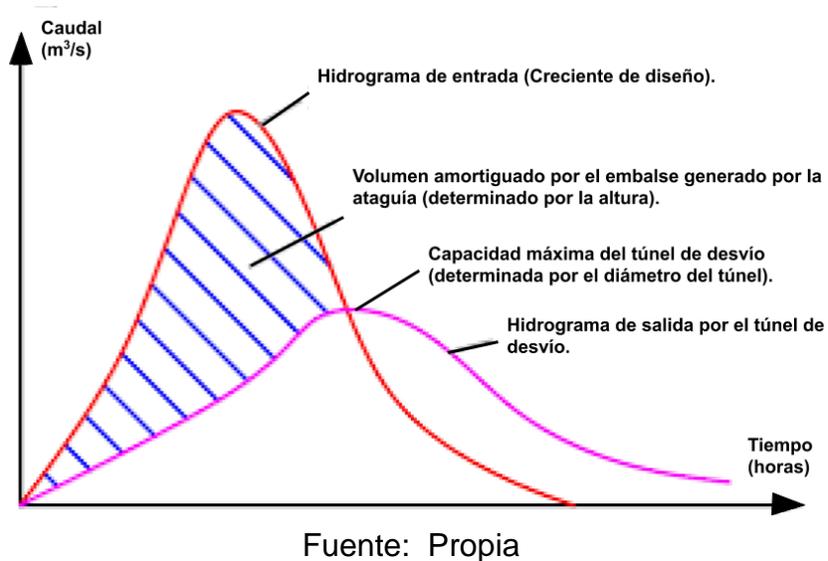
3) *Dimensionamiento de la sección hidráulica*: La solera del túnel se proyecta en lo posible plana para evitar problemas de desgaste ante eventuales concentraciones de sedimentos.

El dimensionamiento del túnel corresponde a una minimización del costo de construcción de ataguía y túnel para diversos diámetros de túnel. El dimensionamiento hidráulico se realiza empleando el método de la piscina nivelada, que se expresa mediante la Ecu. 19.

$$V_{i+1} = V_i + \left[ \frac{(Q_{in}^i + Q_{in}^{i+1})}{2} - \frac{(Q_{out}^i + Q_{out}^{i+1})}{2} \right] \Delta t \quad \text{Ecu. 19}$$

Donde  $V_i$  y  $V_{i+1}$  corresponden a los almacenamientos al inicio y al final del período de análisis respectivamente,  $Q_{in}^i$  y  $Q_{in}^{i+1}$  son los caudales de entrada,  $Q_{out}^i$  y  $Q_{out}^{i+1}$  son los caudales descargados a través del túnel de desviación y  $\Delta t$  corresponde al intervalo de cálculo. Como resultado se obtiene una gráfica como la indicada en la Figura 11, donde el pico del hidrograma de salida corresponde a la capacidad máxima de descarga del túnel de desvío.

Figura 11. Hidrogramas de entrada y salida a un volumen de almacenamiento.

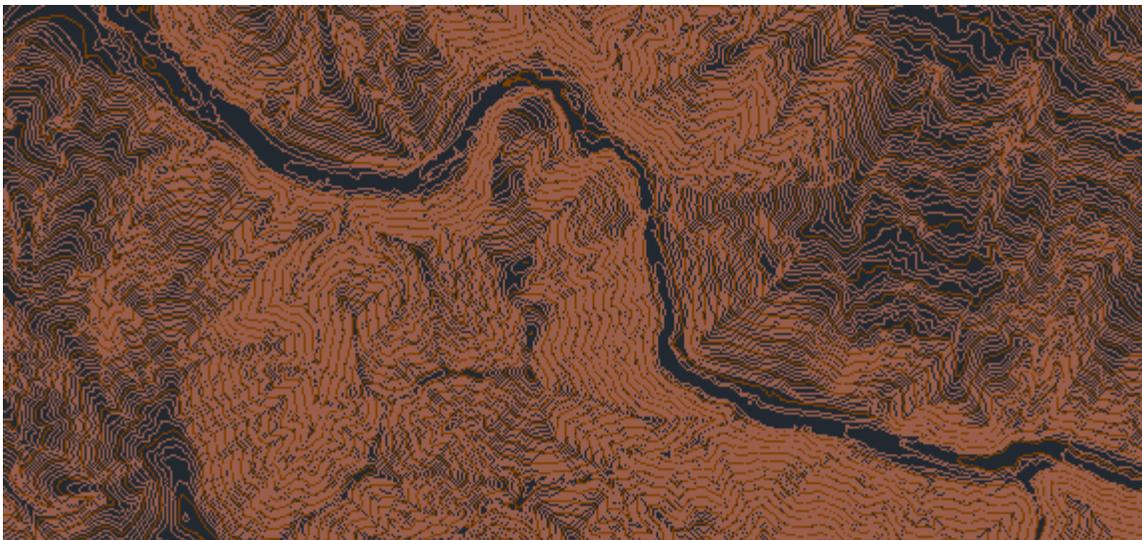


Respecto al cálculo hidráulico, el túnel de desviación se dimensiona para permitir su operación en condiciones de flujo a superficie libre o a presión. Para la condición de operación a superficie libre se considera que el nivel del reservorio está definido por el control establecido según la profundidad crítica en el túnel, mientras que para la condición de flujo a presión se establece el nivel del reservorio a partir de la suma de la cabeza de velocidad y las pérdidas de energía.

## 7 INFORMACIÓN BÁSICA UTILIZADA

Para la ejecución del trabajo se tomó información de referencia correspondiente a un tramo de cauce con una longitud de 1,8 km y configuración topográfica como se muestra en la Figura 12.

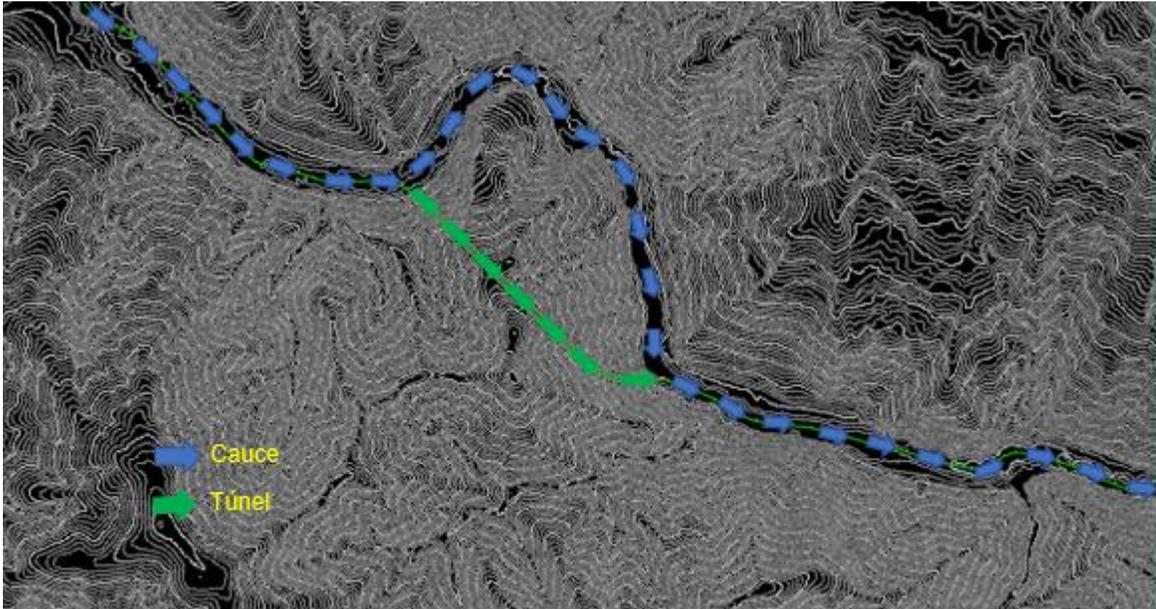
Figura 12. Vista en planta de la topografía del cauce utilizada



Fuente: Propia

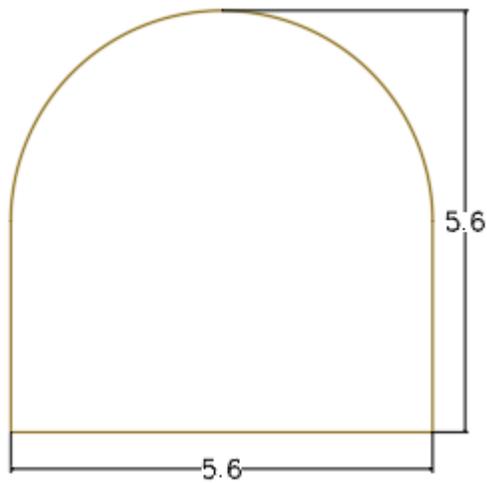
La geometría adoptada para los objetivos corresponde a un túnel en sección de arco con paredes recta con un diámetro de 5,6 m de ancho, 5,6 m de altura y longitud de 414 m. La localización del alineamiento del túnel se presenta en la Figura 13 y en la Figura 14 la sección transversal adoptada.

Figura 13. Localización del túnel de desvío



Fuente: Propia

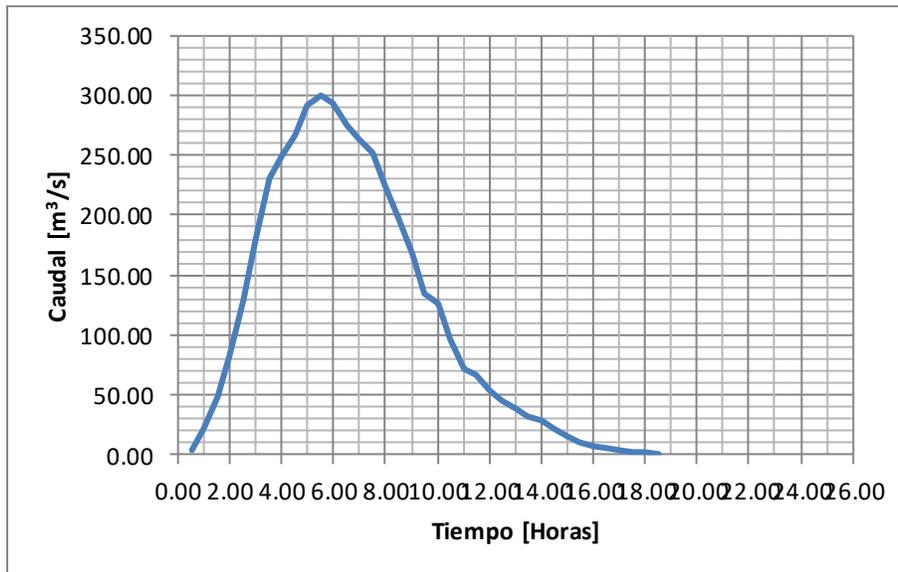
Figura 14. Sección transversal adoptada del túnel de desvío



Fuente: Propia

El caudal simulado corresponde a un hidrograma con caudal pico de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , en la Figura 15 se muestra el hidrograma de diseño utilizado.

Figura 15. Hidrograma de diseño



Fuente: Propia

## 8 DISEÑO HIDRÁULICO CON TEORÍA BÁSICA

Para los análisis hidráulicos del túnel de desvío utilizando las ecuaciones de Bernoulli y continuidad, se realizaron en dos fases, 1) Se obtuvo la curva de capacidad de descarga para el conducto adoptado y 2) Se estimaron los niveles de flujo aguas arriba y aguas abajo del túnel, mediante el tránsito de la crecida de diseño.

Para los cálculos se realizan las siguientes recomendaciones:

- Estimar la curva de capacidad del embalse que se genera aguas arriba del túnel.
- Estimar la curva de capacidad del túnel de acuerdo con la geometría propuesta.
- Definir la crecida de diseño asociado al periodo de retorno seleccionado.
- Estimar la curva de descarga del río en la descarga del túnel.
- A partir de la curva de descarga del conducto se realiza el tránsito (método de la piscina nivelada) de la crecida de diseño y se definen así los niveles aguas arriba y aguas abajo del mismo.

### 8.1 CURVA DE CAPACIDAD DE DESCARGA

Se elaboró la curva de capacidad hidráulica del túnel de desviación considerando que la operación del túnel se divide en tres fases:

- Fase de funcionamiento del túnel a superficie libre, la cual se extiende hasta que la relación  $H/D$  alcance un valor de 1,2, en donde  $H$  se define como la altura del flujo en la entrada en el túnel y  $D$  el diámetro del túnel considerado.
- Fase de transición entre el flujo a superficie libre y el flujo a presión que está definida por el intervalo de la relación  $H/D$  entre los valores de 1,2 y 1,5.

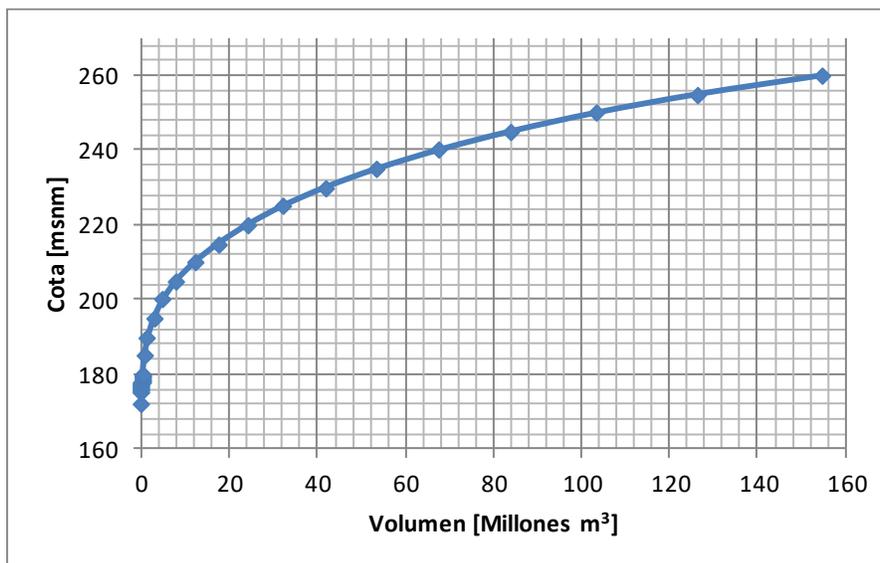
- Fase de funcionamiento del túnel a presión, la cual se produce para relaciones de H/D mayores de 1,5.

## 8.2 DATOS DE ENTRADA

Para las estimaciones hidráulicas la información base utilizada corresponde a la geometría del cauce aguas arriba y aguas abajo del túnel y características geométricas del túnel.

Las características geométricas del cauce corresponden a la curva de capacidad del cauce aguas arriba del túnel, que se construyó a partir de la información topográfica del sector de estudio, en la Figura 16 se presenta la curva de capacidad del cauce.

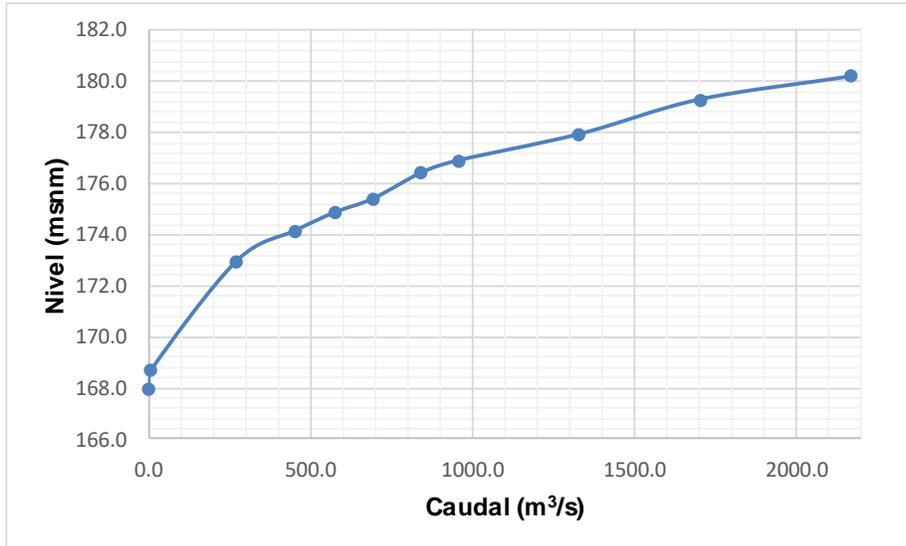
Figura 16. Curva de capacidad del cauce aguas arriba del túnel



Fuente: Propia

Las características del cauce aguas abajo del túnel corresponde a la curva de capacidad de la sección del cauce donde entrega el túnel (ver Figura 17).

Figura 17. Curva de capacidad del cauce en la entrega del túnel



Fuente: Propia

Como consideraciones de coeficiente de rugosidad de Manning se adoptó 0,05 en las bancas y 0,04 en la zona central del cauce, para una condición de cauce con vegetación robusta y cantos rodados en el lecho del cauce.

La sección del túnel adoptada tiene un diámetro de 5,6 m y un valor de coeficiente de rugosidad de Manning de 0,014 para condición de recubrimiento en concreto.

### 8.2.1 Funcionamiento a superficie a libre

La rama de la curva de capacidad del túnel con flujo a superficie libre se calculó posicionando el control del flujo en la entrada del túnel. El control de flujo corresponde a la profundidad crítica en la sección de entrada para todo el rango de caudales del flujo a superficie libre y con la pendiente en el túnel de 1,45%.

La ecuación que define el cálculo del nivel de agua del embalse cuando el flujo del túnel se comporta a superficie libre, aplicando la ecuación de Bernoulli y con control a la entrada está dada por la Ecu. 20.

$$N_{emb} = Z + y_c + \frac{V_c^2}{2g} + k_e \frac{V_c^2}{2g} + S_f L \quad \text{Ecu. 20}$$

Donde:

$N_{emb}$ : Nivel de agua en el embalse (msnm)

Z: Cota de solera del portal de entrada (172,0 msnm)

$y_c$ : Profundidad crítica (m)

$V_c$ : Velocidad crítica (m/s)

$K_e$ : Coeficiente de pérdida por entrada (0,3)

$S_f$ : Pendiente de fricción del sector de entrada

L: Longitud del sector de entrada (m)

### **8.2.2 Fase en transición**

La zona del flujo en transición corresponde a los caudales y niveles comprendidos entre 1,2D y 1,5D. Para la evaluación de esta franja de la curva de capacidad se supuso una variación lineal entre el extremo de la rama a superficie libre y el inicio de la rama con flujo a presión

### **8.2.3 Funcionamiento a presión**

La rama de la curva de capacidad del túnel con flujo a presión se calcula posicionando el control de flujo en la salida túnel. El nivel en la entrada correspondiente a un caudal a través del túnel estará definido por la energía en el portal de salida más la sumatoria de pérdidas locales y por fricción a lo largo del túnel.

En el caso que la energía del río sea mayor que la energía del túnel a la salida, para la determinación del nivel aguas arriba, se considera el balance empleando el nivel de energía del río en lugar de la energía a la salida del túnel.

La expresión que define el cálculo hidráulico del flujo a presión está dada por la Ecu. 21.

$$N_{emb} = \left[ \left( Z_s + y_p + \frac{V_s^2}{2g} \right) o E_{rio} \right] + \Delta E \quad \text{Ecu. 21}$$

Donde:

$N_{emb}$ : Nivel de agua en el embalse (msnm)

$Z_s$ : Cota de solera del portal de salida (msnm)

$y_p$ : Carga piezométrica en el portal de salida

$V_s$ : Velocidad en la sección de salida del túnel (m/s)

$E_{rio}$ : Energía del río a la salida del túnel (msnm)

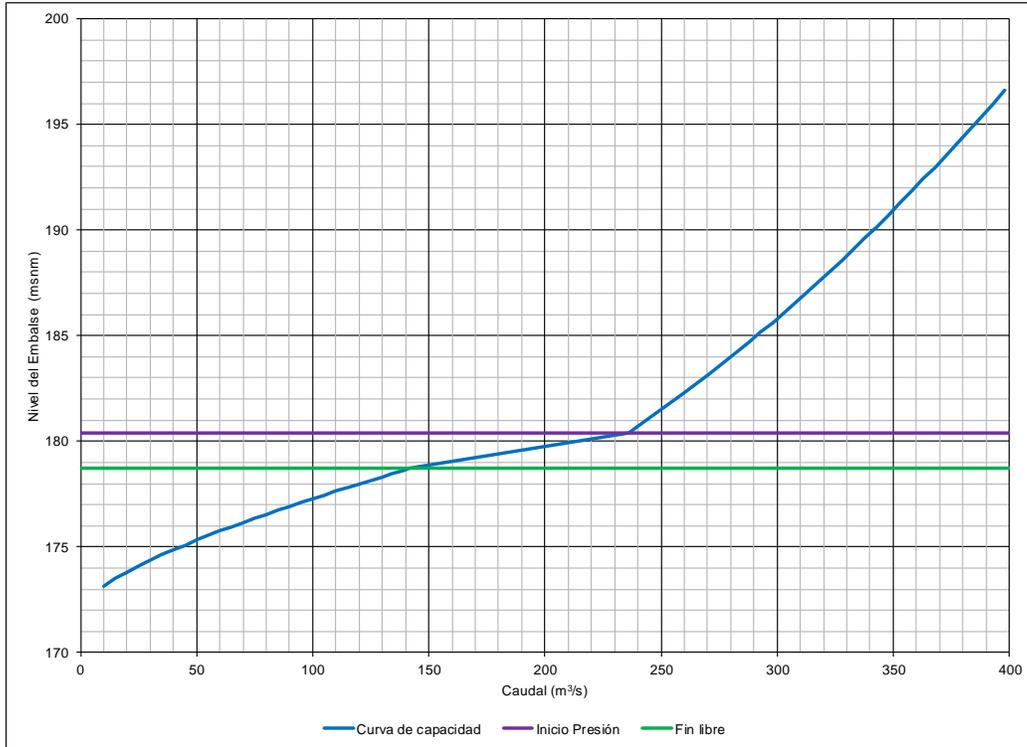
$\Delta E$ : Pérdida de energía a lo largo del túnel de desviación (m)

Las pérdidas de energía a lo largo del túnel de desviación incluyen una componente de pérdidas por fricción y otra componente debida a pérdidas locales de entrada, cambios de sección, curvaturas y salida, para los análisis se adoptó un túnel de sección constante y recto por lo que no se consideraron pérdidas por cambio de sección ni curvaturas, en la entrada se adoptó un coeficiente de 0,3 y en la salida de 0,7.

#### **8.2.4 Curva de capacidad de descarga**

Tomando en cuenta las consideraciones hidráulicas expuestas anteriormente y para la sección hidráulica adoptada de 5,6 m de diámetro y variación de caudales hasta el caudal pico del hidrograma de diseño, se obtuvo la curva de capacidad de descarga mostrada en la Figura 18.

Figura 18. Curva de capacidad de descarga del túnel con diámetro 5,6 m



Fuente: Propia

Como se observa en la curva de descarga en la Tabla 1 se presenta los valores de caudales y niveles de la zona de fin del tramo a superficie libre e inicio del tramo a presión.

Tabla 1. Valores de fin tramo a superficie libre e inicio de presión

Variable	Tramo fin libre	Tramo inicio presión
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	141,7	236,0
Nivel (msnm)	178,72	180,4

Fuente: Propia

### 8.3 TRÁNSITO DE LA CRECIENTE POR EL TÚNEL

El tránsito de la crecienta se realiza por medio del método de Piscina Nivelada, el cual permite establecer el comportamiento del volumen de almacenamiento y de los caudales de descarga para un tiempo posterior resolviendo la ecuación de continuidad en tiempo discreto en forma iterativa con base en los caudales de entrada actual y posterior y en la información de descarga y almacenamiento en el tiempo actual. Las variables que intervienen en el proceso se presentan en la Ecu. 22.

$$\frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{O_{i+1} + O_i}{2} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \quad \text{Ecu. 22}$$

Donde:

- $I_{i+1}$  Caudal de entrada en el tiempo  $i+1$  ( $m^3/s$ )
- $I_i$  Caudal de entrada en el tiempo  $i$  ( $m^3/s$ )
- $O_{i+1}$  Caudal de salida en el tiempo  $i+1$  ( $m^3/s$ )
- $O_i$  Caudal de salida en el tiempo  $i$  ( $m^3/s$ )
- $V_{i+1}$  Volumen almacenado en el tiempo  $i+1$  ( $m^3$ )
- $V_i$  Volumen almacenado en el tiempo  $i$  ( $m^3$ )
- $\Delta t$  Intervalo transcurrido desde el tiempo  $i$  hasta  $i+1$  (s)

Tomando como base la curva de descarga del túnel, de capacidad de cauce aguas arriba y aguas abajo del túnel, el hidrograma de diseño se transitó la crecienta de diseño, con el fin de estimar los niveles de entrada o de embalsamiento que se generar aguas arriba del túnel.

En la Tabla 2 se presenta el resumen del tránsito realizado y en la Figura 19 se muestra el hidrograma de entrada y salida obtenido.

Tabla 2. Tránsito de la creciente de diseño

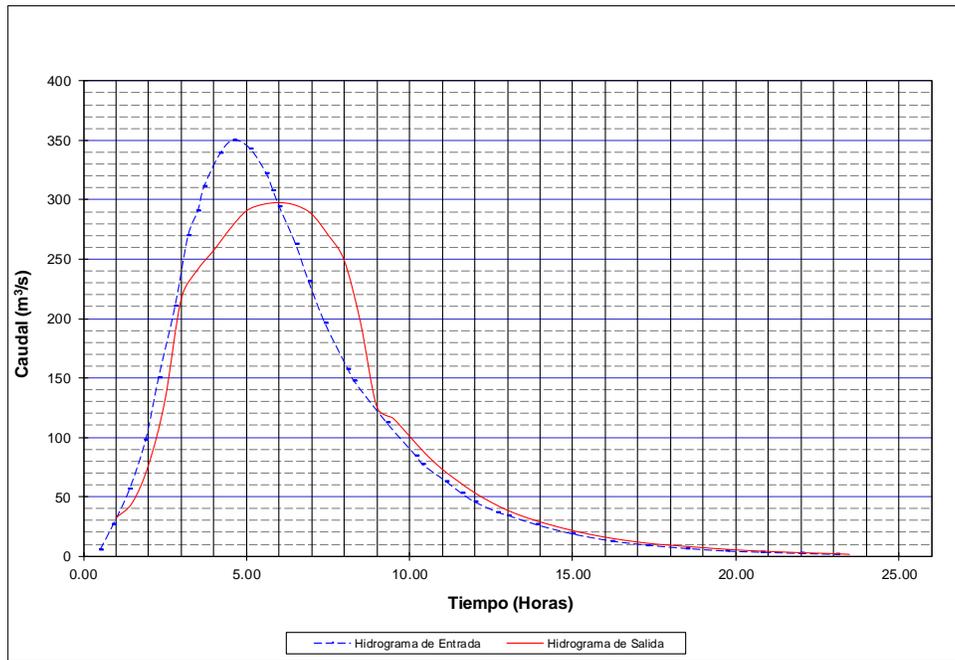
<b>Nivel máximo (msnm)</b>	183,33
<b>Caudal pico de entrada (m<sup>3</sup>/s)</b>	300,00
<b>Caudal pico de salida (m<sup>3</sup>/s)</b>	272,51
<b>Amortiguación</b>	0,09
<b>Volmax (hm<sup>3</sup>)</b>	0,54

<b>Tiempo</b>	<b>Caudal de Entrada</b>	<b>Volumen del embalse</b>	<b>Cota del embalse</b>	<b>Caudal transitado</b>
Horas	m <sup>3</sup> /s	hm <sup>3</sup>	msnm	m <sup>3</sup> /s
1,00	22,51	0,05	173,95	22,51
1,50	47,99	0,07	174,48	32,28
2,00	84,02	0,10	175,66	57,90
2,50	128,99	0,16	177,13	96,13
3,00	180,00	0,22	178,80	146,25
3,50	231,01	0,26	180,00	216,47
4,00	248,99	0,29	180,31	234,57
4,50	266,98	0,32	180,75	240,64
5,00	291,01	0,38	181,47	249,98
5,50	300,00	0,46	182,33	260,67
6,00	294,02	0,51	183,02	268,92
6,50	275,98	0,54	183,33	272,51
7,00	264,02	0,54	183,28	271,96
7,50	252,01	0,51	183,02	268,84
8,00	225,03	0,46	182,44	261,95
8,50	197,99	0,38	181,49	250,15
9,00	167,99	0,28	180,25	230,98
9,50	135,03	0,22	178,77	144,65
10,00	125,98	0,20	178,38	131,88
10,50	95,98	0,18	177,78	114,34
11,00	72,01	0,15	176,89	89,30
11,50	65,98	0,13	176,27	73,11
12,00	54,02	0,11	175,87	63,02
12,50	45,03	0,10	175,45	52,97
13,00	38,99	0,08	175,10	45,08

<b>Tiempo</b>	<b>Caudal de Entrada</b>	<b>Volumen del embalse</b>	<b>Cota del embalse</b>	<b>Caudal transitado</b>
13,50	31,51	0,07	174,73	37,32
14,00	29,38	0,07	174,45	31,78
14,50	22,51	0,06	174,21	27,23
15,00	15,91	0,05	173,87	21,23
15,50	10,81	0,04	173,53	15,67
16,00	7,80	0,03	173,24	11,50
16,50	5,41	0,03	173,00	8,82
17,00	3,59	0,02	172,78	6,84
17,50	2,70	0,02	172,58	5,14
18,00	1,82	0,01	172,43	3,82
18,50	1,20	0,01	172,31	2,76
19,00	0,00	0,01	172,20	1,77
19,50	0,00	0,00	172,11	0,96
20,00	0,00	0,00	172,06	0,52
20,50	0,00	0,00	172,03	0,28
21,00	0,00	0,00	172,02	0,15
21,50	0,00	0,00	172,01	0,08
22,00	0,00	0,00	172,01	0,04
22,50	0,00	0,00	172,00	0,02
23,00	0,00	0,00	172,00	0,01
23,50	0,00	0,00	172,00	0,01

Fuente: Propia

Figura 19. Hidrograma de entrada y salida

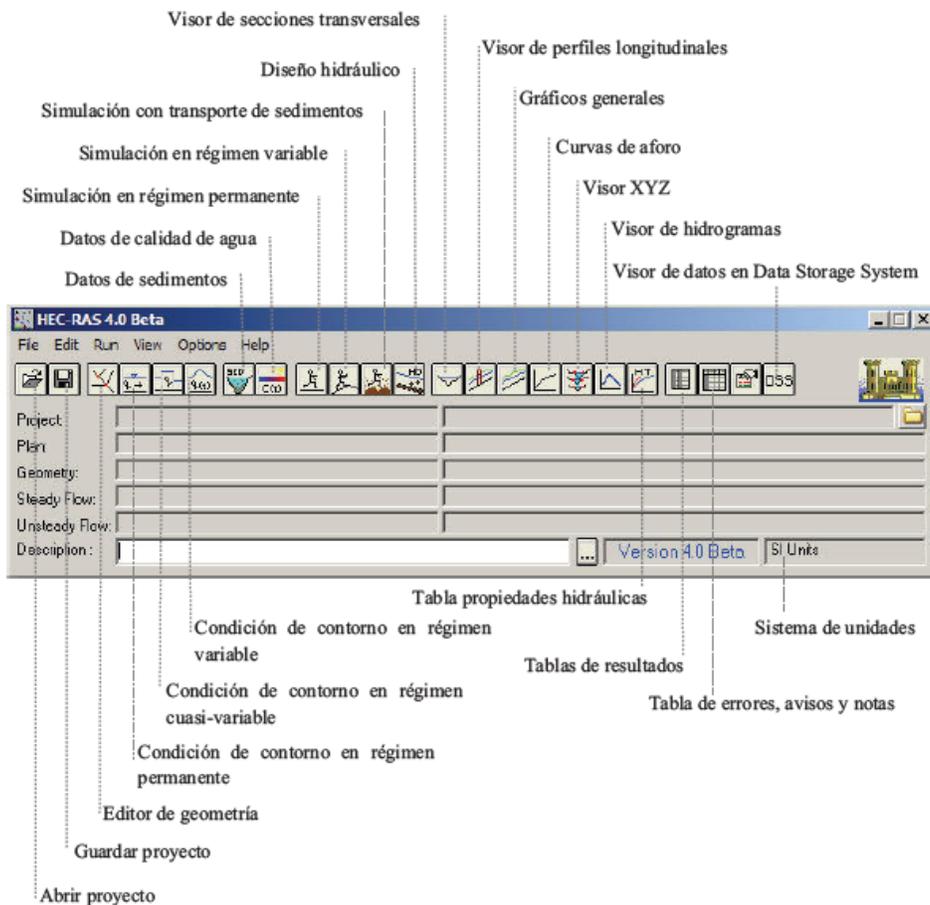


Fuente: Propia

## 9 DISEÑO HIDRÁULICO CON LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HEC RAS

La simulación mediante Hec-Ras se puede condensar en, creación de un nuevo proyecto, ingreso de la geometría del proyecto, introducir caudal de diseño, condiciones de contorno, simulación del modelo y visualización de los resultados. En la Figura 20 se muestra los principales componentes del programa.

Figura 20. Principales componentes del programa Hec-Ras



Fuente: Manual Hec-Ras

La simulación del túnel por medio del Hec-Ras se realizó utilizando dos alternativas de modelación, utilizando la opción de simulación del módulo culvert y la opción del módulo Add lid to XS (incluir tapa a un canal).

Para la construcción geométrica del modelo se utilizó la topografía base del ejercicio, mediante la cual se obtuvieron secciones transversales a lo largo del tramo de análisis.

El caudal simulado corresponde al hidrograma presentado en el Capítulo 7 - Figura 15.

El coeficiente de rugosidad de Manning adoptado fue de 0,014 para el túnel revestido en concreto.

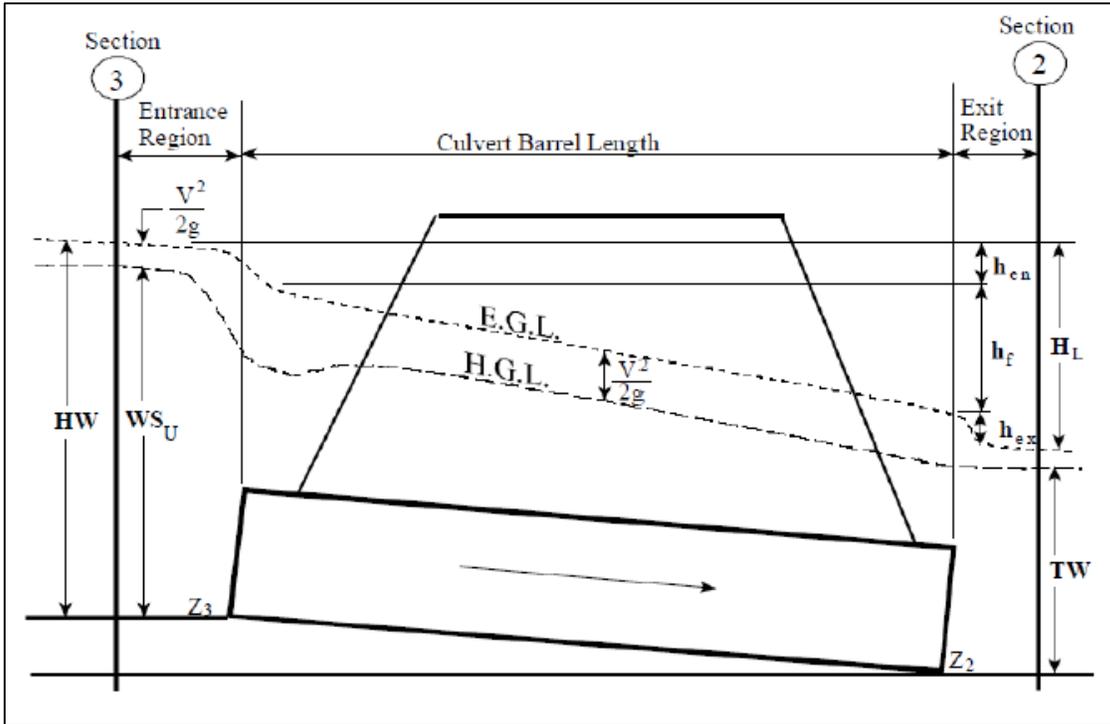
Las simulaciones se realizaron para condiciones de flujo permanente y no permanente. Las condiciones de frontera utilizadas corresponden a la pendiente promedio del cauce aguas arriba (0,0066) y aguas abajo (0,0145).

A continuación, se describen los análisis realizados para las dos opciones planteadas.

## **9.1 SIMULACIÓN CON EL MODULO CULVERT**

HEC-RAS utiliza las ecuaciones planteadas por la FHWA (2012), calculando las pérdidas de energía causadas en la alcantarilla, así: una primera sección inmediatamente aguas abajo de la estructura donde ocurre la expansión de la salida. La segunda sección comprende el tramo de la entrada del barril, a través del barril y en la salida de este. La tercera sección es inmediatamente aguas arriba de la estructura, donde se da lugar a una contracción del fluido, en la Figura 21 se ilustran los sitios donde se plantea la ecuación de energía en la alcantarilla.

Figura 21 Planteamiento ecuación de energía en Culvert, Hec - Ras



Fuente: Manual Hydraulic Reference, Hec - Ras

Para control a la salida, el Hec – Ras hace los cálculos balanceando la ecuación de energía de aguas abajo hacia aguas arriba (Ver Ecu. 23 ). Cuando ducto fluye lleno, la pérdida total a través de la alcantarilla se calcula como la suma de pérdidas por fricción, pérdidas por entrada, y pérdidas por salida. Las pérdidas por fricción se determinan utilizando la ecuación de Manning, las pérdidas por entrada se calculan multiplicando la velocidad de entrada por un coeficiente establecido de forma descriptiva en el documento HDS-5 constantes empíricas por configuración de entrada FHWA. Las pérdidas a la salida se determinan como un coeficiente que multiplica el cambio en altura de velocidad de una sección ubicada inmediatamente antes de la salida del barril con la altura de velocidad afuera del ducto.

$$Y_3 + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 = Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad \text{Ecu. 23}$$

La energía total  $h_L$  requerida para que el fluido pase a través del barril está compuesta por las pérdidas de entrada  $h_{ent}$ , fricción a lo largo de la alcantarilla  $h_f$ , y la pérdida a la salida  $h_{sal}$ .

Donde:

- Las pérdidas por entrada se expresan mediante la Ecu. 24

$$h_{ent} = K_e * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecu. 24}$$

- Las pérdidas por fricción se expresan mediante la Ecu. 25.

$$h_f = \left( \frac{K_u * n^2 * L}{R^{\frac{4}{3}}} \right) * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecu. 25}$$

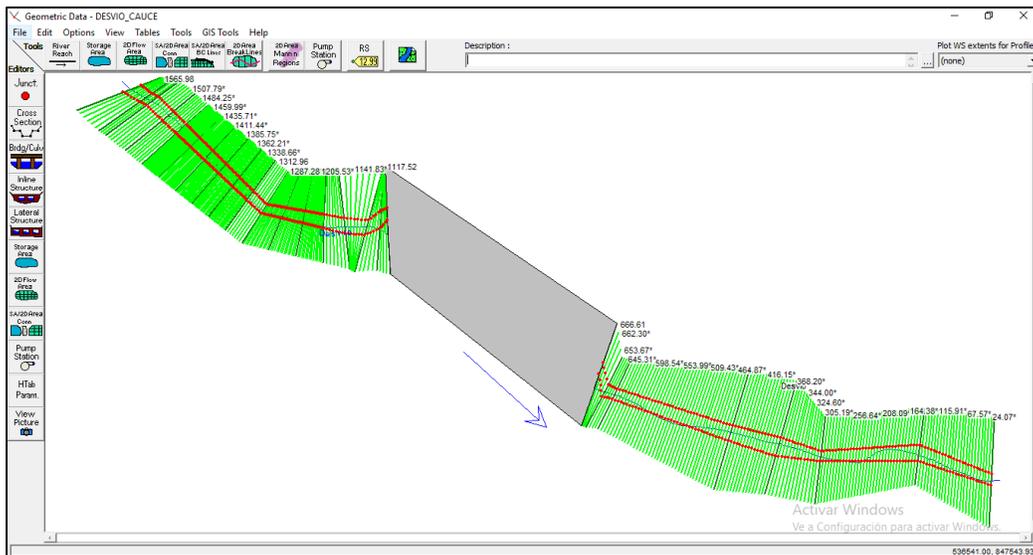
- Las pérdidas a la salida se expresan mediante la

$$h_{sal} = 1,0 \left( \frac{V^2}{2g} - \frac{V_d^2}{2g} \right)$$

Para la construcción geométrica del modelo se utilizó la topografía base del ejercicio, mediante la cual se obtuvieron secciones transversales a lo largo del tramo de análisis.

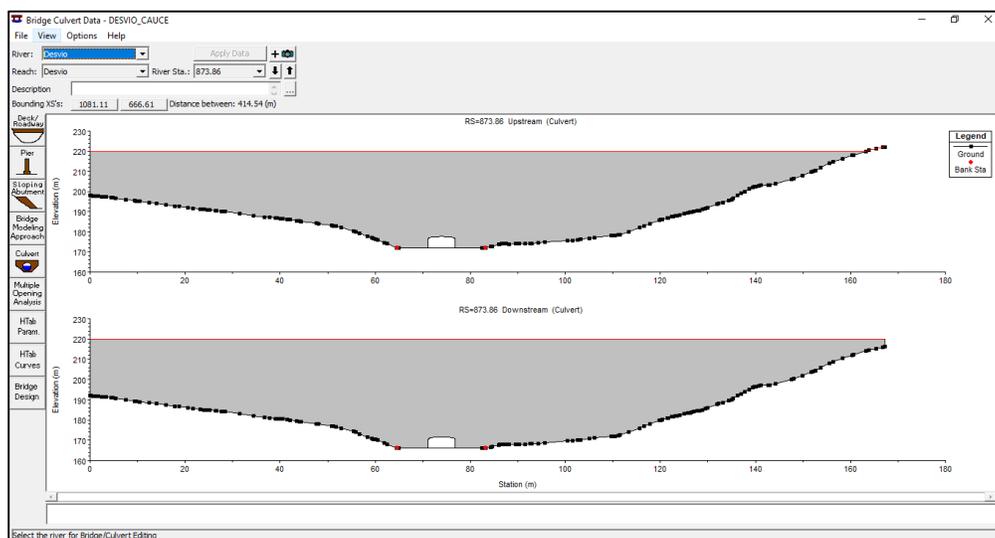
En la Figura 22 se ilustra la configuración en planta del modelo con el túnel incluido y en la Figura 23 se muestra la sección transversal del túnel.

Figura 22. Configuración en planta en Hec-Ras



Fuente: Propia

Figura 23. Sección transversal del túnel



Fuente: Propia

Para el análisis del comportamiento hidráulico del túnel, se llevaron a cabo las simulaciones para condiciones de flujo permanente y no permanente.

### 9.1.1 Simulación en condición de flujo permanente

En el caso de la condición de flujo no permanente se simuló un rango de caudales para observar el comportamiento del túnel y obtener la curva de descarga. En la Tabla 3 se presentan los valores de caudales simulados.

Tabla 3. Caudales simulados

Caudales (m <sup>3</sup> /s)	
5	180
10	200
20	230
50	250
80	280
100	300
110	350
150	

En la Figura 24 se puede observar la ventana del programa donde se ingresan los datos de caudales y en la Figura 25 la ventana donde se ingresan las condiciones de contorno adoptadas para la simulación.

Figura 24. Ventana de ingresos de datos de caudal – régimen permanente

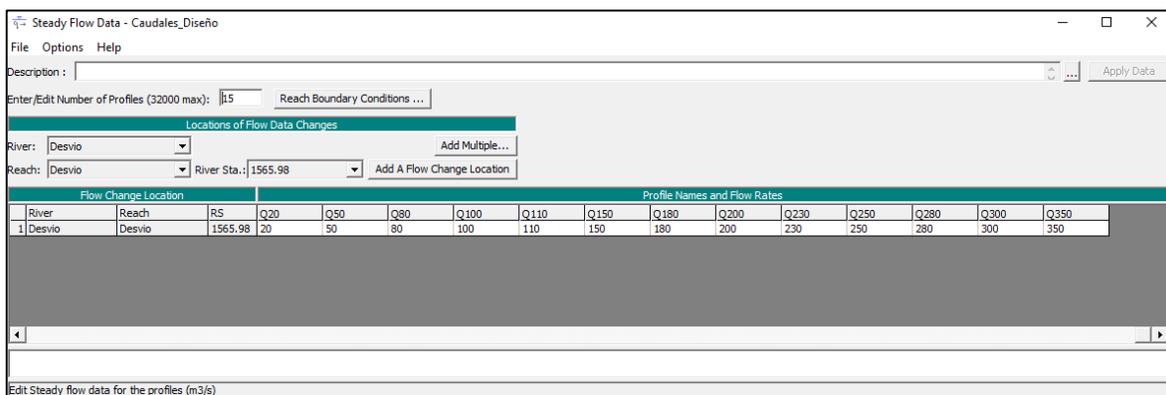
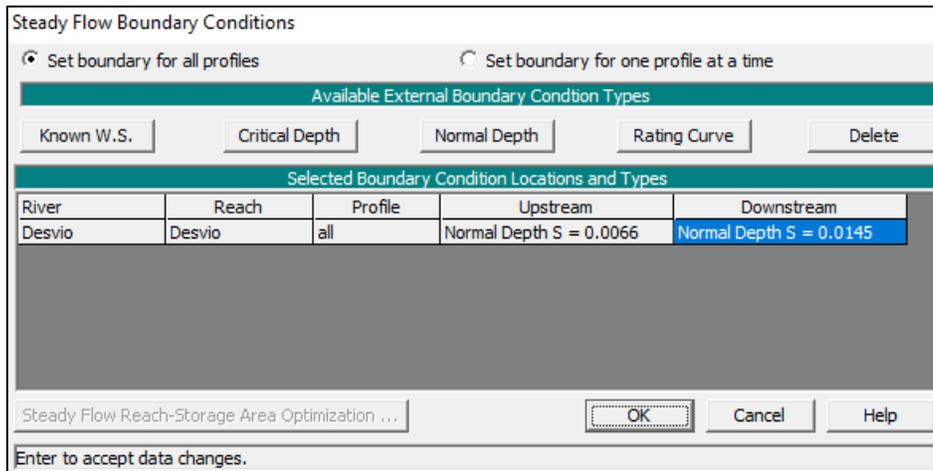


Figura 25. Ventana de ingreso de condiciones de contorno régimen permanente



Configurado la geometría del modelo y condiciones de contorno se realizó la simulación, en la Figura 26 se presenta la ventana de simulación.

#### 9.1.1.1 Resultados de la simulación

Como resultado de la modelación se obtuvo la curva de descarga para el túnel, en la Tabla 4 se presentan las características hidráulicas obtenidas y en la Figura 27 la curva de caudal.

Figura 26. Venta de simulación régimen permanente

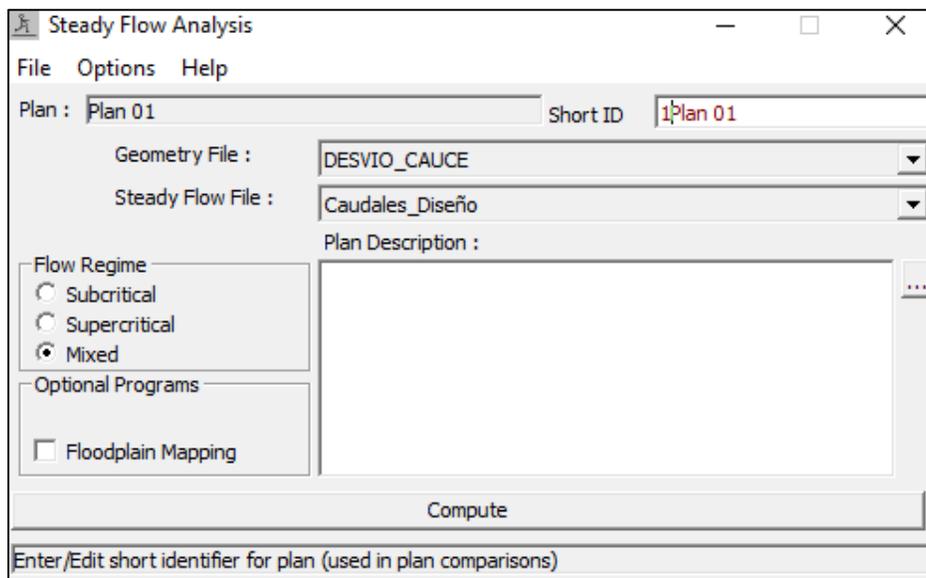
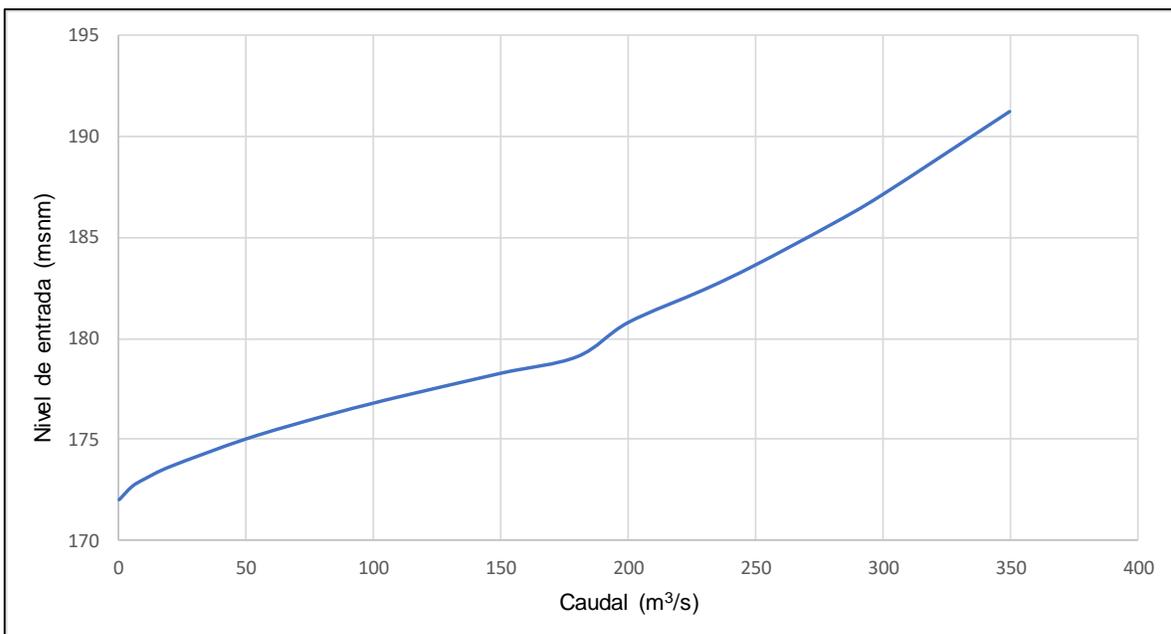


Tabla 4. Resumen de características hidráulicas en el túnel

Caudal	Culv Vel US	Culv Vel DS	Culv EG Inlet	Culv EG Outlet	Culv Nml Depth	Culv Crt Depth
(m <sup>3</sup> /s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	0	0	172	0	0	0
5	2,06	3,36	172,65	166,84	0,27	0,43
10	2,6	4,35	173,03	167,37	0,41	0,69
20	3,27	5,56	173,64	168,22	0,64	1,09
50	4,44	7,59	175,02	170,11	1,18	2,01
80	5,19	8,63	176,13	171,46	1,63	2,75
100	5,59	9,16	176,79	172,23	1,91	3,19
110	5,78	9,38	177,1	172,58	2,04	3,4
150	6,4	10,1	178,27	173,85	2,56	4,18
180	6,88	10,53	179,09	174,7	2,94	4,67
200	6,71	11,04	180,78	175,45	3,19	4,9
230	7,71	11,61	182,42	176,41	3,55	5,15
250	8,39	12,01	183,63	177,07	3,78	5,6
280	9,39	12,67	185,65	178,13	4,13	5,6
300	10,06	13,13	187,12	178,87	4,37	5,6
350	11,74	14,38	191,24	180,89	5,05	5,6

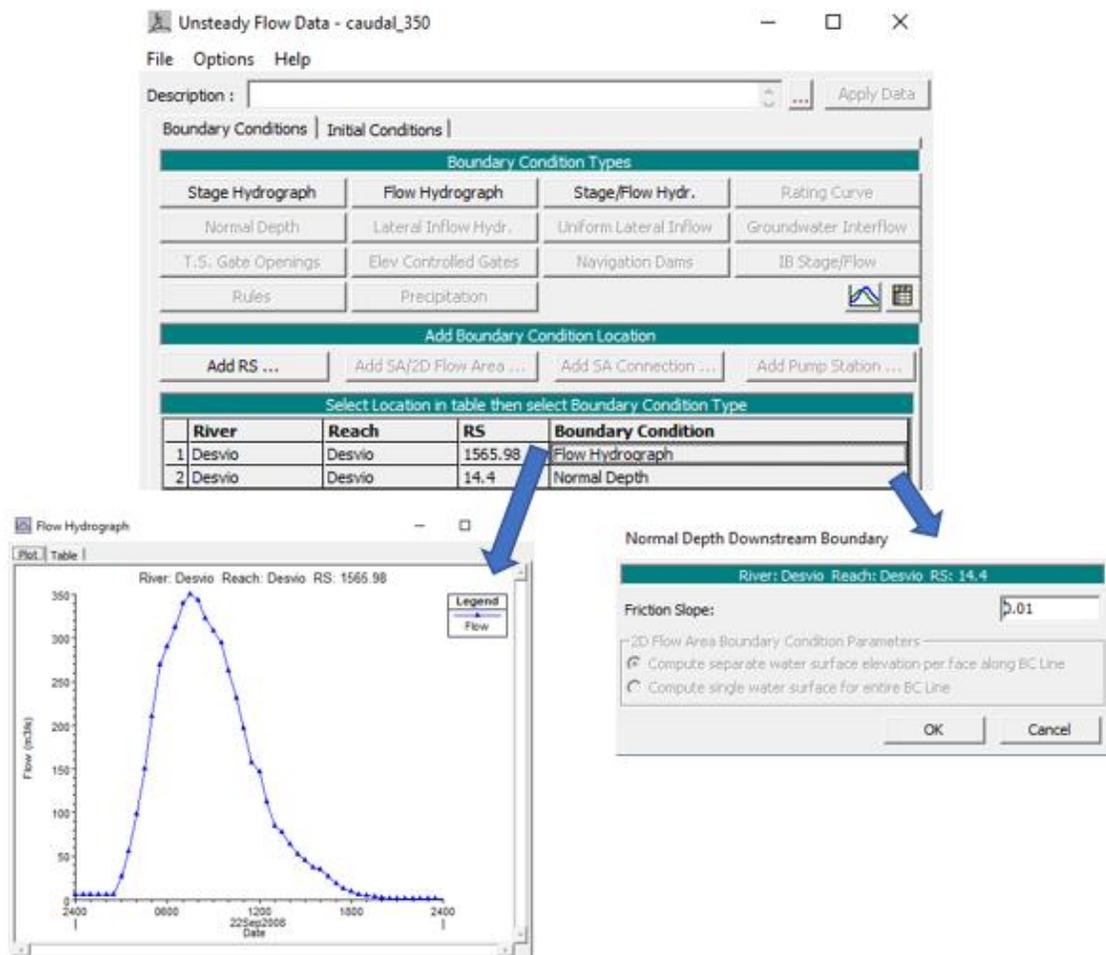
Figura 27. Curva de descarga del túnel – opción Culvert



### 9.1.2 Simulación en condición de flujo no permanente

Para régimen no permanente el caudal simulado corresponde al hidrograma de diseño (Ver Figura 15), las condiciones de contorno en régimen variable se establecieron como el caudal de diseño aguas arriba y aguas abajo la pendiente normal del cauce, en la Figura 28 se ilustran los datos ingresados en las condiciones contorno.

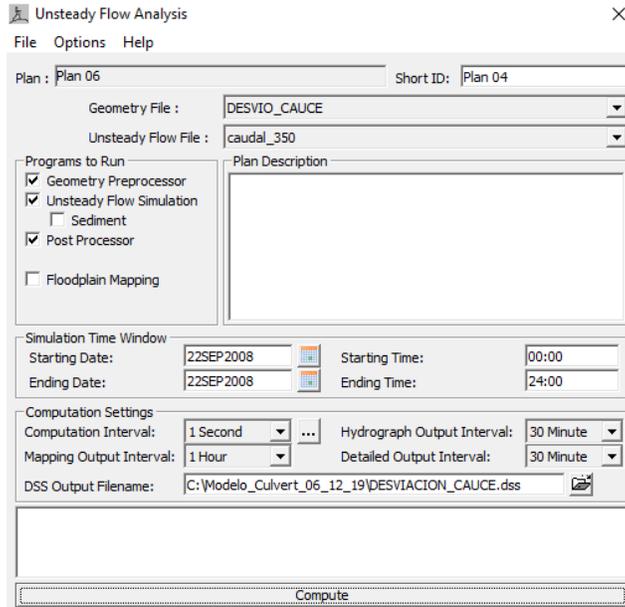
Figura 28. Condiciones de contorno en régimen variable



Fuente: Propia

Una vez ingresada la geometría y condiciones de contorno, se procedió con la simulación, en la Figura 29 se ilustra las características de la ventana de simulación.

Figura 29. Ventana de simulación

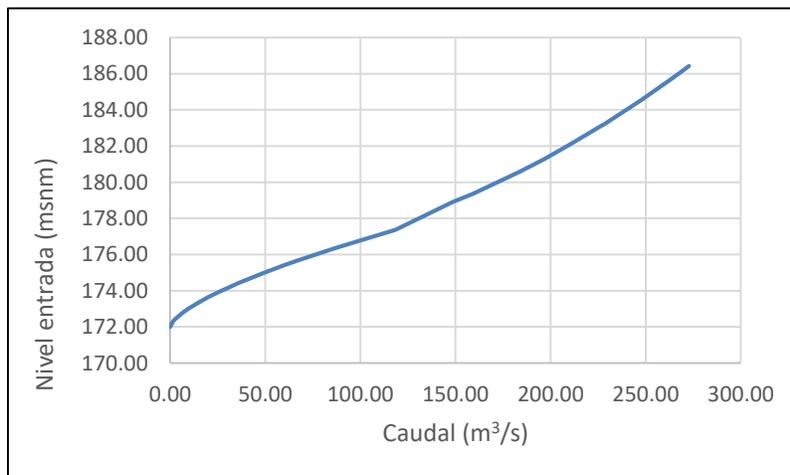


Fuente: Propia

### 9.1.2.1 Resultados de la simulación

Como resultado de los análisis se obtuvo la curva de capacidad de descarga del túnel, el hidrograma de salida y los niveles de flujo en la entrada del túnel. En la Figura 30 se muestra la curva de descarga obtenida con el modelo.

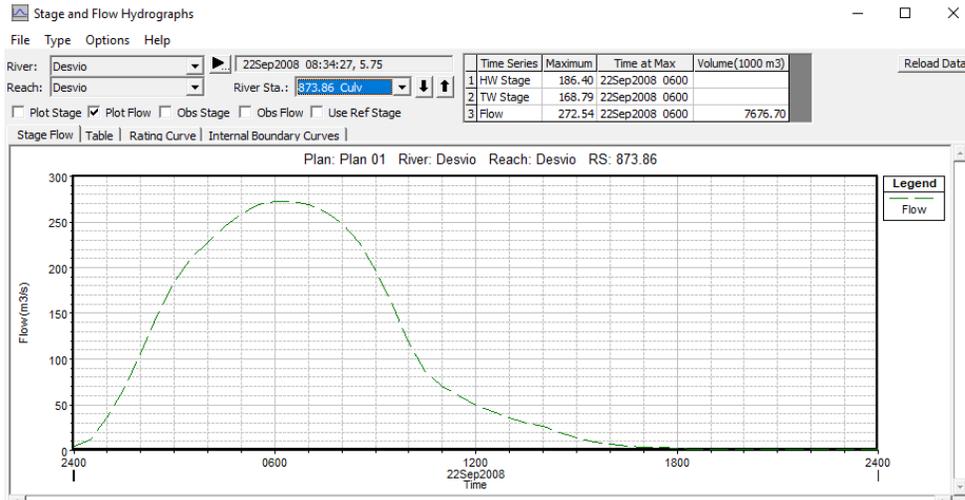
Figura 30. Curva de descarga del túnel – Hec Ras



Fuente: Propia

En la Figura 31 se muestra el hidrograma obtenido de la simulación en el túnel mediante el modelo y en la Figura 32 se presenta el resumen de los cálculos obtenidos.

Figura 31. Hidrograma obtenido en el túnel – Hec Ras



Fuente: Propia

Figura 32. Resumen de los resultados de la simulación en el túnel – Hec Ras

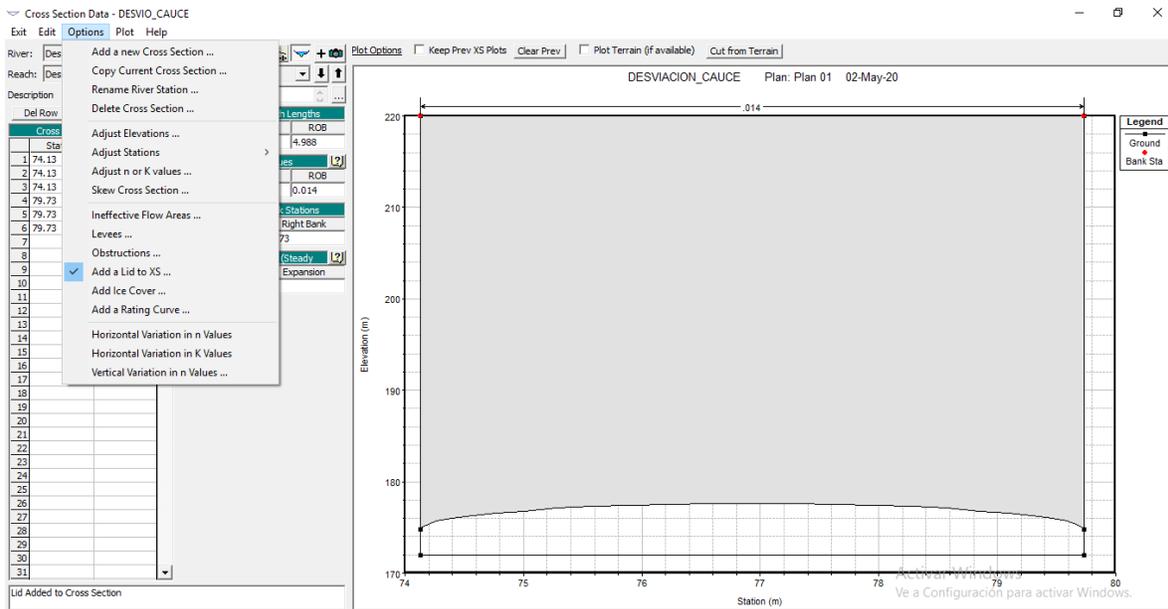
Plan: Plan 01 Desvio Desvio RS: 873.86 Culv Group: Culvert #1 Profile: Max WS			
Q Culv Group (m3/s)	272.70	Culv Full Len (m)	
# Barrels	1	Culv Vel US (m/s)	9.15
Q Barrel (m3/s)	272.70	Culv Vel DS (m/s)	12.51
E.G. US. (m)	186.42	Culv Inv El Up (m)	172.00
W.S. US. (m)	186.41	Culv Inv El Dn (m)	166.00
E.G. DS (m)	169.79	Culv Frctn Ls (m)	7.27
W.S. DS (m)	168.79	Culv Exit Loss (m)	8.08
Delta EG (m)	16.63	Culv Entr Loss (m)	1.28
Delta WS (m)	17.62	Q Weir (m3/s)	
E.G. IC (m)	186.42	Weir Sta Lft (m)	
E.G. OC (m)	183.11	Weir Sta Rgt (m)	
Culvert Control	Inlet	Weir Submerg	
Culv WS Inlet (m)	177.60	Weir Max Depth (m)	
Culv WS Outlet (m)	169.89	Weir Avg Depth (m)	
Culv Nml Depth (m)	4.05	Weir Flow Area (m2)	
Culv Crt Depth (m)	5.60	Min El Weir Flow (m)	220.00

Fuente: Propia

## 9.2 SIMULACIÓN CON EL MODULO ADD A LID TO XS

Hec -Ras ofrece la posibilidad de simular conductos cerrados incluyendo tapa a una sección, mediante la opción Add a lid to XS que se encuentra en la ventana del editor de secciones del programa, como se puede observar en la Figura 33.

Figura 33. Ventana de edición de secciones – opción Add a lid to XS



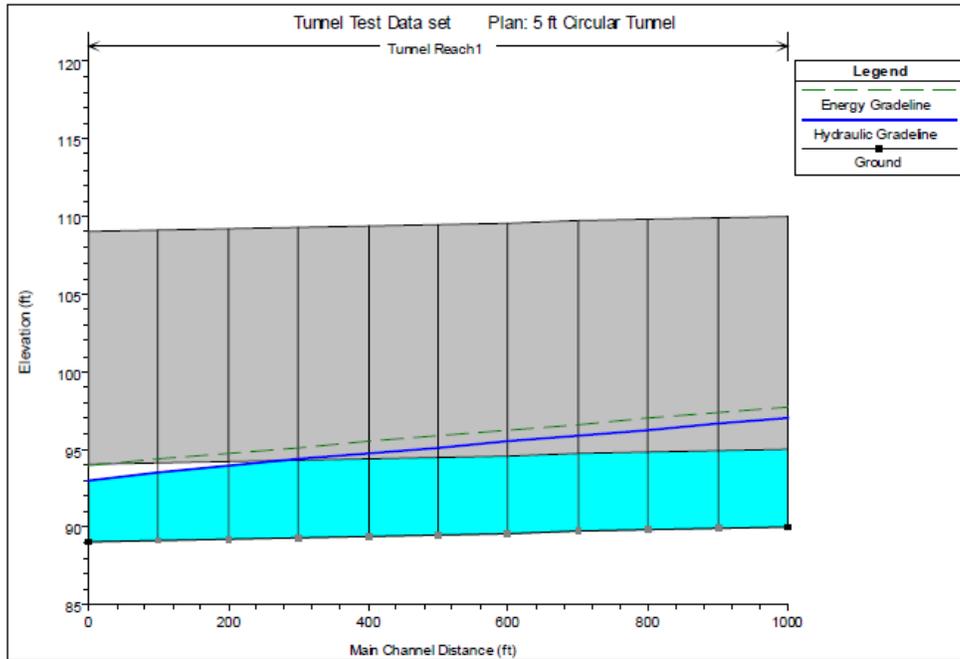
Fuente: Propia

### 9.2.1 Simulación en condición de flujo permanente

Para un análisis de flujo permanente, el programa resuelve la ecuación de energía, tal como lo haría normalmente para la condición sin tapa en cualquier sección transversal, la diferencia radica en que el área y el perímetro mojado están circunscritos al área entre el fondo de la sección transversal y la tapa. Cuando el programa calcula una superficie de agua mayor que la parte superior del conducto abierto, la línea de la superficie del agua es representativa de la línea de pendiente hidráulica. El área de flujo y el perímetro húmedo todavía se están calculando a partir del área abierta disponible, pero el equilibrio de la ecuación de energía

requiere que el cálculo use la línea de piezométrica en lugar de la elevación de la superficie del agua para lograr un equilibrio de energía, Ver Figura 34.†

Figura 34. Perfil de la línea piezométrica y de energía, en un conducto con tapa



Fuente: Manual de referencia hidraulica del Hec - Ras

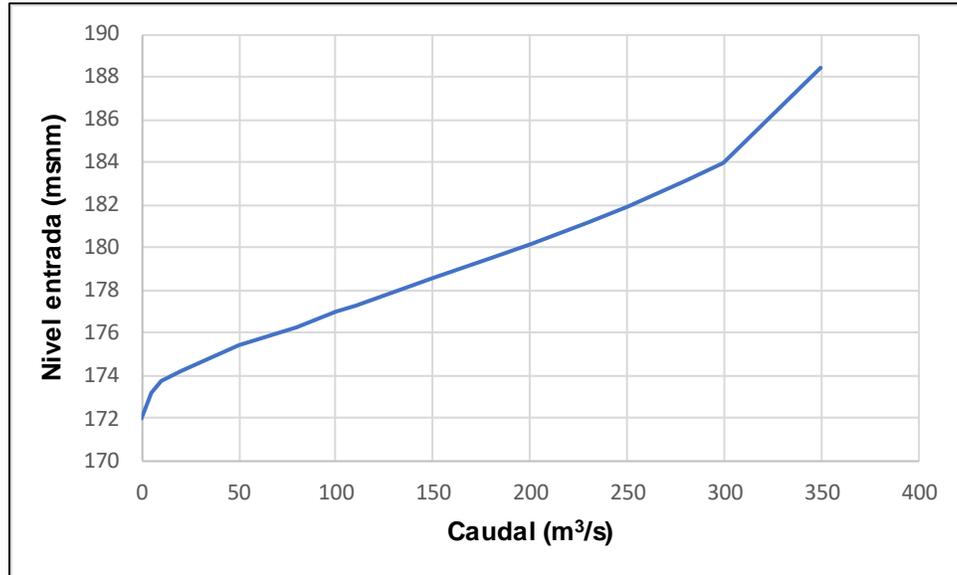
#### 9.2.1.1 Resultados de la simulación

Como resultado de la simulación se obtuvo la curva de descarga del túnel para los caudales presentados en la Tabla 3. En la Figura 35 se presenta la curva de descarga obtenida.

---

† Tomado del manual de referencia hidráulica del programa HEC-RAS

Figura 35. Curva de descarga túnel con tapa – flujo permanente



Fuente: Propia

### 9.3 Simulación en condición de flujo no permanente

Para los análisis de flujo no permanente y en condiciones de flujo a presión el programa utiliza la teoría de la ranura de Priesmann. Los conductos cerrados pueden experimentar flujo a superficie libre y flujo a presión. El programa para flujo a presión utilizando la opción de tapa, realiza los análisis utilizando ecuaciones de golpe de ariete, para una tubería circular (Streeter y Wylie, 1979).<sup>‡</sup>

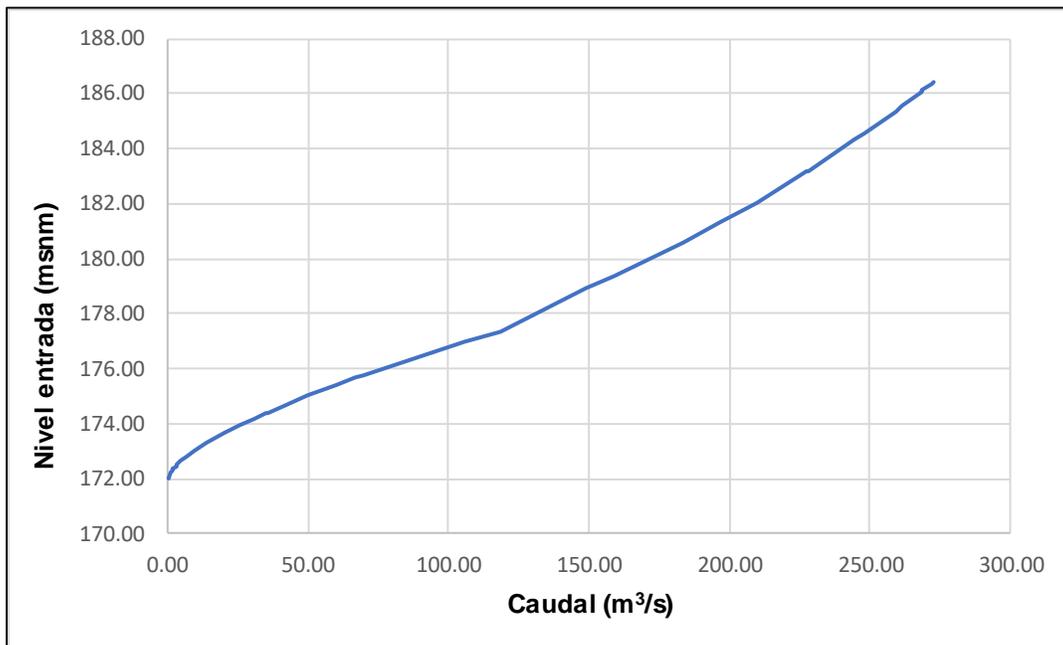
---

<sup>‡</sup> Para mayor detalle ver página 4-24 del capítulo 4 del manual de referencia hidráulica del Hec – Ras.

### 9.3.1.1 Resultados de la simulación

Como resultados de los análisis se obtuvo la curva de descarga presentada en la Figura 36.

Figura 36. Curva de descarga túnel con tapa – flujo no permanente



Fuente: Propia

## 10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

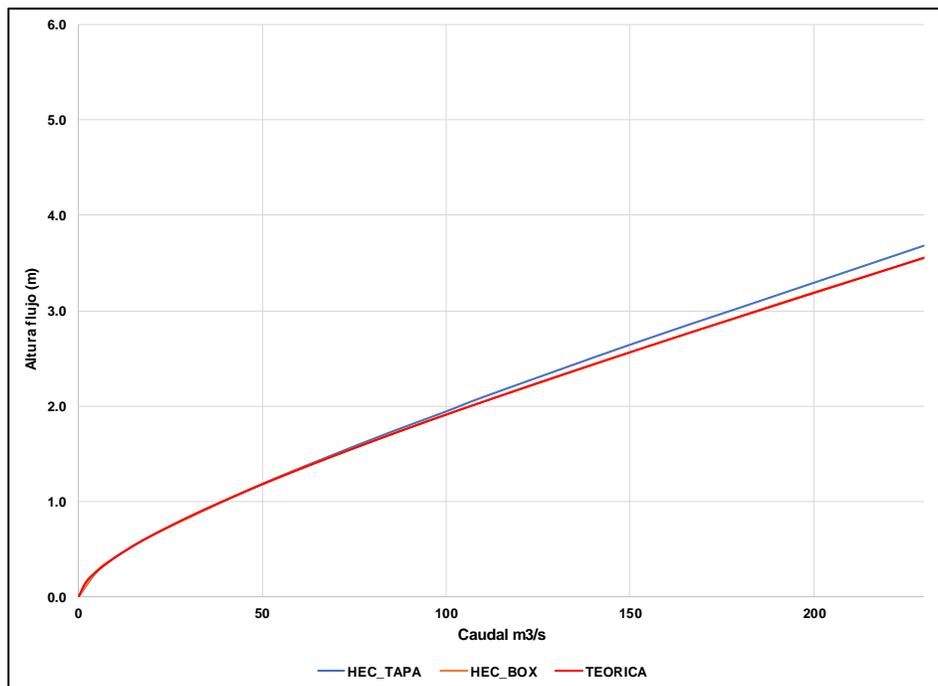
En este capítulo se presentan los análisis a los resultados obtenidos con las herramientas descritas en los capítulos anteriores. Mostrándose las curvas de capacidad obtenidas, los hidrogramas de salida y niveles de flujo.

### 10.1 Análisis de resultados en flujo permanente

De los resultados obtenidos se compararon las variables correspondientes a la altura de flujo y a la curva de capacidad obtenida por las tres herramientas utilizadas.

En la Figura 37 se presenta la curva de caudales versus alturas de flujo de obtenidas por cada herramienta.

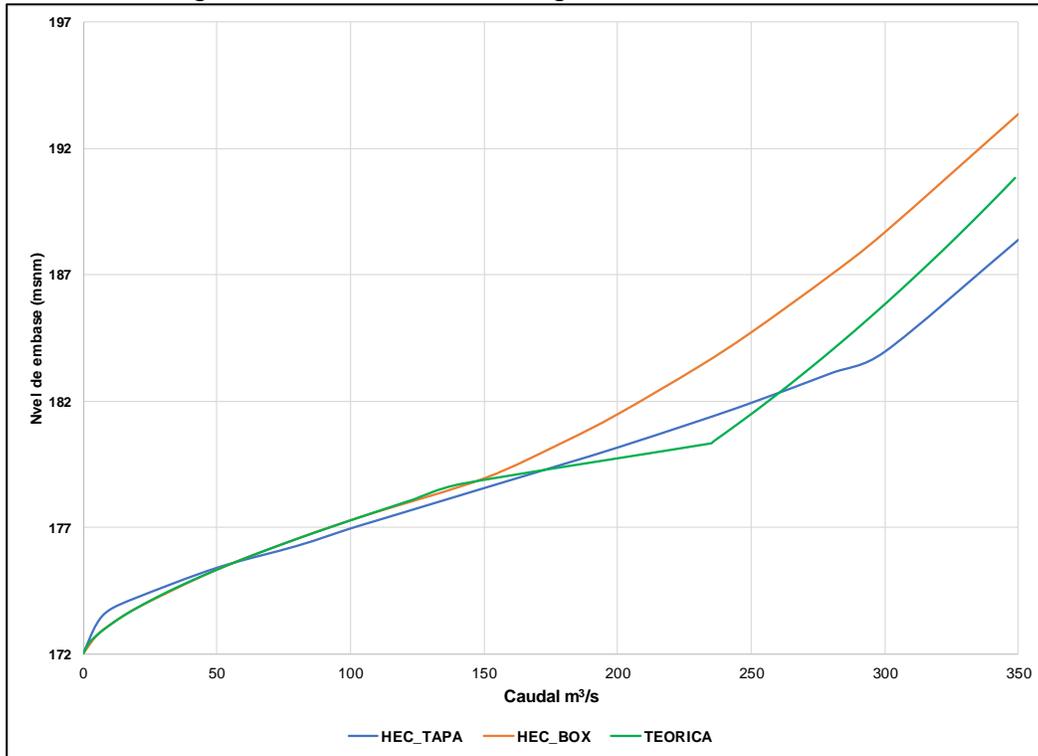
Figura 37. Curva de caudal vs altura de flujo



Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura anterior los valores obtenidos mediante la formulación teórica de la ecuación Bernoulli y la opción de culvert del Hec-Ras son iguales y tienen una pequeña diferencia a los obtenidos con la opción de tapa del Hec – Ras.

Figura 38. Curva de descargas Teórica vs Hec Ras



Fuente: Propia

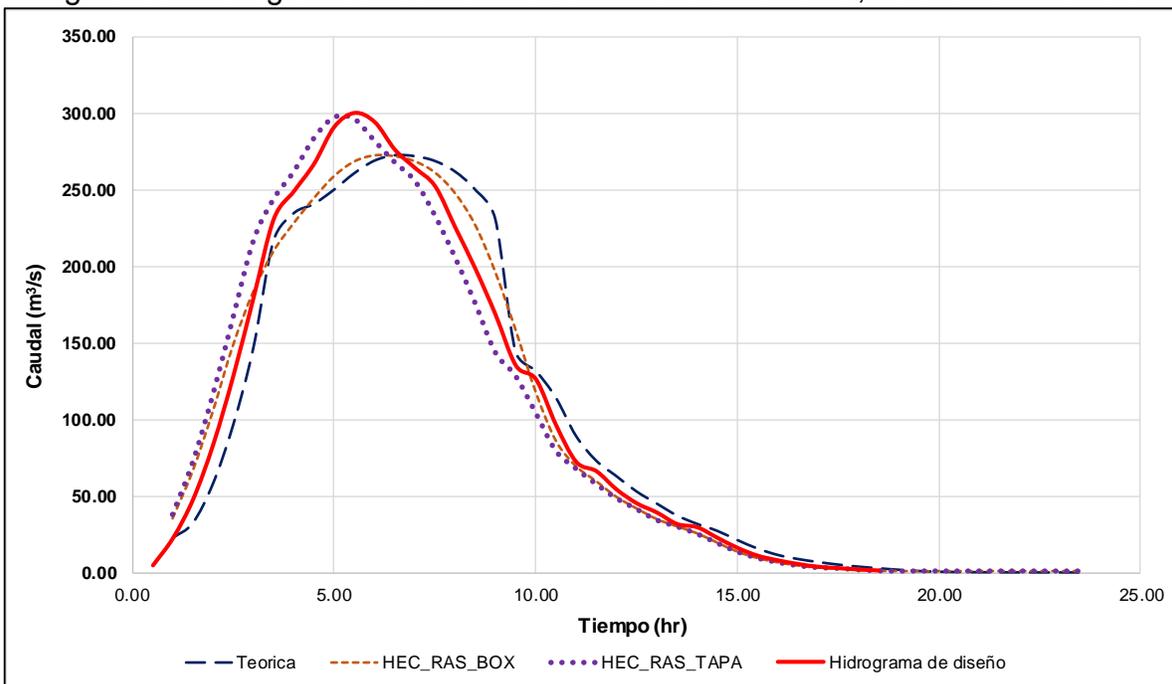
Como se puede observar en la figura anterior las curvas de descarga en el tramo inicial donde el túnel tiene su comportamiento a flujo libre muestran una tendencia muy similar con diferencias muy pequeñas, sin embargo, una vez el túnel comienza a experimentar un comportamiento de flujo a presión se notan diferencias significativas en los resultados obtenidos, diferencias que obedecen a las diferencias en las formulaciones que utilizan cada opción de cálculo para el análisis de flujo a presión.

## 10.2 Análisis de resultados en flujo no permanente

De las estimaciones realizadas mediante las herramientas para la condición de flujo no permanente, es de interés analizar el tránsito del hidrograma de diseño adoptado para las simulaciones.

En la Figura 39 se presentan los hidrogramas transitados por el túnel por cada herramienta utilizada.

Figura 39. Hidrogramas resultantes del tránsito en el túnel, Teoría vs Hec Ras



Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura anterior, el comportamiento del hidrograma transitado con la opción de culvert del Hec – Ras y la herramienta denominada teórica tienen comportamientos similares y se observa un amortiguamiento en tránsito con respecto al hidrograma de entrada o diseño, comportamiento muy distinto se obtiene con el tránsito del hidrograma con la opción tapa del Hec -Ras donde no hay amortiguamiento del hidrograma de entrada.

## 11 CONCLUSIONES

Las herramientas utilizadas tienen planteamientos teóricos distintos, lo que conlleva a que en los resultados se esperen diferencias.

Los datos geométricos extraídos de la información topográfica que permiten representar la geometría del cauce genera diferencias, en el caso del análisis denominado teórico la configuración del cauce aguas arriba del túnel se representa mediante una curva de capacidad de embalse, mientras que el caso del Hec – Ras se utilizó su modulo 1D donde la geometría es representada mediante secciones transversales y que a partir de estas, en el análisis el programa realiza interpolaciones entre secciones para estimar las características hidráulicas de la simulación.

Con los métodos utilizados se tienen limitaciones en cuanto a la modelación del comportamiento del flujo en la presencia geométrica de cambios bruscos de dirección o alineamientos curvos, por lo que en dichos casos se recomienda aumentar los coeficientes de pérdidas, en el caso del presente trabajo se hizo la simplicidad de utilizar un alineamiento de túnel recto.

La herramienta computacional ofrece una mejor y más alternativas de visualización de los resultados con respecto al análisis teórico mediante hojas de cálculo, adicionalmente, la herramienta computacional interactúa con programas de sistemas de información geográfica permitiendo así una mejor presentación visual y esquemática de los resultados obtenidos. Por ejemplo, la mancha de inundación que se puede generar por el represamiento del túnel, observándose de mejor manera las afectaciones que se puedan generar.

Los resultados obtenidos, arrojaron alturas de flujo mayores en la entrada del túnel con el modelo numérico, sin ser diferencias significativas, que llevan a un diseño

conservador pero asociados a mayores costos. Sin embargo, se debe resaltar el hecho de la diferencia de cálculo, el modelo numérico ofrece la ventaja del tránsito de la onda por el tramo de cauce aguas arriba y aguas abajo del túnel, comportamiento que no se realiza al transitar el hidrograma por el túnel con el método teórico por medio de hoja de cálculo, esta situación repercute en que existan diferencias en los cálculos realizados.

Tomando en cuenta las diferencias que se presentan en la conformación geométrica del cauce para los análisis, se recomienda para trabajos futuros realizar un modelo en dos dimensiones que permite una mayor robustez en la construcción geométrica de simulaciones hidráulicas de cauces, aprovechando que en el mercado se cuentan con herramientas computacionales poderosas y gratuitas.

En el mercado existen herramientas computacionales que son de gran ayuda para simulaciones hidráulicas de cauces e infraestructuras hidráulicas. Aunque los modelos físicos representan mejor todas las complejidades que se pueden presentar en las obras hidráulicas, las herramientas computacionales son de gran ayuda para realizar análisis a menores costos y en menor tiempo, por lo que se pueden analizar un mayor número de situaciones.

En la práctica de la ingeniería, al plantear un túnel para la desviación de cauces cuando la presa a construir es de material flexible (térreos, enrocados o mixtos), se proyecta que trabaje en condición de flujo libre, teniendo en cuenta que no se puede permitir un sobre paso de flujo por la presa en construcción. En caso contrario, cuando la presa es en concreto, se puede permitir flujo por la presa en construcción y el túnel puede trabajar a presión. Si el túnel trabaja bajo la condición de flujo a superficie libre, y de acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones, utilizar la opción de Culvert de la herramienta Hec – Ras resulta de gran utilidad por las ventajas computacionales y de presentación de resultados, como poder visualizar fácilmente las manchas de inundación.

## 12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (1982). *Diseño de presas pequeñas, México D.F., México*. Editorial continental S.A.

E. BLADÉ, M SÁNCHEZ-JUNY, H.P. SÁNCHEZ, D. ÑIÑEROLA, M. GÓMEZ, (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable – Una visión a partir del modelo HEC-RAS*, Barcelona, España. Editorial UPC.

Ven Te Chow, (1994). *Hidrología Aplicada*, Santafé de Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, (2010). *HEC-RAS. River Analysis System*, HEC-RAS 4.1 User's Manual.

Comisión Federal de Electricidad, (1983). *Manual de diseño de obras civiles, Obras de desvío*, México D.F. México. Centro editorial C.F.E.

Anexo 1. Memorias hoja de cálculo

## Anexo 2. Memoria de cálculo del Hec Ras