APÉNDICE 2
ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

1 Análisis Hidráulico Canal Santa Cruz

1.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda el estudio hidráulico-fluvial del canal en la zona de proyecto, estudio que tiene por objetivo la determinación de las cotas de eje hidráulico, así como los parámetros destinados a la velocidad del flujo tanto para las situaciones sin y con proyecto para el escenario deseado (caudal) obtenido y acordado con la asociación de canalistas y que en esta oportunidad corresponde a:

- $Q_{diseño}$=2.55 m^3/s

En el presente capítulo, se presentan primero, los antecedentes de ingeniería básica recopilados en terreno (topografía, perfiles transversales) que permitieron elaborar los estudios hidráulicos en cuestión. Posteriormente, a partir de los caudales obtenidos, definidos en el capítulo anterior y antecedentes de ingeniería básica, se efectuó el modelo hidráulico respectivo tanto para las situaciones sin proyecto y con proyecto. Al final del presente apéndice se entregan los resultados tabulados junto con sus láminas respectivas.

1.2 Estudios Básicos.

a) Topografía.

En la zona de estudio se realizó un levantamiento topográfico del sector, incluyendo sus zonas de inundación y que se materializo en 14 perfiles topobatimétricos, los que permitieron un conocimiento del canal en un tramo de 78 metros aproximadamente. Esto permitió generar los antecedentes básicos necesarios para el cálculo de los ejes hidráulicos y sus parámetros asociados.

1.3 Análisis Hidráulico Fluvial.

El análisis hidráulico-fluvial que se presenta a continuación se efectuó mediante modelación hidráulica realizada con el software HEC-RAS Versión 5.0, (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers.

Este programa es el modelo matemático más utilizado en la actualidad para la resolución de regímenes permanentes (variado y uniforme) y permite simular el movimiento estacionario unidimensional (flujo unidireccional) de una corriente de agua. Esta aproximación de flujo unidireccional es válida, puesto que la componente de la velocidad en la dirección del flujo es la componente principal en la totalidad de las corrientes analizadas.

Además, el programa ofrece la posibilidad de analizar distintos tipos de régimen: lento, crítico, rápido y mixto. Para la aplicación del modelo, se hace la suposición de que el lecho es fijo.

El método de cálculo del HEC-RAS está basado en la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y en la ecuación de conservación de la energía (unidimensional). No obstante, el método de cálculo requiere admitir la hipótesis de que la pérdida de carga por roce en una sección es la que tendría un flujo uniforme de la misma velocidad y radio hidráulico.

Se consideran en el proceso las pérdidas de carga por fricción (Manning) y pérdidas de carga localizadas por contracción-expansión (coeficiente de pérdidas multiplicado por la variación de la carga de energía cinética entre secciones).

Entre sus principales características técnicas se destacan:

- Realiza el cálculo hidráulico de diversas tipologías estructurales.
- Permite la visualización gráfica de resultados y permite la edición gráfica de secciones transversales.
- Considera secciones variables (no prismáticas)
- Es posible incorporar condiciones de borde y de control arbitrarias, lo cual permite considerar tramos con distintos regímenes de escurrimiento, río y torrente, dentro de la misma red de drenaje.
- Resuelve las confluencias del cauce principal con sus afluentes (nodos) mediante los métodos de la conservación de la energía o del momentum.
- En las secciones transversales se puede definir el cauce principal y sus áreas de inundación considerando rugosidades y, por lo tanto, velocidades diferenciales.
- El modelo incluye también pérdidas por contracciones o expansiones naturales del cauce.
- A pesar de ser unidimensional incorpora los efectos de los meandros del cauce.
- Permite identificar en los perfiles el cauce principal y los secundarios.
- El programa cuenta además con subrutinas gráficas que permiten visualizar en 2 y 3 dimensiones el escurrimiento tanto en el cauce como en las obras.
- Para el caso de los puentes, el cálculo se realiza por diferentes métodos (Energía, Momentum, Ecuación de Yarnell, etc.) de acuerdo a la clase de flujo (A, B, o C) y la selección del usuario; el resultado adoptado puede ser el de un método específico elegido por el usuario, o el más desfavorable si así se selecciona.

- Cabe señalar que, de acuerdo con las recomendaciones señaladas en el HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, en su sub-acápite denominado Parallel Bridges (dentro del capítulo 5), dada la condición de puentes paralelos cercanos para la doble calzada, la situación de ambos puede modelarse como la de un sólo puente.

Los datos básicos de partida requeridos para la modelización con HEC-RAS son de dos tipos: datos geométricos y datos de flujo estacionario.

Los datos de entrada utilizados en la modelación se presentan a continuación.

- Geometría de las secciones transversales del cauce que definan los cambios representativos del mismo en el tramo analizado.
- Distancia entre secciones o perfiles transversales del cauce utilizados en el estudio (longitud de los tramos: cauce, margen izquierda y margen derecha).
- Caudal de diseño: Se utilizó el caudal acordado de 2.55 m3/s.
- Condiciones de contorno: Para aguas arriba y abajo, se establece condición de altura normal con pendiente media igual a la del cauce.
- Rugosidad del cauce y de las márgenes (valores del coeficiente de rugosidad n de Manning).
- Coeficientes de pérdidas de carga por expansión y contracción.

a) Coeficiente de Rugosidad.

Para estimar los coeficientes de rugosidad del cauce en el tramo de estudio se empleó el método de Cowan, según lo recomendado por el Manual de Carreteras, Volumen 3, sección 3.707.104.

El método de Cowan permite determinar el coeficiente de Manning de acuerdo a las condiciones del lecho, según su material, irregularidades, vegetación, meandros, etc. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$n = m \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad (ec.3.707.104.1 \ \ Manual \ \ de \ \ Carreteras)$$

Donde:

n0: Rugosidad base para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.
n1: Rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.
n2: Rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.
n3: Rugosidad adicional equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce

n4: Rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación
m: Factor de corrección para incorporar el efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros

Los valores adoptados como coeficientes de Manning para el cauce y zonas de inundación se muestran en la Tabla N°3-2, los cuales fueron obtenidos de la Tabla N°3.707.104.1.B del Manual de Carreteras, según las características observadas en terreno.

Tabla N°3-1
Coeficiente de Manning según Método de Cowan

CONDICIONES DEL CANAL		VALOR	
Material del Lecho	Tierra Roca Cortada Grava Fina Grava Gruesa	n_0	0,020 0,025 0,024 0,028
Grado de Irregularidad Perímetro Mojado	Despreciable Leve Moderado Alto	n_1	0,000 0,005 0,010 0,020
Variaciones de las Secciones	Graduales Alternándose Ocasionalmente Alternándose Frecuentemente	n_2	0,000 0,005 0,010 – 0,015
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Despreciable Leve Apreciable Alto	n_3	0,000 0,010 – 0,015 0,020 – 0,030 0,040 – 0,060
Densidad de Vegetación	Baja Media Alta Muy Alta	n_4	0,005 – 0,010 0,010 – 0,025 0,025 – 0,050 0,050 – 0,100
Sinuosidad y Frecuencia de Meandros	Leve Apreciable Alto	m	1,000 1,150 1,300

Fuente: Tabla N°3.707.104.1.B Manual de Carreteras, Volumen 3.

Tabla Nº 3-2
Coeficientes de Rugosidad Adoptados por Método de Cowan

Estero	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	m	n adoptado
Canal Santa Cruz	0,025	0,000	0,000	0,000	0,010	1,000	0,035

Fuente: Elaboración Propia

b) Otros Parámetros Modelo HEC.

Para modelación:

- Condiciones de Borde: Altura normal con pendiente
  - Canal: 0,00561.
- Coeficiente Resistencia de Pila Método Momentum: 1,33
- Coeficiente Forma de Pila Método Yarnell: 1,25
- Coeficientes de Contracción y Expansión en Vecindad Puente existente: 0,3 y 0,5 respectivamente.

c) Cálculos y Resultados

Las salidas del modelo numérico se presentan en forma de tablas y gráficos que incluyen toda la información hidráulica de modo que facilite su revisión y comprensión.

Al final del presente apéndice, se entregan en detalle los resultados obtenidos del cálculo del eje hidráulico de la zona en estudio. Los resultados se presentan para el caudal de diseño y para las situaciones sin y con proyecto. Además, en el Apéndice 3 se entregan los archivos digitales del modelo HEC-RAS.

En las siguientes ilustraciones es posible observar los ejes hidráulicos para el caudal analizado en vista longitudinal, tanto para la situación sin proyecto, como para la situación con proyecto.

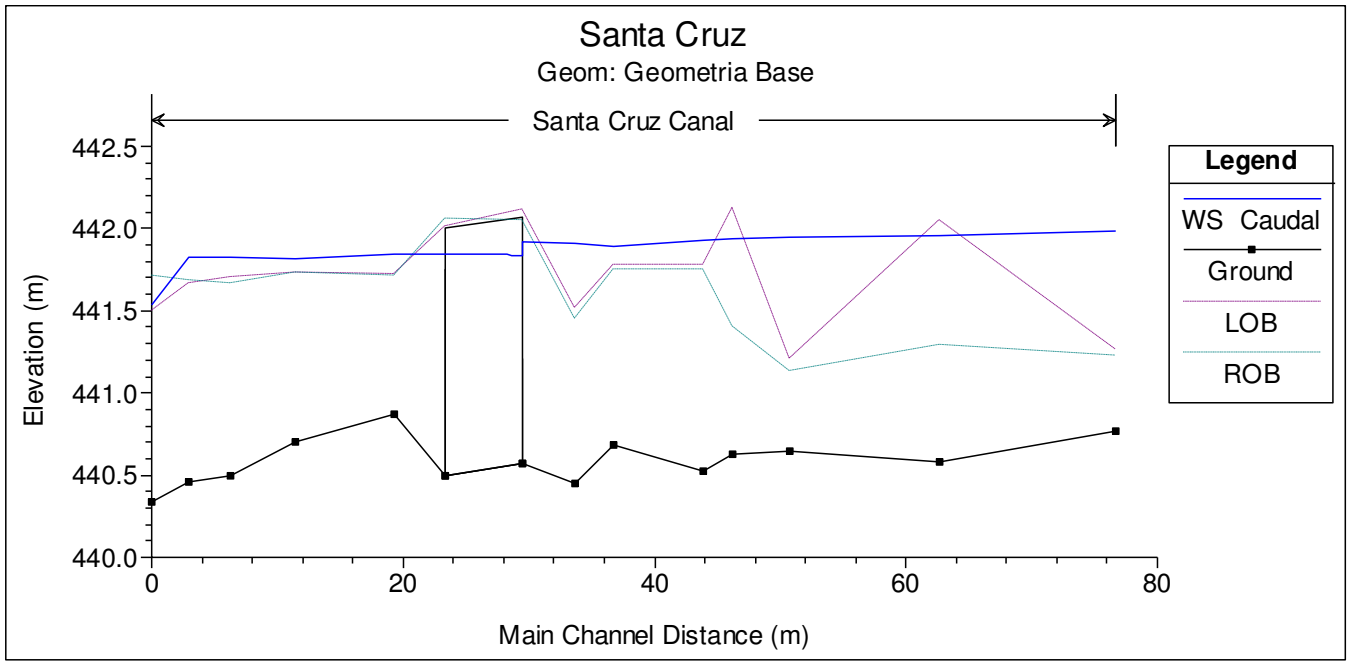


Figura 3-1: Perfil Longitudinal Eje Hidráulico - Situación Sin Proyecto

Fuente: Elaboración Propia

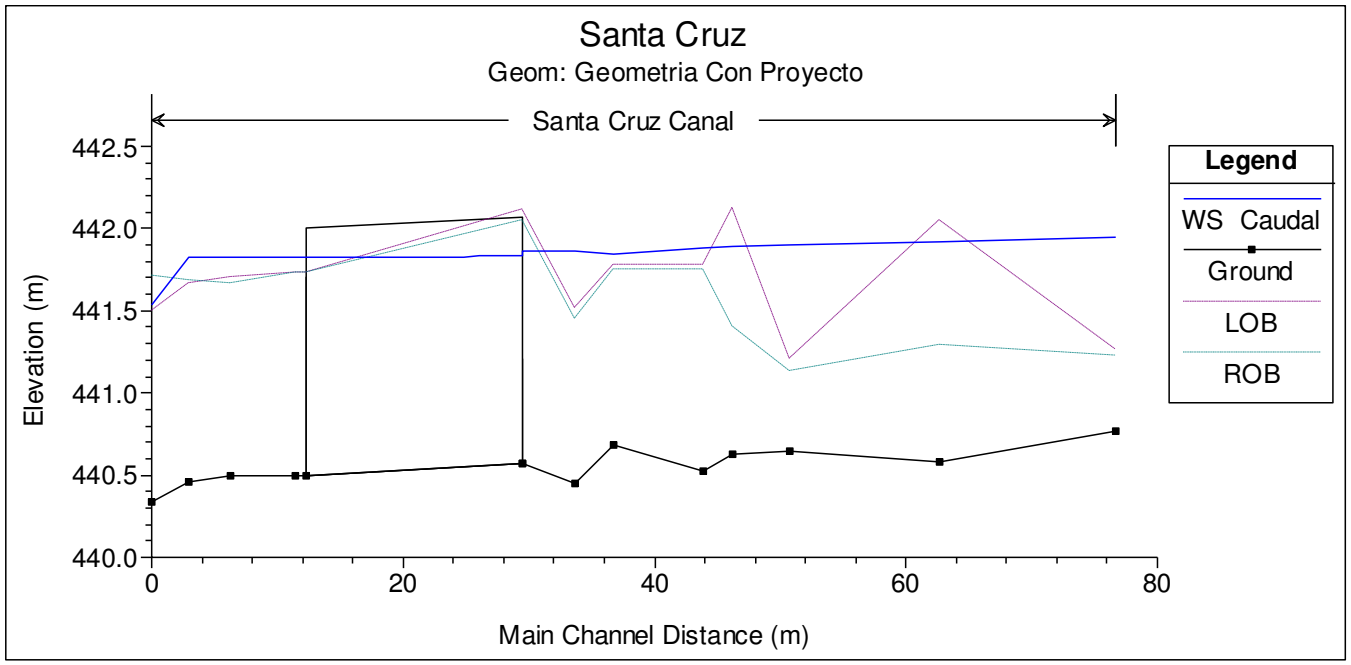


Figura 3-2: Perfil Longitudinal Eje Hidráulico - Situación Con Proyecto

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera se presentan a continuación en las siguientes figuras, una vista isométrica del canal Santa Cruz, para las situaciones sin y con proyecto

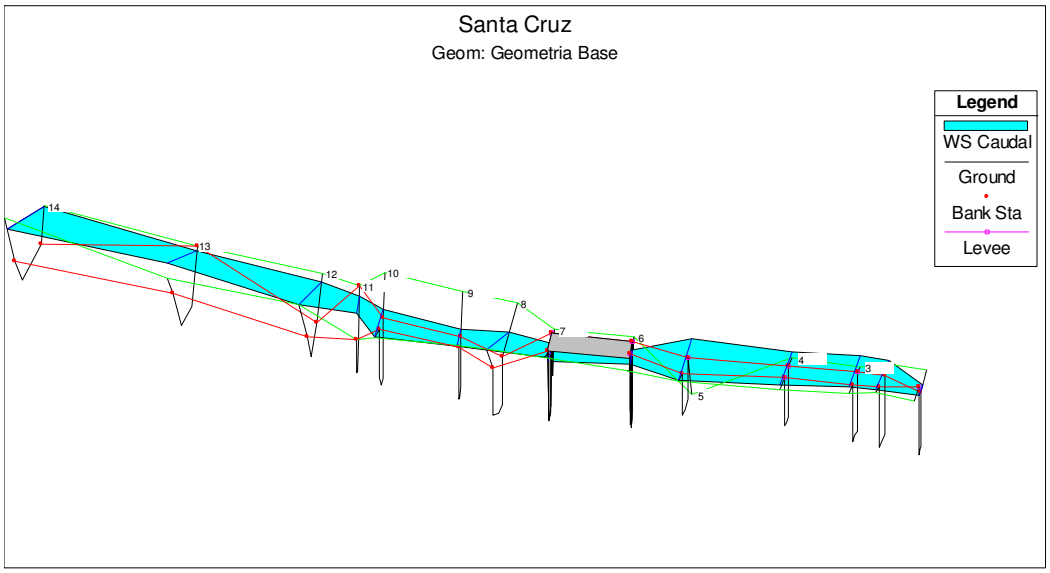


Figura 3-3: Vista Isométrica - Situación Sin Proyecto
Fuente: Elaboración Propia

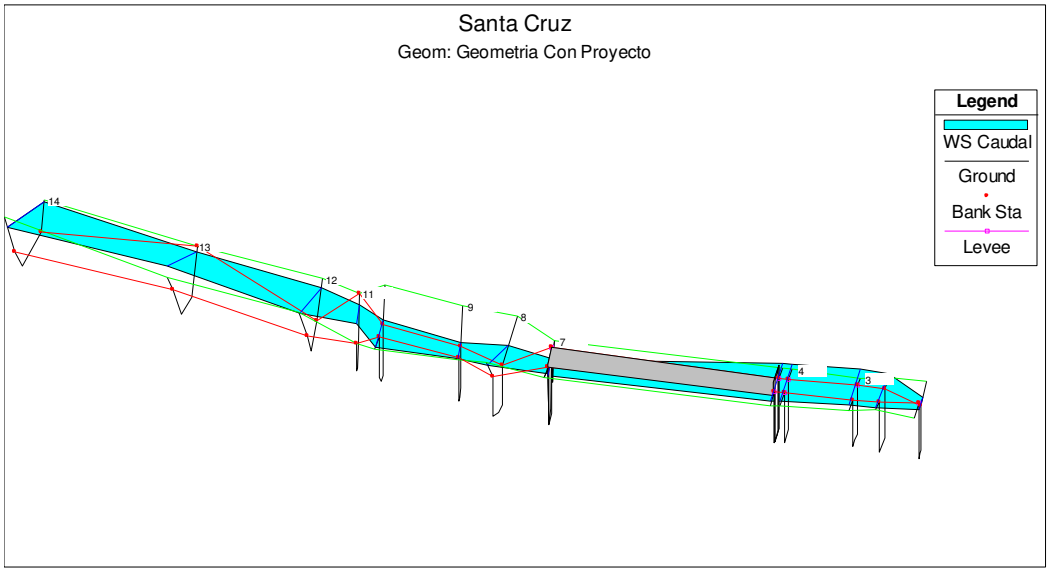


Figura 3-4: Vista Isométrica - Situación Con Proyecto
Fuente: Elaboración Propia

2 Hidrodinámica y Balance de Masas

2.1 Introducción

El PAS 155 requiere un estudio de hidrodinámica que incluya la caracterización de los principales flujos de agua involucrados en el diseño de la obra y su relación con los flujos existentes en el emplazamiento. Además, requiere que el estudio de balance de aguas debe incluir un balance completo de aguas respecto de todas las obras involucradas (captación, aducción, utilización, tratamientos, descargas, etc.).

Los flujos actuales, indican que el canal Santa Cruz, viene desde el sur hacia el norte, cruzando la vía ferroviaria actual, luego de lo cual se divide en tres derivados, el primero el derivado Valdez – Larraín, cual sigue por el poniente, mientras el canal Santa Cruz va al norte oriente y el tercer derivado, llamado Poblete, sigue en dirección poniente. En la siguiente figura se presenta la forma y los sentidos de escurrimiento de los flujos para la situación actual

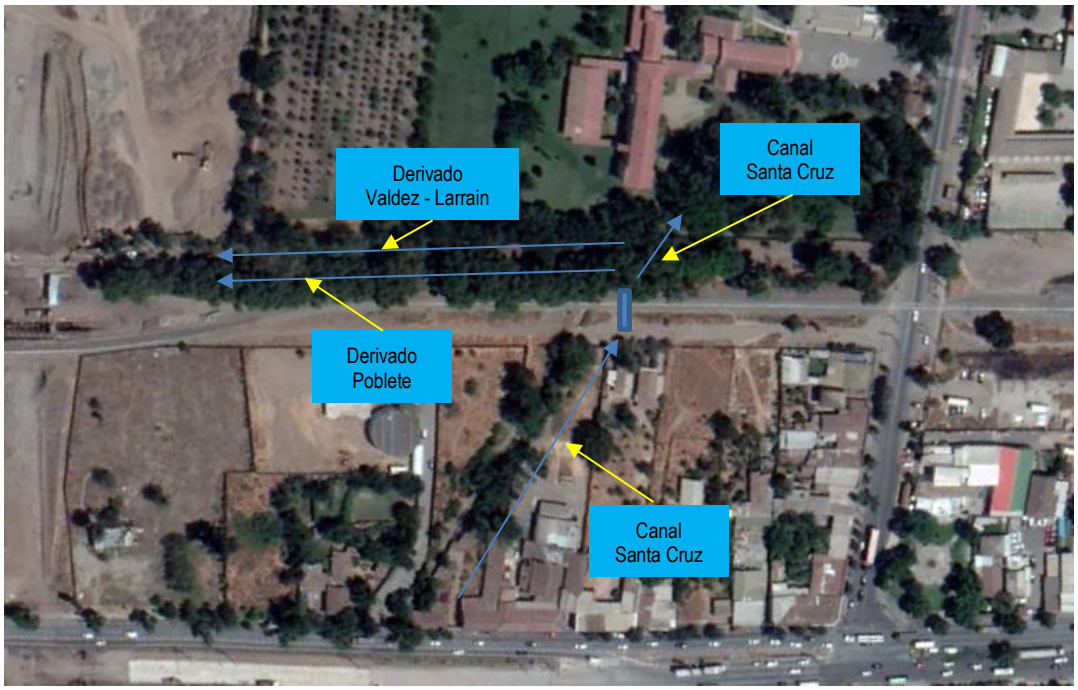


Figura N° 3-1: Balance de caudales – Situación Actual
Fuente: Elaboración Propia

Para la situación futura, la construcción de la obra de arte y la nueva canalización al norte, permitirán los respectivos flujos del canal Santa Cruz, mantener su actual escurrimiento de sur hacia el norte, no afectando

el funcionamiento de éste, permitiendo portear el mismo caudal que ahora conduce y con el nuevo marco partidor, mantener las entregas de caudal hacia los derivados Valdez-Larraín y Poblete los cuales siguen en dirección poniente. En la siguiente figura se presenta la forma y los sentidos de escurrimiento de los flujos para la situación futura.

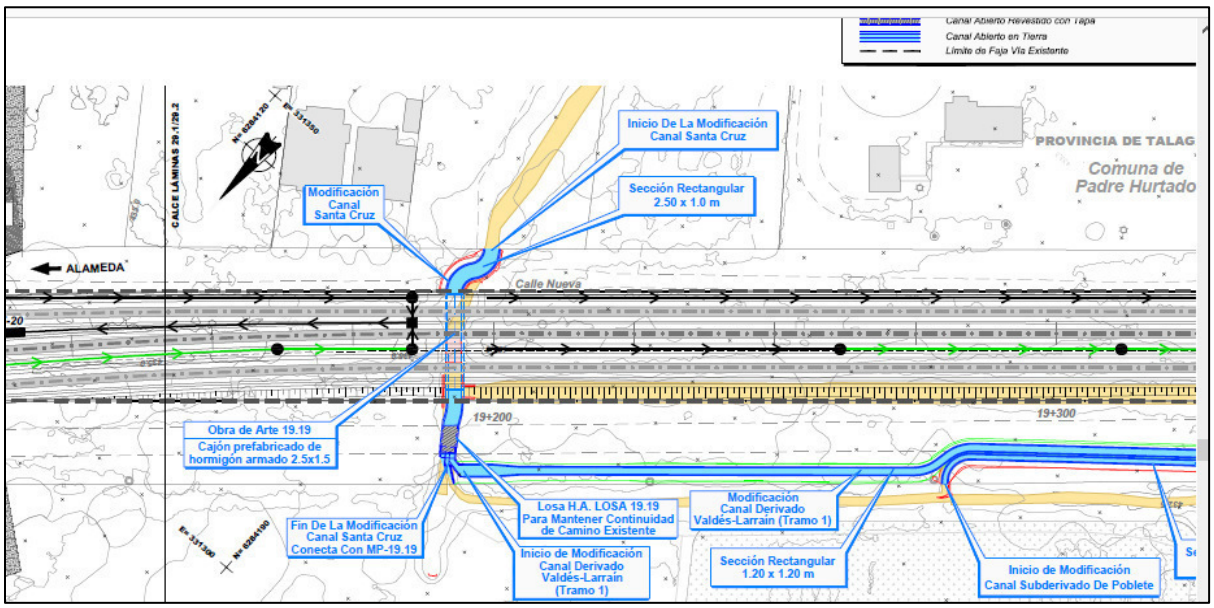


Figura N° 3-2: Balance de caudales – Situación Futura

Fuente: Elaboración Propia

Respaldo de Modelaciones

Canal Santa Cruz - Sin Proyecto

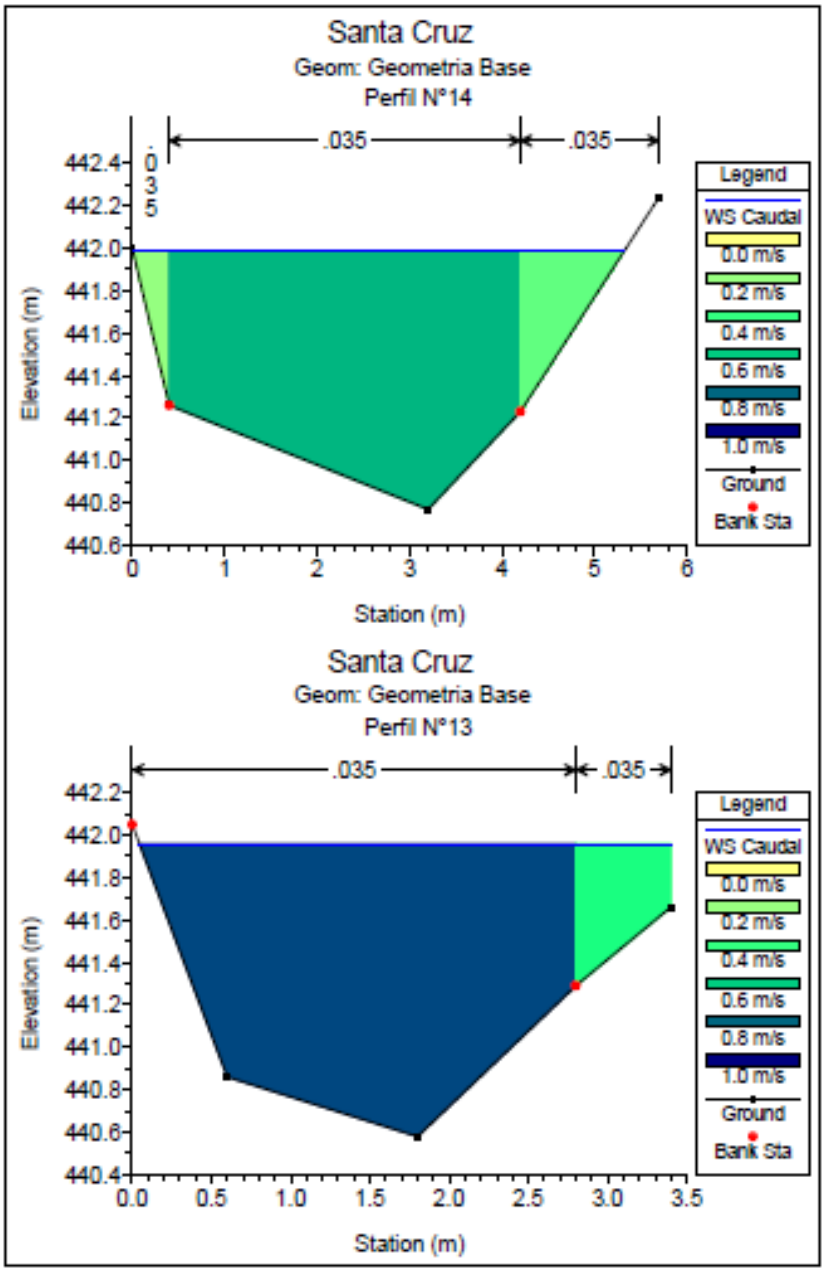
Perfil	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude
14	2.55	440.77	441.99	441.37	442.01	0.64	4.28	5.32	0.21
13	2.55	440.58	441.96	441.32	441.99	0.86	3.1	3.35	0.27
12	2.55	440.65	441.95	441.43	441.98	0.89	3.38	4.94	0.28
11	2.6	440.63	441.94	441.34	441.97	0.85	3.00	3.37	0.29
10	2.6	440.52	441.93	441.13	441.97	0.94	3.02	5.52	0.26
9	2.6	440.68	441.89	441.3	441.97	1.19	2.25	3.39	0.35
8	2.6	440.45	441.91	441.09	441.96	1.01	2.92	4.07	0.27
7	2.6	440.57	441.91	441.18	441.95	0.85	2.99	2.85	0.27
6	2.6	440.5	441.84	441.09	441.87	0.74	3.43	2.90	0.22
5	2.6	440.87	441.85	441.27	441.87	0.70	4.88	8.40	0.23
4	2.6	440.7	441.82	441.2	441.86	0.94	3.09	6.70	0.29
3	2.6	440.5	441.83	441.02	441.86	0.79	3.75	6.40	0.22
2	2.6	440.46	441.83	440.94	441.86	0.74	3.77	6.00	0.20
1	2.6	440.34	441.54	441.28	441.83	2.39	1.08	1.87	0.70

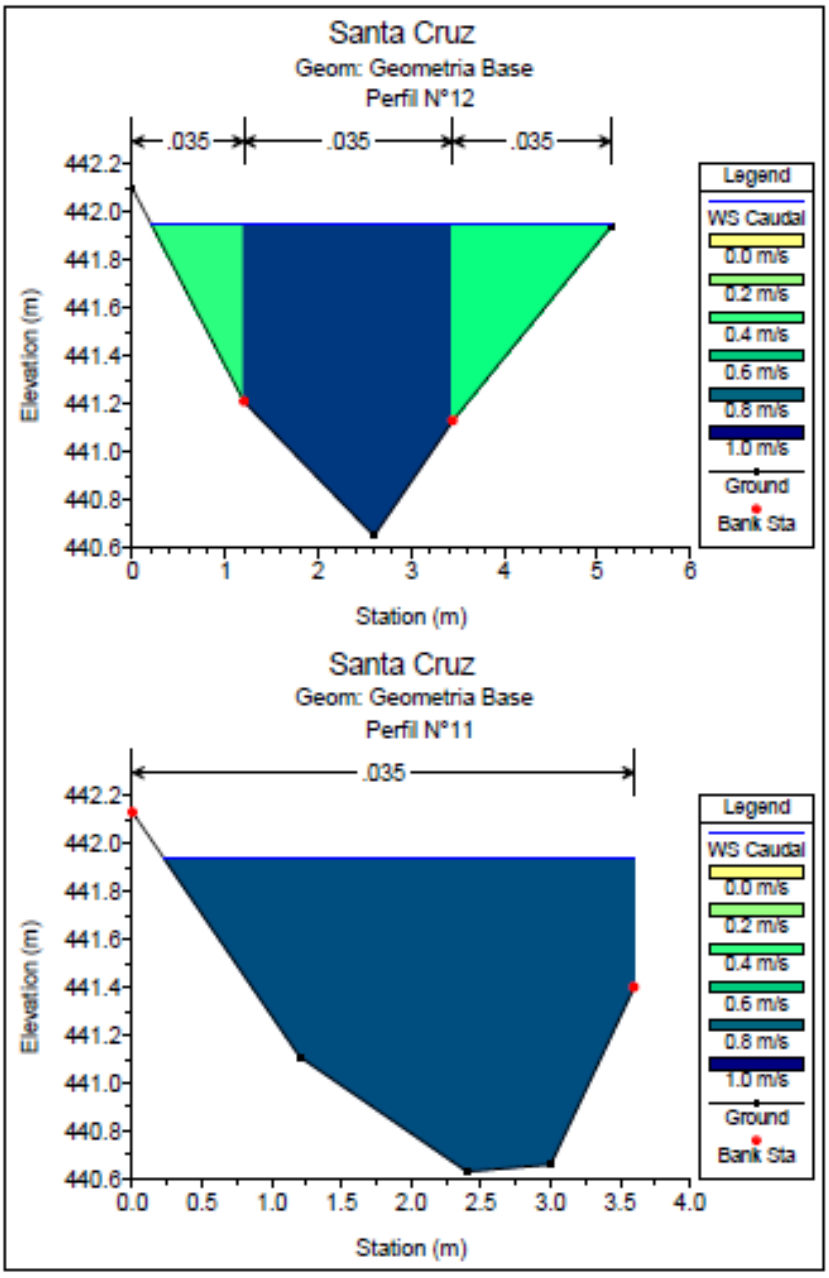
Canal Santa Cruz - Con Proyecto

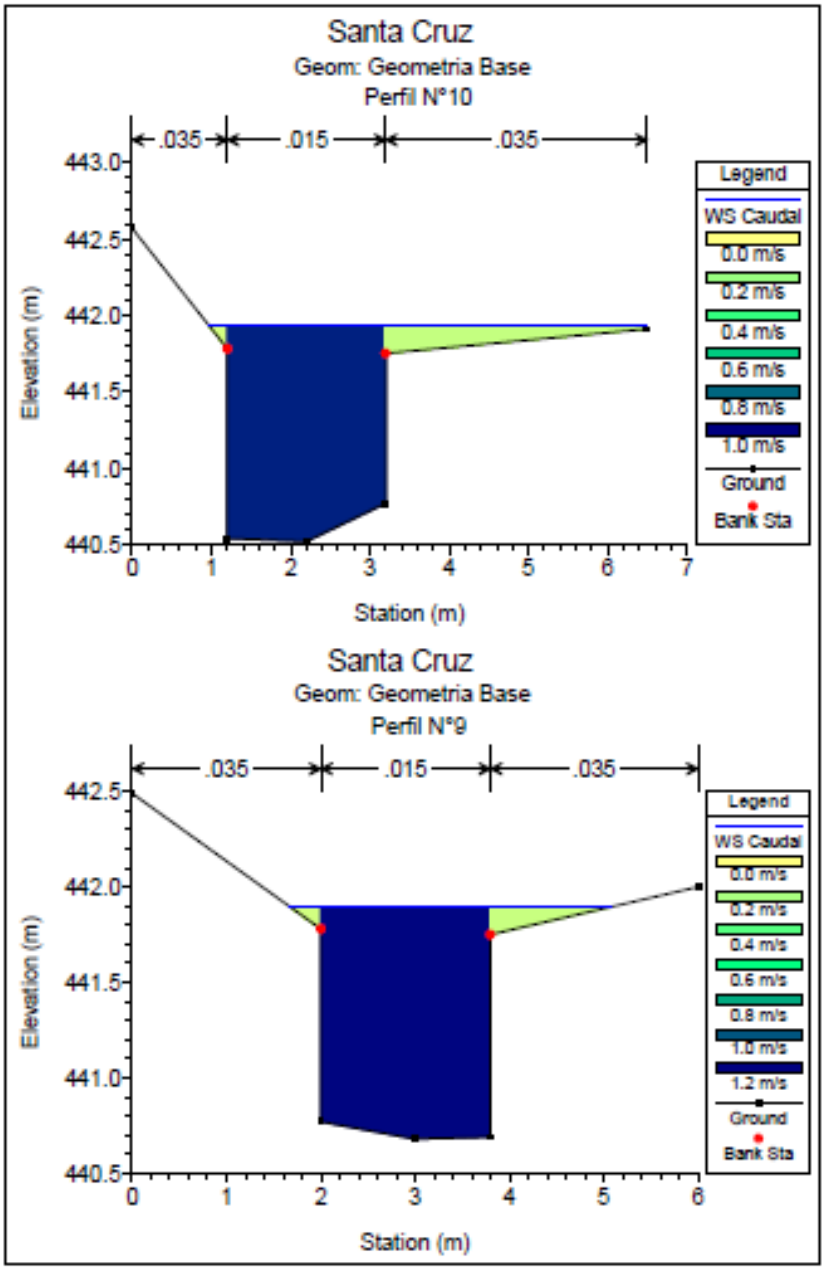
Perfil	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude
14	2.55	440.77	441.95	441.37	441.97	0.67	4.08	5.24	0.22
13	2.55	440.58	441.92	441.32	441.96	0.9	2.96	3.33	0.29
12	2.55	440.65	441.9	441.43	441.94	0.95	3.16	4.8	0.3
11	2.6	440.63	441.89	441.34	441.93	0.89	2.85	3.32	0.31
10	2.6	440.52	441.88	441.13	441.93	0.98	2.78	4.87	0.27
9	2.6	440.68	441.84	441.3	441.92	1.24	2.09	2.81	0.37
8	2.6	440.45	441.86	441.09	441.91	1.06	2.73	3.80	0.29
7	2.6	440.57	441.87	441.18	441.91	0.89	2.86	2.81	0.28
4	2.6	440.5	441.83	440.99	441.86	0.78	3.66	6.70	0.22
3	2.6	440.5	441.83	441.02	441.86	0.79	3.75	6.40	0.22
2	2.6	440.46	441.83	440.94	441.86	0.74	3.77	6.00	0.20
1	2.6	440.34	441.54	441.28	441.83	2.39	1.08	1.87	0.70

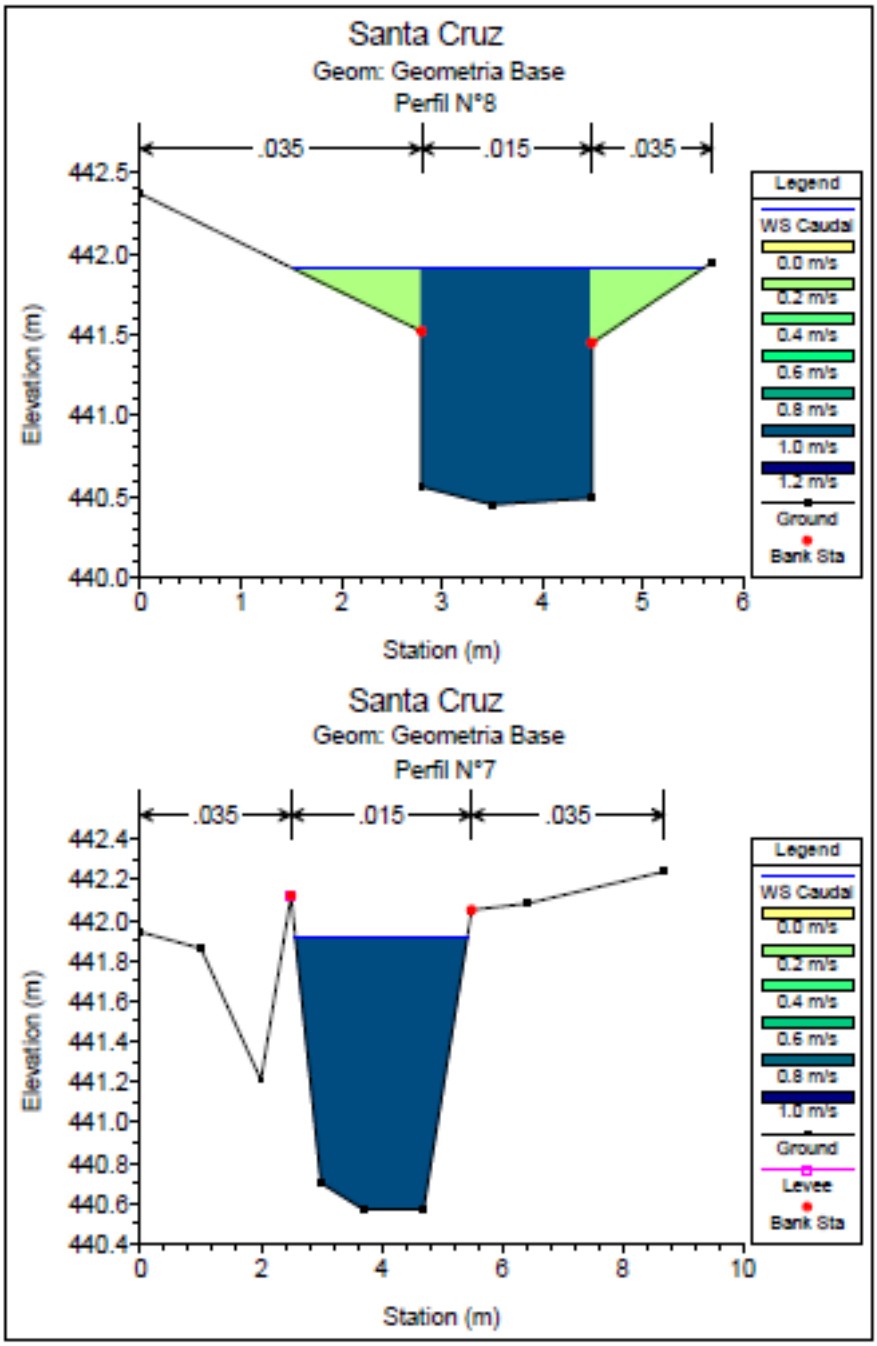
Perfiles Transversales

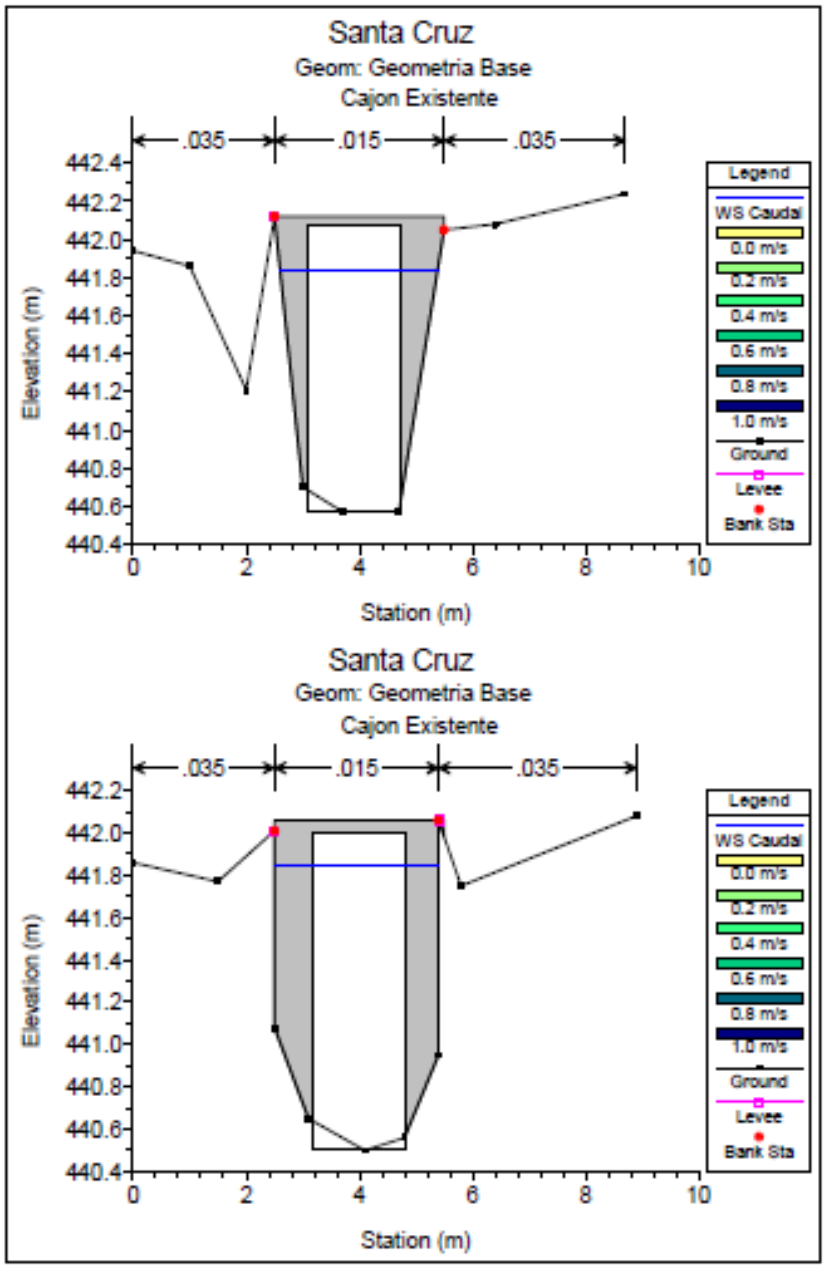
Perfiles Situación Sin Proyecto

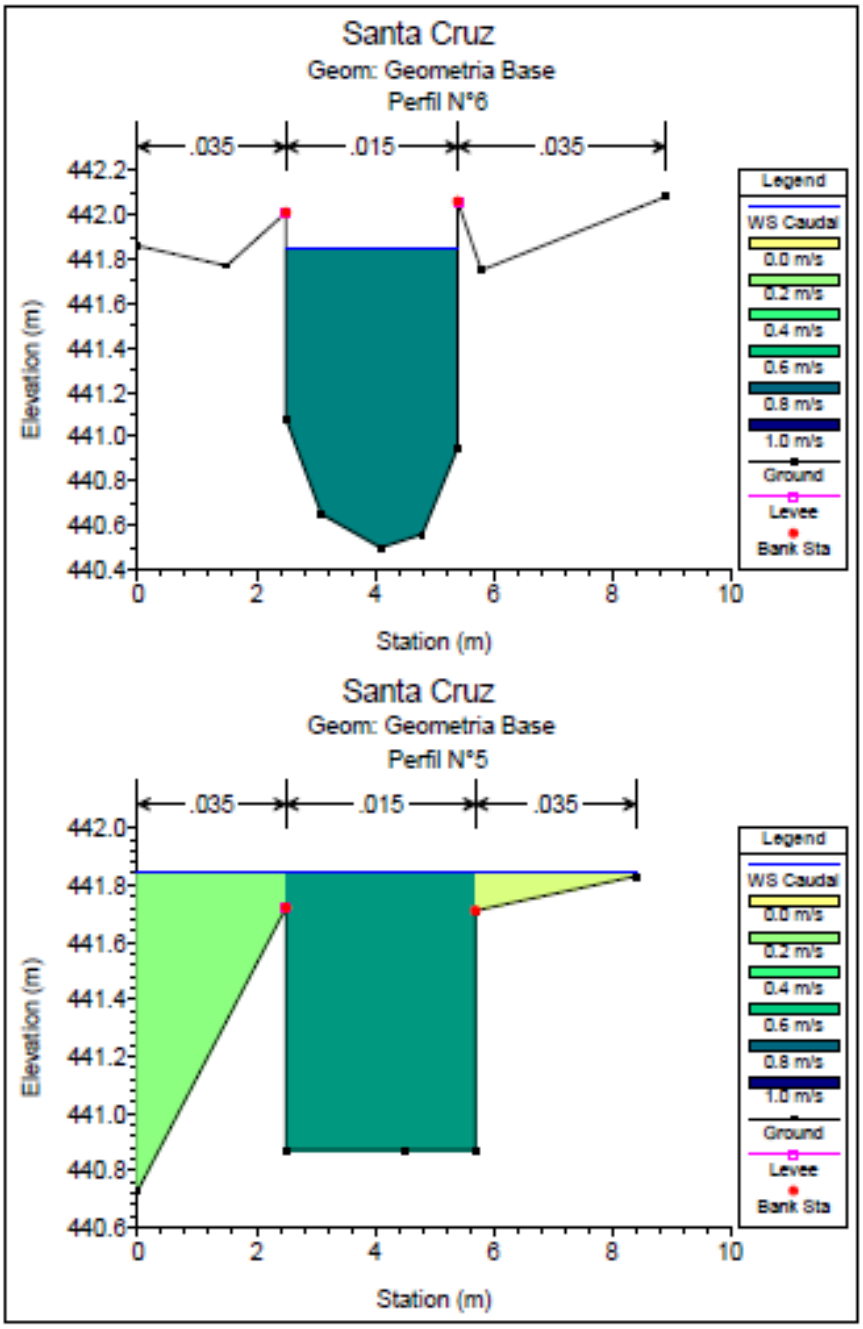


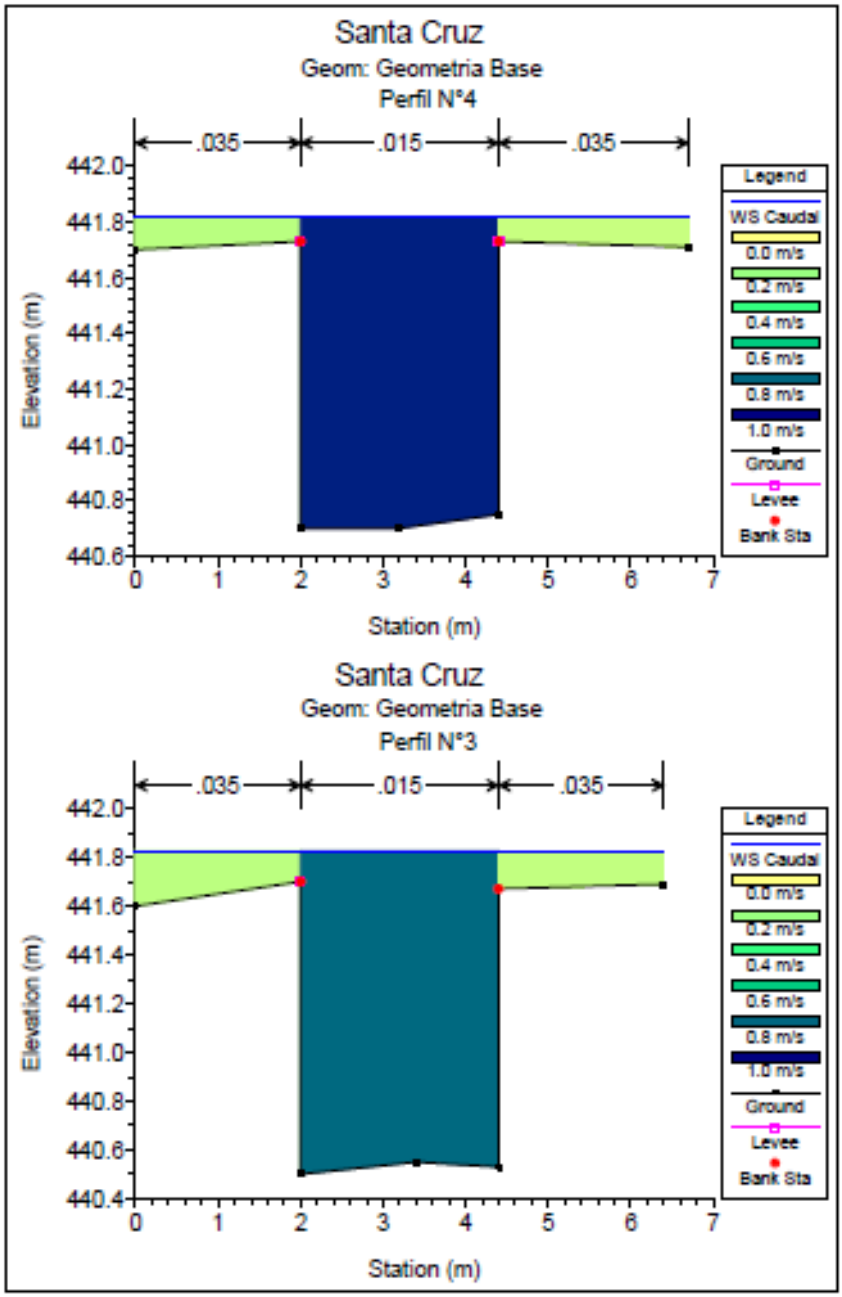

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°12
.035
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°11
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta

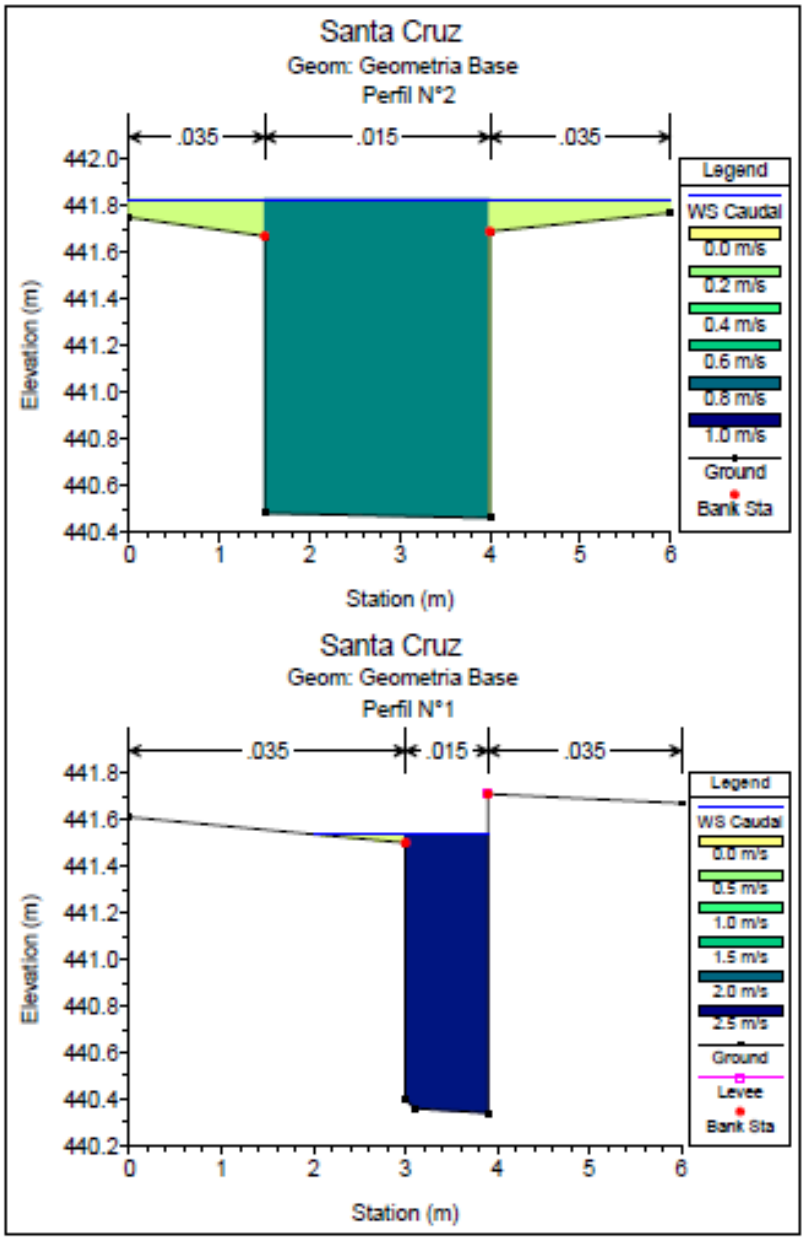

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°10
.035
.015
.035
443.0
442.5
442.0
441.5
441.0
440.5
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°9
.035
.015
.035
442.5
442.0
441.5
441.0
440.5
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
1.2 m/s
Ground
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°8
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
1.2 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°7
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta

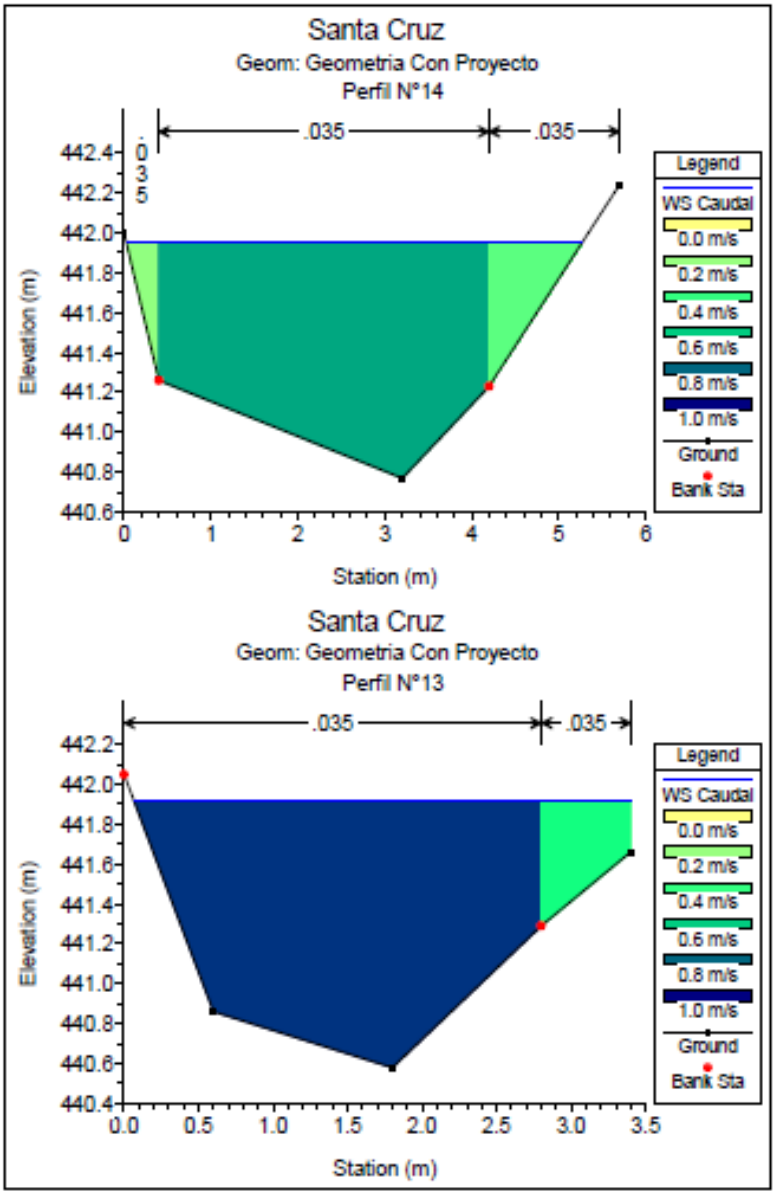

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Cajon Existente
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Cajon Existente
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta

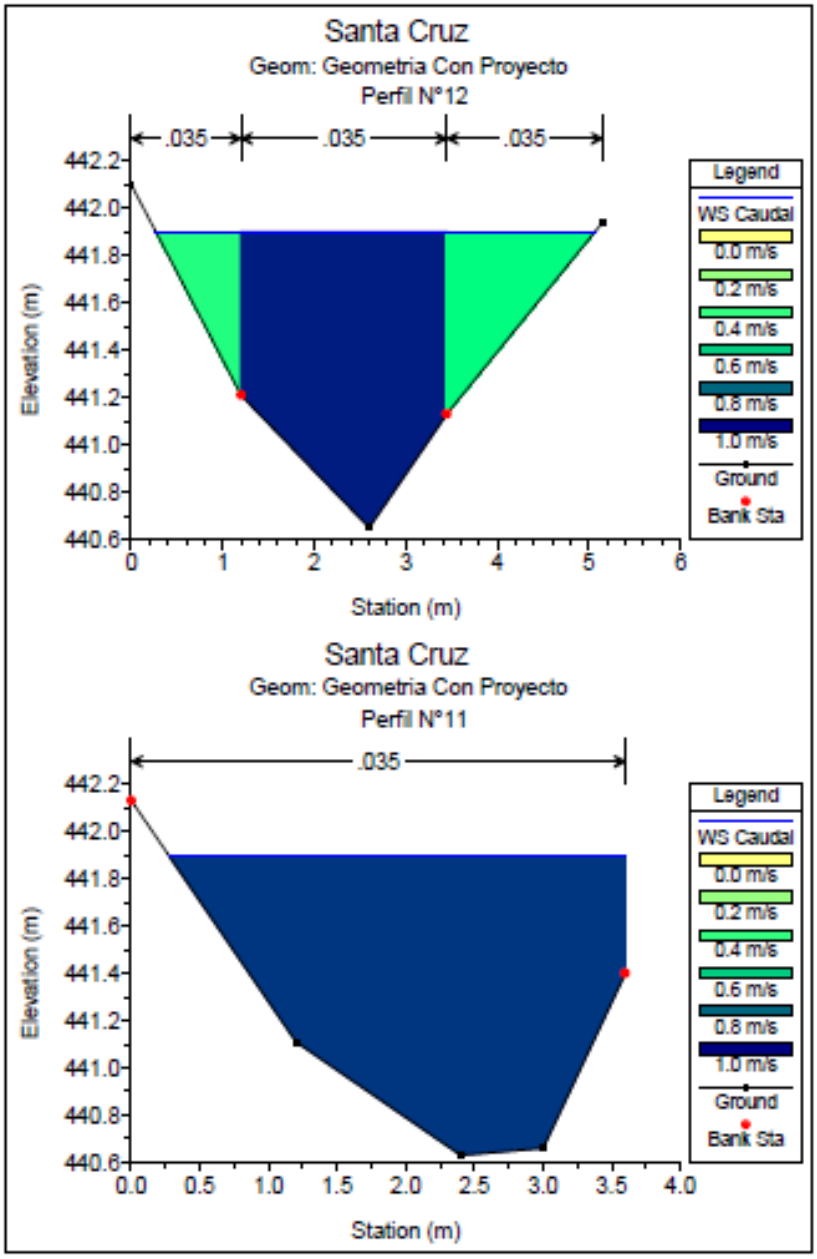

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°6
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°5
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta

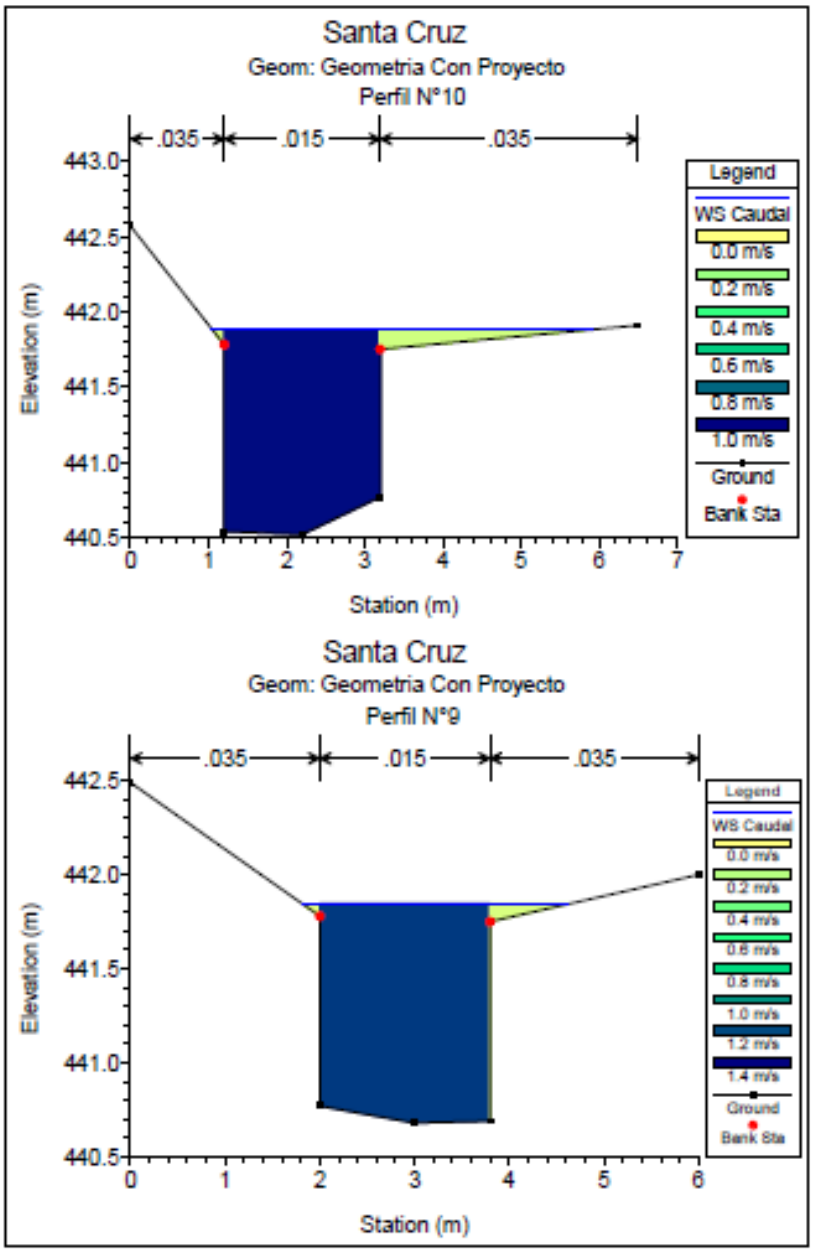

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°4
.035
.015
.035
442.0
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°3
.035
.015
.035
442.0
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
440.4
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta

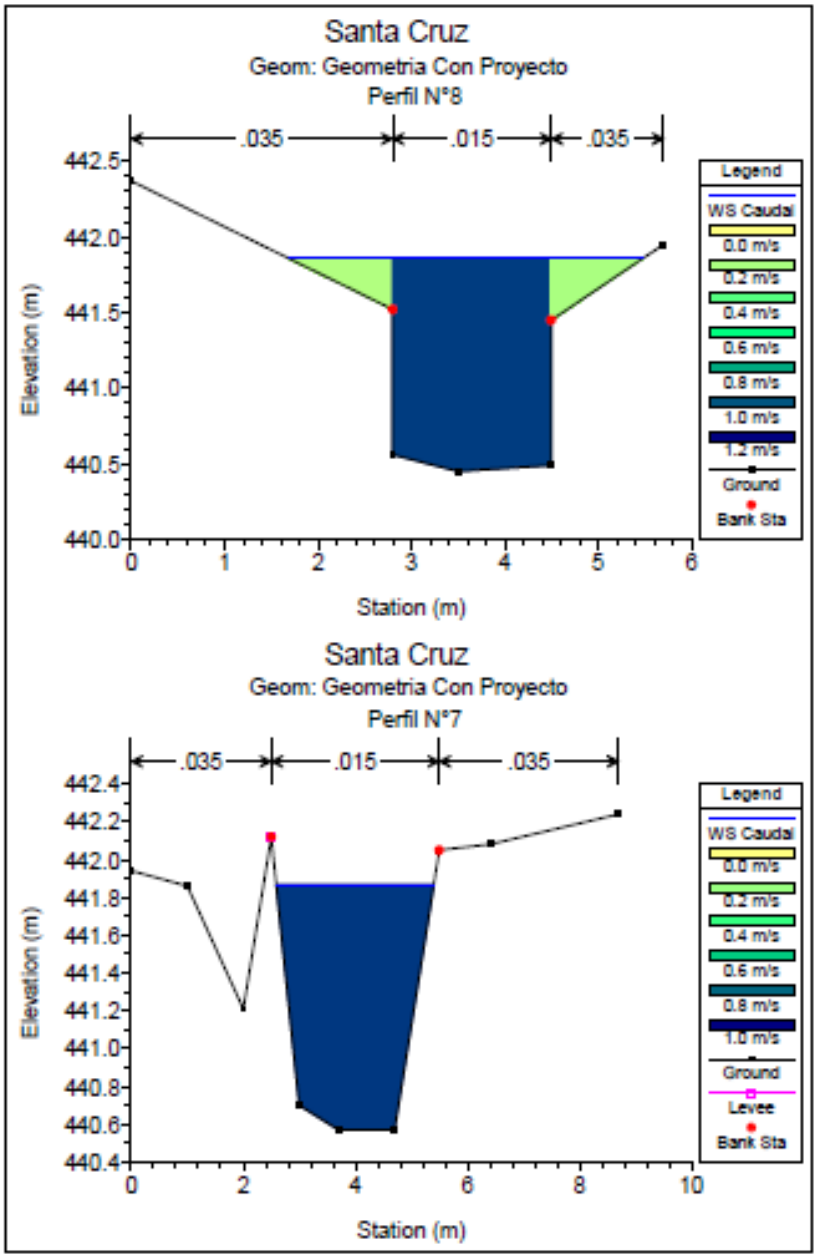

Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°2
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Base
Perfil N°1
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.5 m/s
1.0 m/s
1.5 m/s
2.0 m/s
2.5 m/s
Ground
Levee
Bank Sta

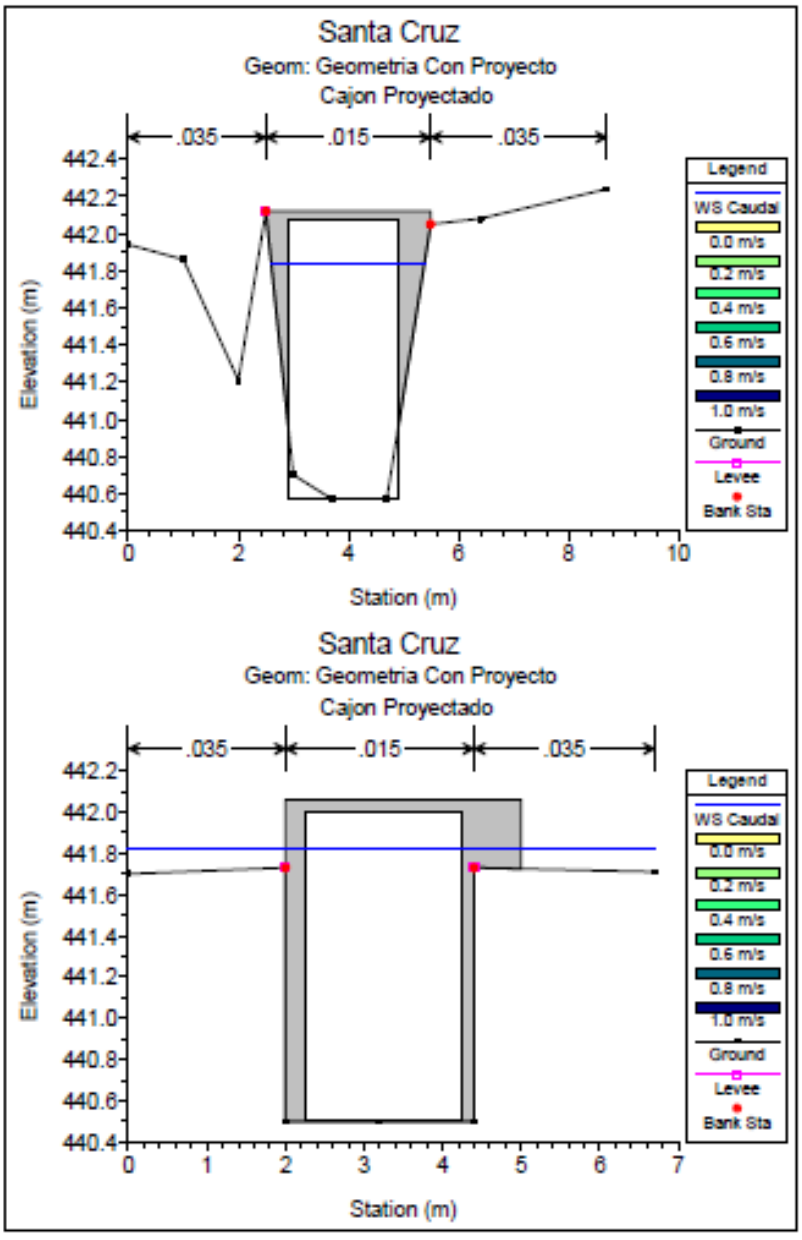
Perfiles Situación Con Proyecto

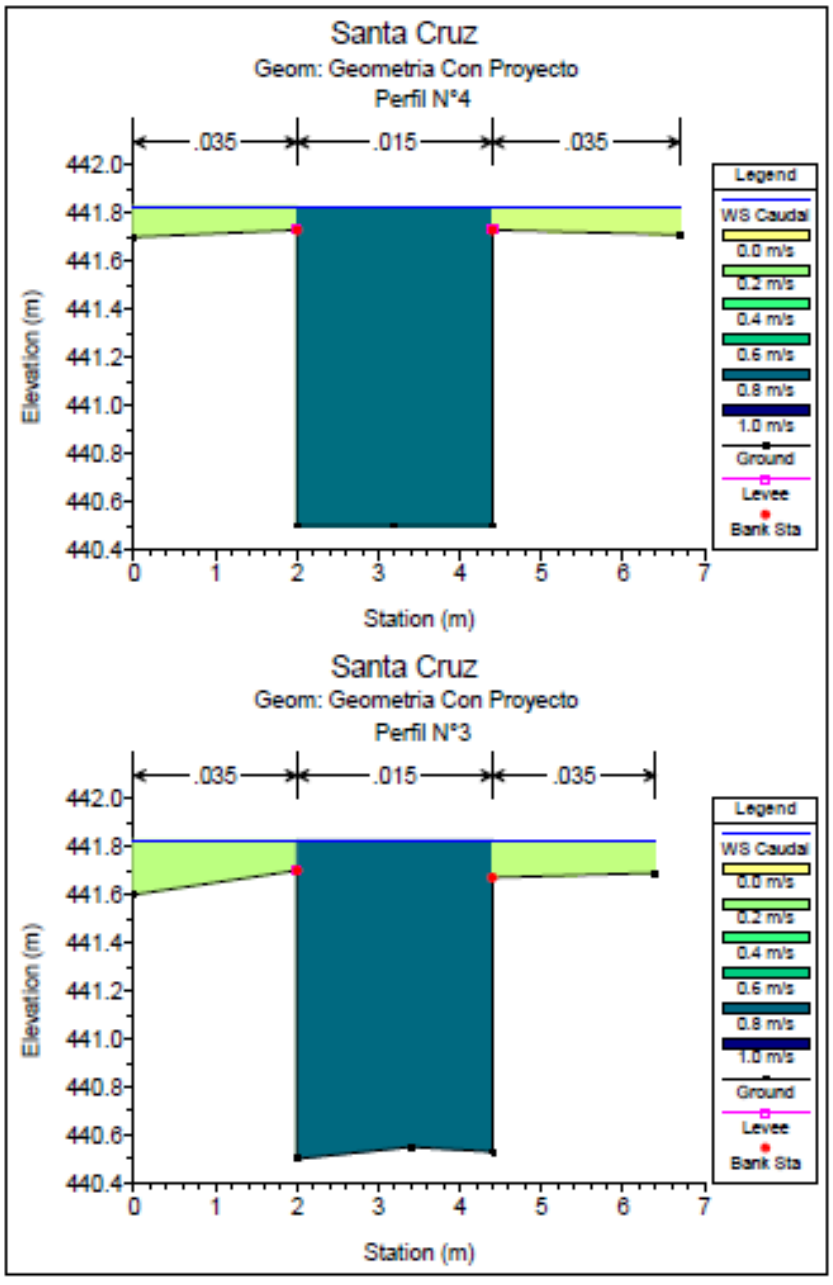


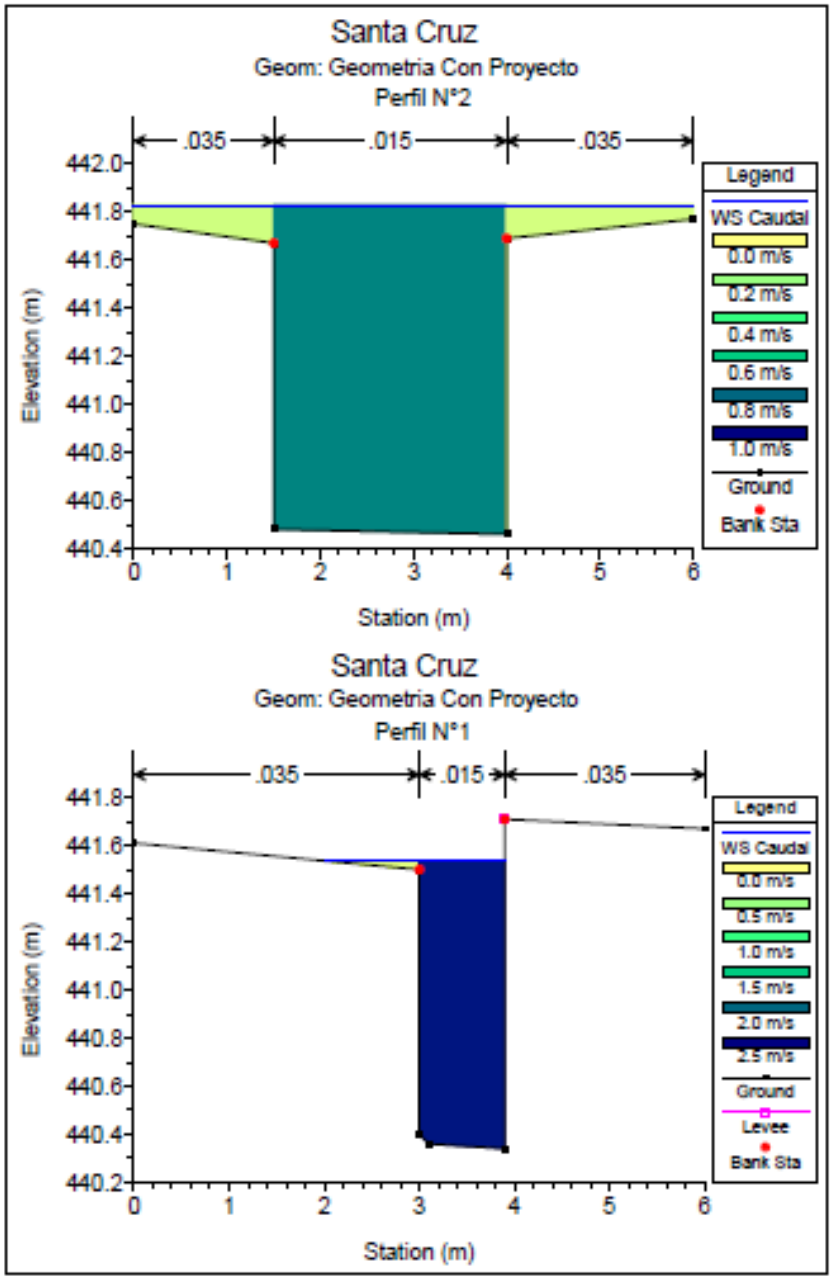

Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°12
.035
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°11
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°10
.035
.015
.035
443.0
442.5
442.0
441.5
441.0
440.5
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°9
.035
.015
.035
442.5
442.0
441.5
441.0
440.5
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
1.2 m/s
1.4 m/s
Ground
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°8
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
1.2 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°7
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Cajon Proyectado
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Cajon Proyectado
.035
.015
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°4
.035
.015
.035
442.0
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
440.4
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°3
.035
.015
.035
442.0
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
440.4
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Levee
Bank Sta


Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°2
.035
.015
.035
442.0
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
440.4
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.2 m/s
0.4 m/s
0.6 m/s
0.8 m/s
1.0 m/s
Ground
Bank Sta
Santa Cruz
Geom: Geometria Con Proyecto
Perfil N°1
.035
.015
.035
441.8
441.6
441.4
441.2
441.0
440.8
440.6
440.4
440.2
Elevation (m)
0
1
2
3
4
5
6
Station (m)
Legend
WS Caudal
0.0 m/s
0.5 m/s
1.0 m/s
1.5 m/s
2.0 m/s
2.5 m/s
Ground
Levee
Bank Sta