

ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN EL RÍO CABRA

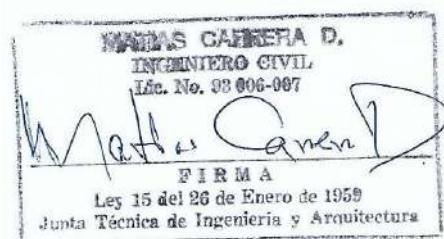
-CEDI GRUPO REY-



Por

Matías Carrera Delgado

Panamá, Julio de 2020



ÍNDICE

DESCRIPCIÓN	Pág.
I. Introducción	3
II. Localización y características generales de las cuencas	4
III. Análisis hidrológico	13
IV. Análisis Hidráulico (Modelos FlowMaster y HEC-RAS)	17
V. Análisis y resultados de la simulación con el modelo HEC-RAS	23
VI. Conclusiones	32
VII. Recomendaciones	33
VIII. Referencias	34
IX. Anexos	

Anexo 1. Niveles del agua en el Río Cabra para Q₅₀.

I. INTRODUCCIÓN

En este documento se muestran los resultados de los cálculos hidrológicos e hidráulicos realizados en la cuenca del Río Cabra, la cual tiene un área de drenaje de $A=37.71 \text{ km}^2$ hasta el sitio donde CEDI GRUPO REY propone desarrollar un proyecto. Las simulaciones hidráulicas fueron realizadas con el modelo hidráulico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis Systems), en un tramo de 460 m comprendido entre las secciones transversales 3km + 800m y 4 km + 260m del Río Cabra aguas abajo del puente sobre la Carretera Panamericana.

El primer objetivo fue determinar el caudal de diseño para el periodo de retorno de 50 años. Se decidió utilizar las ecuaciones del “**Análisis Regional de Crecidas Máximas**”, originalmente desarrolladas por Lavalin Internacional en 1986 y actualizadas por la Empresa de Transmisión Eléctrica S. A. (ETESA), en 2007. Esta decisión se fundamenta por la ausencia de datos hidrometeorológicos confiables en el área del proyecto. La magnitud de el caudal de diseño para el periodo de retorno de 50 años son $505 \text{ m}^3/\text{s}$. En el tramo analizado con el modelo hidráulico HEC-RAS, se levantaron secciones transversales para conocer las condiciones actuales del cauce del río. La topografía fue procesada para obtener secciones a cada 20 metros. Además, se utilizó el Modelo FlowMaster para determinar la elevación de la superficie del agua en la sección -4260.00 (4km + 260m).

Los resultados del análisis hidráulico en el tramo del Río Cabra (con las secciones naturales), muestra que es necesario modificar estas secciones para evitar el desborde del agua hacia las riberas. Así, se procedió a utilizar la sección típica aprobada por el Ministerio de obras públicas (MOP) en el año 2001, la cual tiene una base $B= 33.00$ metros y taludes con relación (H:V) de 1.5:1. Al transitar los caudales de diseño con la sección típica los niveles del agua descendieron considerablemente. En la zona muy cerca a la estación 3km + 940m, el promotor del proyecto ha dejado un área verde no desarollable de $1,283.82 \text{ m}^2$ como servidumbre hídrica que sirva de amortiguamiento para las crecidas de la corriente.

Por otro lado tomando en cuenta la distancia del proyecto a la costa, aunado a la tortuosidad del río hace que el efecto de la marea no sea significativo.

II. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA DEL RÍO CABRA.

El área que se propone desarrollar, está ubicada en la parte baja de la cuenca del Río Cabra en la margen izquierda. La cuenca del río cabra se localiza en la provincia de Panamá, entre las coordenadas 1013000N y 980000N en latitud y 674000E y 685000E de longitud (**Figura 1**).

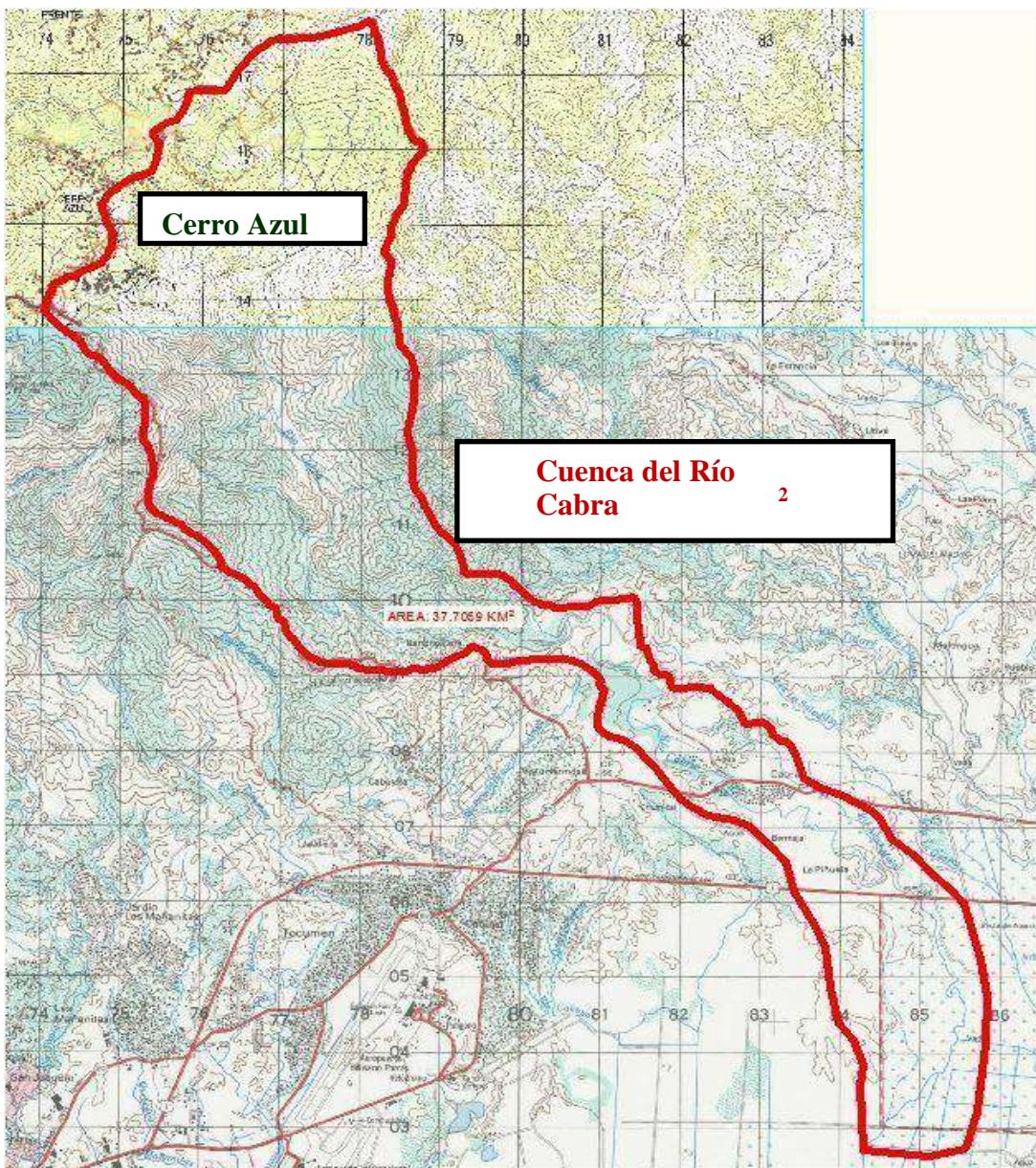


Figura 1. Cuenca del Río Cabra.

El Río Cabra tiene un recorrido en la dirección sureste y desemboca en la bahía de Panamá. La cuenca del Río Cabra limita al Norte con Cerro Azul y el Río Las Cascadas, al Sur con la Bahía de Panamá, al Este con la cuenca del río Tataré y al Oeste con la cuenca del Río Tocumen.

Clima

Las condiciones climáticas y meteorológicas en el área de estudio del proyecto están bajo una fuerte influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En general, la migración Norte-Sur de la ZCIT normalmente divide el año en dos temporadas: la seca (de mediados de diciembre a principios de mayo) y la lluviosa (el resto del año). Adicionalmente, el paso de la ZCIT por Panamá produce dos máximos de precipitación que ocurren por lo general en mayo-junio y octubre-noviembre, confirmando la ocurrencia del llamado “Veranillo de San Juan”, con una disminución de las precipitaciones entre julio y agosto.

Las tormentas violentas o sistemas bien organizados a escala sinóptica, tales como los frentes fuertes y los huracanes, no son muy frecuentes, siendo la convección y los efectos orográficos los principales mecanismos de generación de precipitación en el área de estudio.

De acuerdo al Atlas Ambiental de la República de Panamá (ANAM, 2010), el clima en el área del proyecto, siguiendo la clasificación establecida por el Dr. A. McKay, corresponde a Clima Tropical con Estación Seca Prolongada. Es cálido, con temperaturas medias de 27 a 28 °C. Los totales pluviométricos son siempre inferiores a 2,500 mm.

La estación seca presenta vientos fuertes, con predominio de nubes medias altas; hay baja humedad relativa y fuerte evaporación.

En el estudio para la **Línea 1 del Metro de la Ciudad de Panamá**, URS ha analizado datos climáticos de la estación Tocumen y ha encontrado las siguientes clasificaciones para el clima del área del Proyecto:

- Tomando en cuenta el diagrama ombrotérmico y considerando que la temperatura media del mes más frío (noviembre) es de 26.5°C en Tocumen, de acuerdo a la clasificación bioclimática de la UNESCO-FAO¹: según la temperatura es *cálido*, de acuerdo al periodo seco con meses consecutivos es *monoxérico*, y según el índice xerotérmico es *tropical atenuado*.
- De acuerdo al índice de Martonne, el clima se clasifica como *Húmedo*, en tanto que, según Knoche, la aridez de la zona es clasificada como *Moderada* para el área de Tocumen.
- Según el índice de Lang, el clima se clasifica como *Templado cálido*.
- De acuerdo al índice pluviométrico de Dantin-Revenga, el clima de clasifica como *Húmedo*.
- Según la clasificación de Thornthwaite, el clima en la zona de estudio se clasifica como: Húmedo, con moderada deficiencia en verano, megatérmico o cálido, con alrededor de 25% de verano al año – *B₁sA'a'*.
- La clasificación correspondiente de Köppen para el área de estudio es *Aw*, *tropical lluvioso con periodo de estación seca*.
- Según la clasificación de Papadakis, el clima en el área de estudio es *Ecuatorial - Tropical Cálido*.

¹ Práctica y Problemas de Climatología, Rafael Llorca, 2001.

Precipitación

El mes con más baja precipitación es Febrero, con una precipitación promedio de 16.2 mm y el más lluvioso es Octubre con 610.1 mm, lo cual representa una diferencia significativa. La tablas y figuras que se muestran a continuación fueron elaboradas con datos de lluvias de las estaciones de Las Cumbres, Balboa FAA, Hato Pintado y Tocumen para observar la variabilidad espacial y temporal de las lluvias en la ciudad de Panamá y áreas cercanas al proyecto: La cobertura de los años de registro se muestran en la **Tabla 1**.

Las **Tablas 2 y 3** presentan la distribución máxima diaria y mensual de las lluvias registradas en la zona (ver también **Figuras 2 y 3**).

Tabla 1. Años con datos de precipitación en las estaciones meteorológicas

DATOS DIARIOS	1970	1980	1990	2000	2010
Hato Pintado					
Tocumen					
Las Cumbres					
Balboa FAA					


 Año con datos diarios completos

 Uno o más días sin datos en uno o más meses del año

La convección y los efectos orográficos son los principales mecanismos de generación de precipitación en el área de estudio. Generalmente se favorece la precipitación debido a la existencia de corrientes marinas cercanas junto a temperaturas altas que evaporan las aguas del Pacífico. La humedad es entonces arrastrada desde la costa hacia tierra firme provocando intensas precipitaciones, sobre todo en la parte alta de las cuencas. La precipitación media anual en la cuenca se acerca a los 2000 mm/año (**Mapa 1**).

Las crecidas registradas en los ríos de la Ciudad de Panamá, en ocasiones, obedecen a tormentas tan lejanas como las que ocurren en Cerro Azul, ubicado en la parte extrema

alta de la cuenca a una elevación de 660 metros, en donde caen cerca de 3200 mm de lluvia al año.

Tabla 2. Precipitación Máxima Diaria Mensual (mm), en las estaciones
Balboa FAA, Hato Pintado, Las Cumbres y Tocumen

	BALBOA FAA	HATO PINTADO	LAS CUMBRES	TOCUMEN
ENE	71.1	45.0	65.7	64.4
FEB	33.0	45.0	58.8	46.7
MAR	45.7	89.0	34.7	43.7
ABR	134.6	100.5	196.0	77.6
MAY	152.4	126.1	118.8	205.7
JUN	190.5	107.0	92.5	151.7
JUL	152.4	170.0	104.6	100.3
AGO	115.0	159.0	91.1	112.0
SEP	162.6	135.0	105.9	140.7
OCT	91.4	137.0	127.7	141.9
NOV	152.4	275.0	95.3	109.7
DIC	91.4	72.0	86.5	111.2
Año	190.5	275.0	196.0	205.7

Fuente: Elaborado por URS Holdings

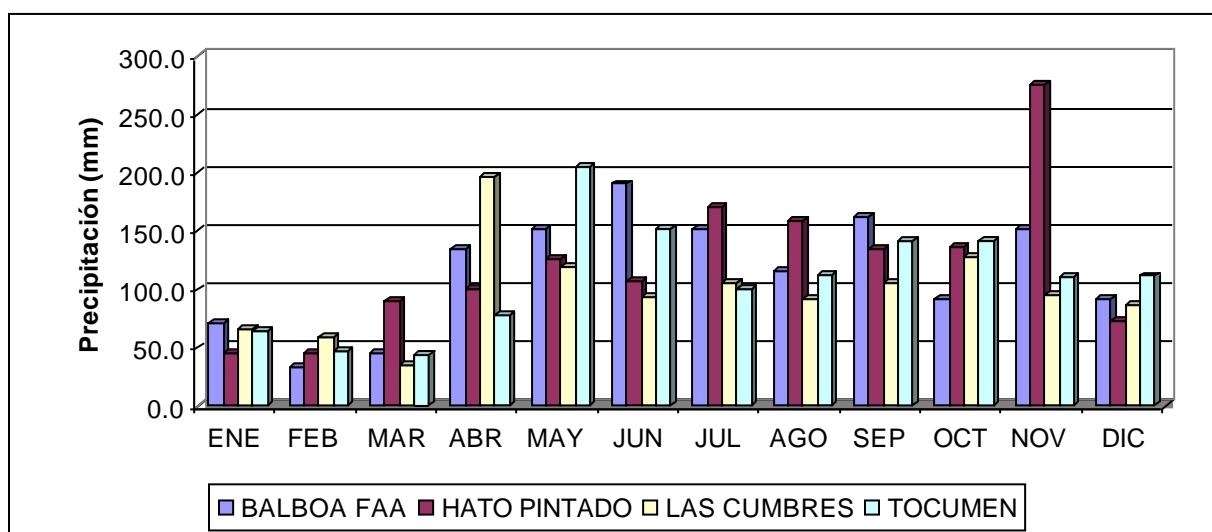


Figura 2. Precipitación Máxima Diaria Mensual (mm) en estaciones
Balboa FAA, Hato Pintado, Las Cumbres y Tocumen

Tabla 3. Distribución mensual de las lluvias (mm), en las estaciones
Hato Pintado, Las Cumbres y Tocumen

	BALBOA FAA	HATO PINTADO	LAS CUMBRES	TOCUMEN
ENE	37.4	32.4	31.2	22.1
FEB	14.4	16.9	7.2	9.9
MAR	26.9	23.8	11.1	13.9
ABR	78.7	73.5	117.0	68.7
MAY	239.6	265.4	249.9	247.0
JUN	248.7	234.1	261.5	244.3
JUL	218.6	223.8	253.2	181.0
AGO	206.7	235.1	271.6	218.0
SEP	233.1	258.4	297.1	254.2
OCT	270.6	282.5	345.9	317.7
NOV	261.3	298.2	236.1	249.8
DIC	140.4	131.7	97.1	111.5
AÑO	1976.3	2073.4	2186.8	1883.3

Fuente: Elaborado por URS Holdings

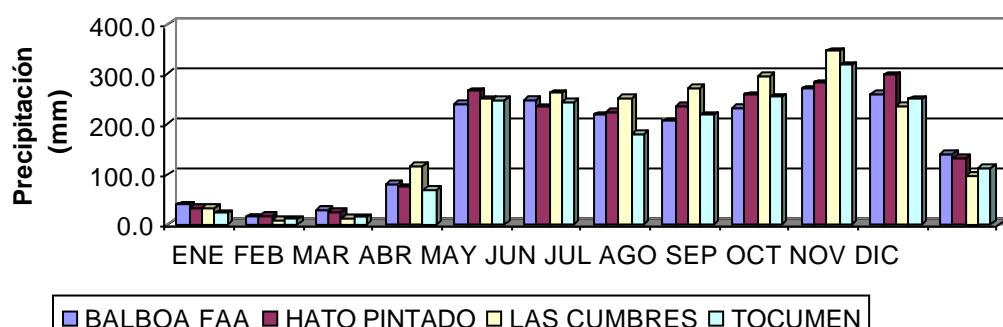


Figura 3. Distribución mensual de las lluvias (mm), en las estaciones
Balboa FAA, Hato Pintado, Las Cumbres y Tocumen

Temperatura

La temperatura en el área de estudio se caracteriza por la poca variación estacional, con una diferencia promedio de 2 °C. Como ilustración se muestran en la **Tabla 4** los registros de temperatura de la estación Tocumen durante el período 1979 – 2010.

Tabla 4. Temperaturas medias registradas en la estación de Tocumen

T° C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	26.7	27.1	27.6	28.0	27.5	27.2	27.1	27.1	26.8	26.5	26.5	26.6	27.0
Mín Abs	19.2	19.0	19.0	20.1	21.5	21.6	21.4	21.3	21.4	21.2	20.8	19.7	20.5
Máx Abs	33.7	34.5	35.0	35.6	35.0	34.1	34.2	34.1	33.5	32.9	33.2	33.5	34.1

Nota: Min Abs y Max Abs son los promedios de las temperaturas mínimas y máximas absolutas diarias. Fuente: Elaborado por URS Holdings.

Viento y Humedad Relativa

En referencia a velocidad y dirección del viento, la estación Tocumen – como referencia inicial – registra los valores a dos diferentes alturas sobre la superficie del suelo: 10 y 2 metros. De la información publicada en otros estudios, se infiere que los vientos del verano son mayores que los del invierno y, como es de esperar, a 10 m se registra mayor velocidad que a 2 m.

Durante la estación seca, en la región en estudio, los vientos alisios soplan en el sentido norte a una velocidad promedio de 2.4 m/s a 10 m de altura y de 1.0 m/s a 2.0 m del suelo. Por otro lado, durante la estación lluviosa, la velocidad del viento disminuye; es de 1.6 m/s a 10 m de altura y de 0.6 m/s a 2 m de la superficie del suelo.

La **Tabla 5** presenta la velocidad promedio medida a 10 m y 2 m sobre la superficie del suelo en la estación Tocumen.

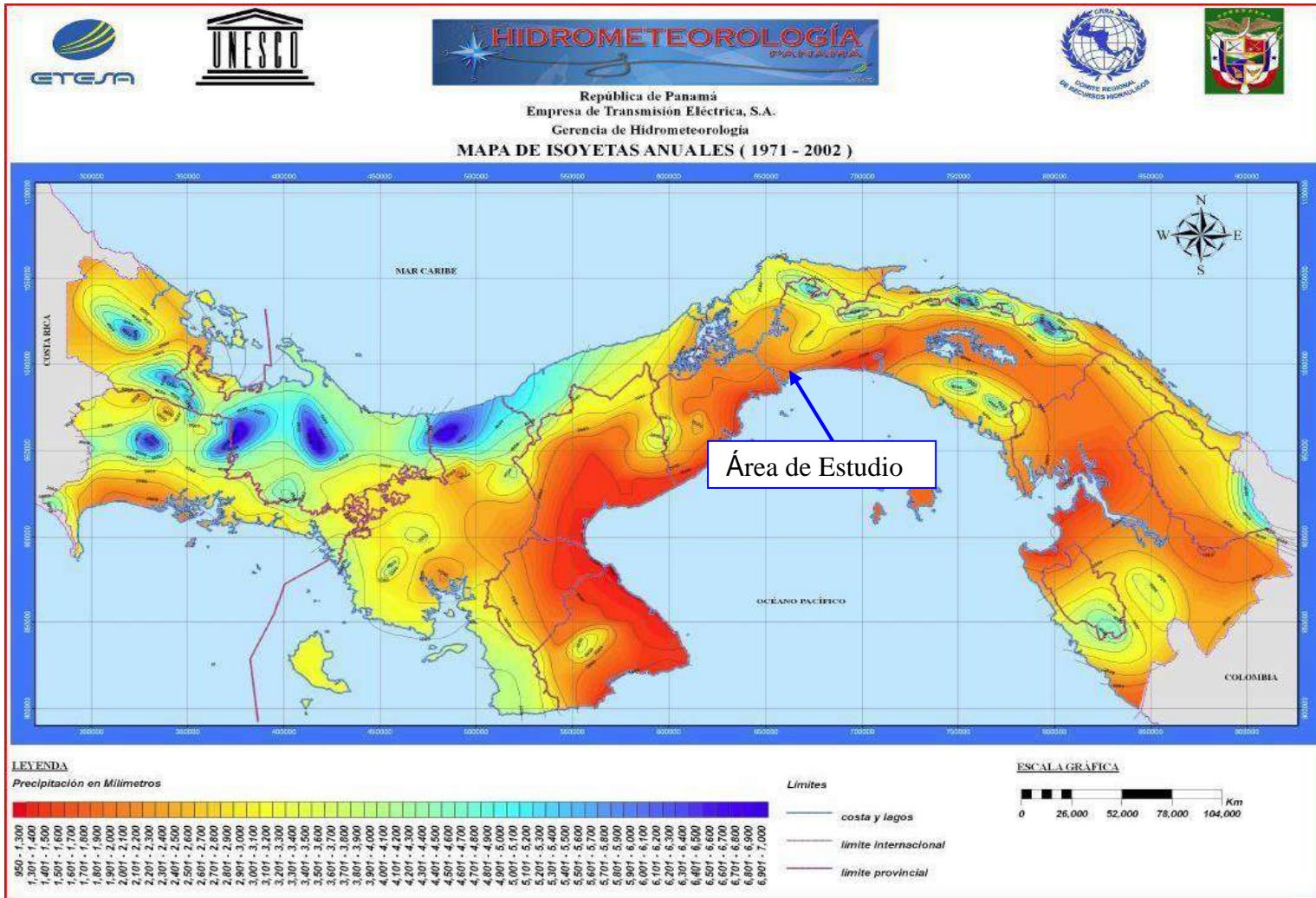
Tabla 5. Velocidad promedio del viento (m/s) en la estación Tocumen

Altura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
10.0 m	2.2	2.4	2.4	2.2	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	1.9
2.0 m	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7

La humedad relativa tiene un alto grado de correlación con la precipitación. Durante el verano la humedad relativa disminuye pero aumenta en los meses lluviosos. En la **Tabla 6** se muestra la humedad relativa media, mínima y máxima reportada por ETESA para la estación Tocumen, para el periodo 1979 - 2010.

Tabla 6. Humedad Relativa media (%) registrada en la estación Tocumen

HR (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Prom	73.1	70.4	69.2	72.4	81.3	83.6	82.8	83.0	84.2	85.1	84.8	79.5	79.2
Mínima	66.9	63.3	63.2	66.1	74.0	75.8	78.1	77.6	79.2	79.3	77.5	70.2	76.3
Máxima	78.9	77.6	77.6	79.9	87.3	92.4	93.7	93.8	94.6	94.6	93.1	90.0	86.7



Mapa 1. Isoyetas anuales en mm.

III. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

En la cuenca del Río Cabra no existe un registro de datos de caudales apropiados para llevar a cabo un análisis de frecuencia para determinar los caudales de diseño. Por esa razón, se utilizaron las ecuaciones presentes en el estudio “**Análisis Regional de Crecidas Máximas**” desarrollado por Lavalin Internacional en 1986 y actualizadas por la Empresa de Transmisión Eléctrica S. A. (ETESA) en 2007, para estimar el caudal de diseño con periodo de retorno de 50 años.

El área de estudio está ubicada en la Zona 3 (**Mapa 2**). De acuerdo al estudio de Lavalin International, el caudal para el periodo de retorno de 1 en 50 años, se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q_{\text{prom}} = 25 * A^{0.59}$$

$$Q_{50} = 2.37 * 25 * A^{0.59}$$

Donde, A = área de drenaje de la cuenca en km^2

El factor 25 es una constante; depende de la zona de ubicación de la cuenca.

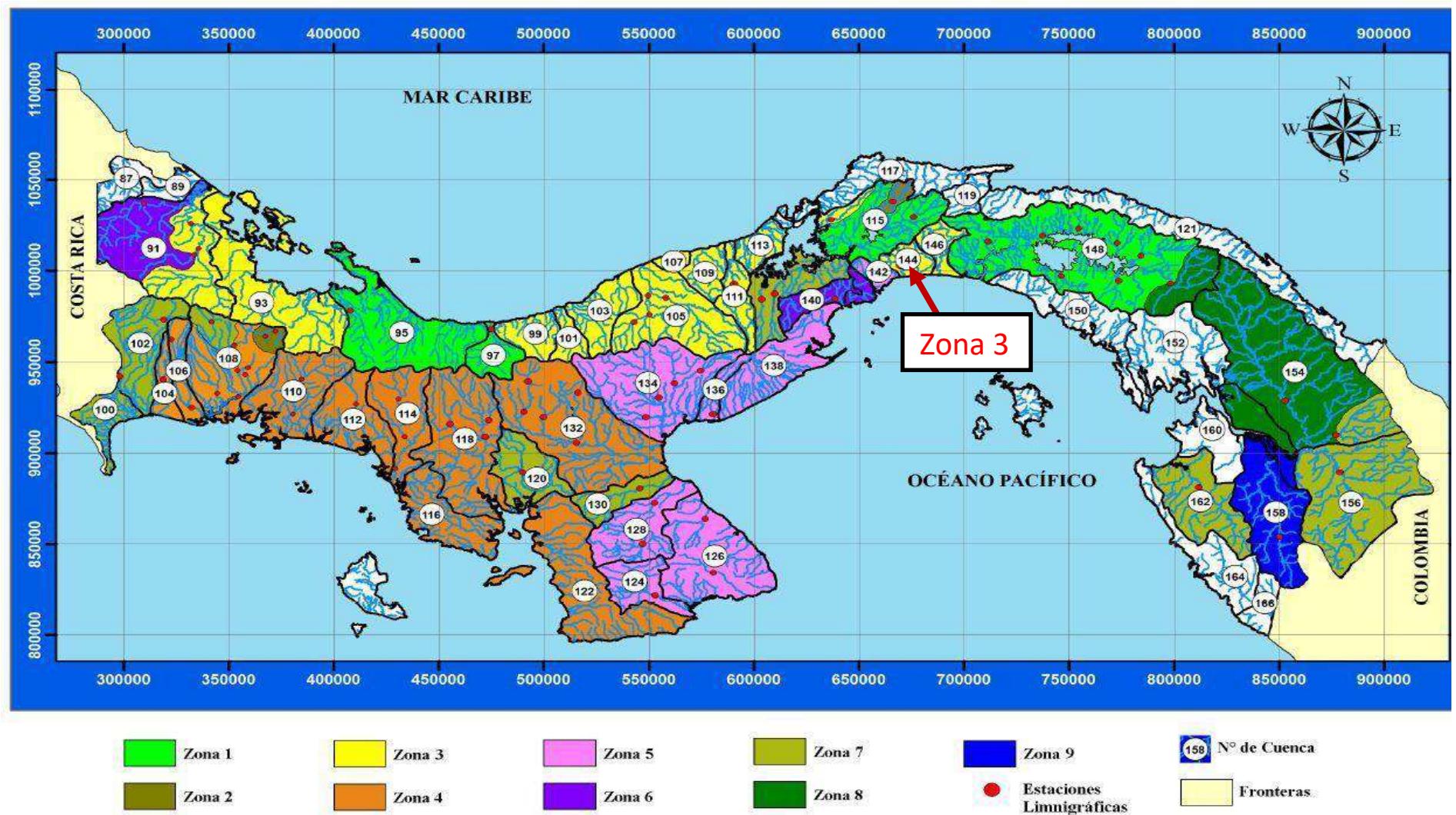
El factor de 2.37 se aplican al caudal máximo para obtener el caudal para un periodo de retorno de 50 años (**Tablas 7 y 8**).

Tabla 7. Zonas hidrológicamente homogéneas con sus respectivas ecuaciones y tablas de distribución de frecuencia

Zona	Número de ecuación	Ecuación	Distribución de frecuencia
1	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$	Tabla # 1
2	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$	Tabla # 3
3	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 1
4	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 4
5	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$	Tabla # 1
6	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$	Tabla # 2
7	4	$Q_{\text{máx}} = 9A^{0.59}$	Tabla # 3
8	5	$Q_{\text{máx}} = 4.5A^{0.59}$	Tabla # 3
9	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 3

Tabla 8. Tablas de distribuciones de frecuencia para ser utilizadas de acuerdo a la zona Hidrológicamente homogénea.

<i>Factores $Q_{máx.}/Q_{prom.máx}$ para distintos Tr.</i>				
<i>Tr, años</i>	<i>Tabla # 1</i>	<i>Tabla # 2</i>	<i>Tabla # 3</i>	<i>Tabla # 4</i>
1.005	0.28	0.29	0.3	0.34
1.05	0.43	0.44	0.45	0.49
1.25	0.62	0.63	0.64	0.67
2	0.92	0.93	0.92	0.93
5	1.36	1.35	1.32	1.30
10	1.66	1.64	1.6	1.55
20	1.96	1.94	1.88	1.78
50	2.37	2.32	2.24	2.10
100	2.68	2.64	2.53	2.33
1,000	3.81	3.71	3.53	3.14
10,000	5.05	5.48	4.6	4.00



Mapa 2. Zonas hidrológicas de acuerdo al estudio de ETESA, 2007.

La **Tabla 9** muestra la magnitud de los caudales en la cuenca del río Cabra considerando un área de estudio de 37.71 km^2 .

Tabla 9. El Caudal para periodo de retorno de 50 años ($A= 37.71 \text{ km}^2$)

Periodo de Retorno (T) (años)	Área (km ²)	Q _{prom} (m ³ /s)	Factor	Q _T (m ³ /s)
50	37.71	212.84	2.37	505

IV. ANÁLISIS HIDRÁULICO

Modelos Flowmaster y HEC-RAS

En esta sección se utilizaron dos modelos. Para estimar los niveles del agua en la sección transversal -4260 en condiciones naturales y con la sección prismática, se utilizó el modelo FlowMaster. La **Tabla 10** muestra las profundidades y las elevaciones de la superficie del agua en la sección -4260.00 (4km + 260m) para el caudal de diseño bajo las condiciones natural y de sección prismática. Las elevaciones del agua sirven como datos de entrada para realizar las simulaciones hidráulicas con el modelo HEC-RAS.

Tabla 10. Profundidades y elevaciones de la superficie del agua para Q_{50} .

		Condición Natural	Sección Prismática ($B= 33 \text{ m}$)	
Q_T (m^3/s)	Y (m)	Elev. Sup. del agua (m)	Y (m)	Elev. Sup. del agua (m)
505	4.85	9.71	4.27	8.35

Posteriormente, las elevaciones del agua a lo largo del tramo en estudio se estimaron con la ayuda del modelo HEC-RAS.

EL MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS

Antes de realizar una presentación básica del modelo hidráulico HEC-RAS, se considera oportuno hacer ciertos comentarios de su predecesor, el modelo HEC-2. El modelo HEC-2 fue desarrollado en los años 70 por el Hydrologic Engineering Center en los Estados Unidos (Hoggan, 1997). El programa se diseña para calcular los perfiles superficiales del agua para flujo permanente, gradualmente variado en canales naturales (ríos) o artificiales. El proceso computacional se basa en la solución de la ecuación unidimensional de la energía utilizando el método estándar de paso. Entre sus usos, el programa se puede aplicar para delinear zonas de alto riesgo de inundaciones. El modelo también se puede utilizar para evaluar los efectos sobre los perfiles de la superficie del agua como

resultado de mejoras y construcción de diques en canales. Además, es útil para simular estructuras como puentes o alcantarillas.

El objetivo principal del programa HEC-2 es simplemente calcular las elevaciones de la superficie del agua en todas las localizaciones de interés para los valores dados del flujo. Los requisitos de los datos incluyen el régimen del flujo, la elevación, la descarga, los coeficientes de pérdida, la geometría de las secciones transversales, y la separación entre secciones adyacentes.

Siguiendo los conceptos planteados en el modelo HEC-2 para la determinación de perfiles de la superficie de agua, el USACE (Army Corps of Engineers of the United States) desarrolló un Sistema de Análisis de Ríos, conocido como el HEC-RAS, (1995, 2000). El modelo HEC-RAS es muy idéntico al modelo HEC-2, con unos pocos cambios menores. Los objetivos, metas y resultados de los programas son los mismos. La gran mejora es la adición del poder gráfico al usuario (GUI). El GUI es un sistema de Windows que permite al usuario entrar, editar, y desplegar datos y gráficas en un formato de lectura fácil. Esta capacidad facilita al modelador una mejor visualización del río y su condición. Hasta permite imprimir la geometría del río en tres dimensiones.

En adición a las mejoras gráficas encontradas en HEC-RAS, muchas otras mejoras han sido hechas. HEC-2 está limitado para correr en condiciones de flujo subcrítico o supercrítico. HEC-RAS es capaz de operar con un régimen de condiciones mixtas. HEC-RAS también incluye la habilidad de modelar dentro de esclusas, compuertas, múltiples alcantarillas y tiene un nuevo método para evaluar el efecto de las columnas en puentes.

ECUACIONES DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

Cuando el flujo en un canal o una corriente abierta encuentra un cambio en la pendiente del fondo o un cambio en la sección transversal, la profundidad de flujo puede cambiar gradualmente. Tal condición del flujo donde la profundidad y la velocidad pueden cambiar a lo largo del canal se debe analizar numéricamente. La ecuación de la energía se aplica a

un volumen de control diferenciado, y la ecuación que resulta relaciona el cambio en profundidad con la distancia a lo largo de la trayectoria del flujo. Una solución es posible si uno asume que la pérdida principal en cada sección es igual a la del flujo normal con la misma velocidad y profundidad de la sección. Así un problema del flujo no uniforme es aproximado por una serie de segmentos uniformes de la corriente del flujo.

La energía total de una sección dada del canal puede ser escrita como,

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1)$$

donde está “z + y”, es la cabeza potencial de la energía sobre un datum y la capacidad cinética de la energía es representada por el término que contiene la velocidad promedio en la sección. El valor del α se extiende de 1.05 a 1.36.

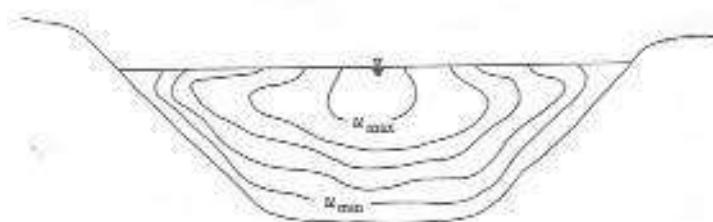


Figura 4. Distribuciones típicas de la velocidad en un canal abierto.

para la mayoría de los canales “ α ” es una indicación de la distribución de la velocidad a través de la sección transversal. Este se define como el coeficiente de la energía,

$$\alpha = \sum_i \frac{v_i \Delta A}{V^3 A} \quad (2)$$

v_i es la velocidad en la sección ΔA y V es la velocidad promedio en la sección transversal. En muchos casos, el valor de α se asume como 1.0 (**Figura 4**), pero debe ser estimado para las corrientes o ríos en donde la variación de la velocidad puede ser grande.

La ecuación de la energía para el flujo permanente entre dos secciones, 1 y 2 (**Figura 5**), separadas por una distancia L se convierte en,

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_L, \quad (3)$$

donde h_L es la pérdida principal de la sección 1 a la sección 2. Si asumimos que $\alpha = 1$, $z_1 - z_2 = S_0 L$, y $h_L = SL$, la ecuación de la energía se convierte en,

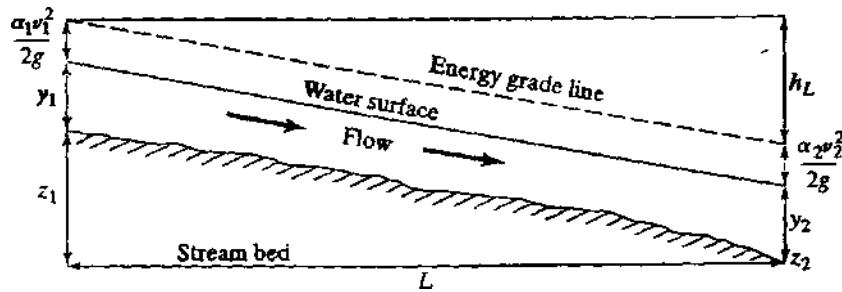


Figura 5. Ecuación de la energía del flujo no uniforme.

$$\begin{aligned} z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} &= z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_L \\ y_1 + \frac{V_1^2}{2g} &= y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + (S - S_0)L. \end{aligned} \quad (4)$$

La pendiente de energía se determina con la ecuación 5, utilizando la ecuación de Manning (unidades pie-s) y solucionando para S , tenemos

$$S = \sqrt{\left(\frac{n V_m}{1.49 R_m^{2/3}} \right)^2}, \quad (5)$$

donde el subíndice m refiere a un valor medio. Si diferenciamos la ecuación (1) con respecto a x , la distancia a lo largo del canal, la tasa de cambio de la energía será entonces,

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \frac{d(V^2)}{dx} \quad (6)$$

La ecuación (7) describe la variación de la energía total para los flujos que varían gradualmente. Los términos S_0 y S pueden ser substituidos de las ecuaciones anteriores. La pendiente del perfil de la superficie del agua depende si el flujo es subcrítico o

supercrítico. Al utilizar $V = q / y$ (sección rectangular), y asumiendo que $\alpha = 1$, la ecuación (6) se transforma en,

$$\frac{1}{2g} \frac{d}{dx} (V^2) = \frac{1}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{q^2}{y^2} \right) = - \left(\frac{q^2}{g} \right) \frac{1}{y^3} \frac{dy}{dx} \quad (7)$$

Así

$$-S = -S_0 + \frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{q^2}{gy^3} \right) \quad (8)$$

Si incluimos la definición del número Froude (Fr), entonces la pendiente de la superficie del agua para una sección rectangular se puede escribir como,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S}{1 - (V^2 / gy)} = \frac{S_0 - S}{1 - Fr^2} \quad (9)$$

Además, del levantamiento topográfico se visitó el área para identificar los coeficientes de Manning (n), que se debe utilizar en el modelo HEC-RAS en la primera simulación.

La selección del coeficiente "n" de rugosidad de Manning, se basa generalmente en "el mejor juicio de la ingeniería"; o en valores establecidos por ordenanzas municipales de diseño. Varias tablas están disponibles en la literatura general para la selección del coeficiente de rugosidad de Manning para un particular canal abierto (ver **Tabla 11**. Chow, 1959). En nuestro caso, se trabajó con coeficientes de rugosidad de 0.025 para el canal principal y 0.030 para las riberas izquierda y derecha de la corriente.

TABLA 11. Valores del coeficiente de rugosidad (n) en la fórmula de Manning

	Mínimo	Normal	Máximo
Tuberías cerradas			
Acero, clavado y espiral	0.013	0.016	0.017
Hierro fundido, Sin recubrimiento	0.011	0.014	0.016
Cemento, mortero	0.011	0.013	0.015
Concreto, alcantarilla	0.010	0.011	0.013
Arcilla, alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
Albañilería del escombro, cementada	0.018	0.025	0.030
Canales alineados o erigidos			
Concreto, final del flotador	0.013	0.015	0.016
Fondo concreto, concreto	0.020	0.030	0.035
Fondo de la grava con el rasgaduras	0.023	0.033	0.036
Ladrillo, esmaltado	0.011	0.013	0.015
Canal excavado o dragado			
Tierra, derecha y uniforme - hierba corta	0.022	0.027	0.033
Tierra, sinuoso, floja, pastos densos	0.030	0.035	0.040
Cortes de la roca, dentado e irregulares	0.035	0.040	0.050
Canales no mantenidos, pasto y maleza sin cortar	0.050	0.080	0.120
Corrientes Naturales			
Etapas limpia, rectas, completas	0.025	0.030	0.033
Limpios y sinuosos, algunas piscinas y bajíos	0.033	0.040	0.045
Bordes flojos, malezas y charcos profundos	0.050	0.070	0.080
Riberas de arroyos montañosos y peñascos	0.030	0.040	0.050
Riberas de arroyos montañosos, grava y grandes Peñascos.	0.040	0.050	0.070
Flujo en Llano			
Pasto, ningún matorral, hierba alta	0.030	0.035	0.050
Matorral, matorral dispersos, hierbas abundantes	0.035	0.050	0.070
Matorral, medio al matorral denso en verano	0.070	0.100	0.160
Árboles, sauces densos, verano, plano	0.110	0.150	0.200
Árboles, bosques	0.080	0.100	0.120

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON EL MODELO HEC-RAS

Considerando la magnitud del proyecto, se procedió a realizar un levantamiento topográfico del tramo en el Río Cabra aguas abajo de la Carretera Panamericana. El tramo pasa frente al área del proyecto y su extensión es 460 m y se encuentra entre las estaciones 3km + 800m y 4km + 260m.

Las primeras simulaciones se realizaron en el tramo del Río Cabra con las secciones transversales del terreno actual (secciones naturales) y el caudal de diseño de 505 m³/s, correspondiente al periodo de retorno de 50 años. Los resultados mostraron que las secciones transversales actuales no son adecuadas para desalojar los flujos y de esta manera el agua se sale del cauce. Las siguientes simulaciones se realizaron considerando la sección típica aprobada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), en el año 2001. La sección típica tiene una base $B=33.00$ metros y taludes con relación (H:V) de 1.5:1. Además, frente al área donde se desarrollará el proyecto (entre las secciones transversales 3km + 800m y 4km + 260m), se contempla una pendiente de $S=0.00100$ para la sección típica.

La **Figura 6** muestra la configuración diseñada con el modelo HEC-RAS del Río Cabra

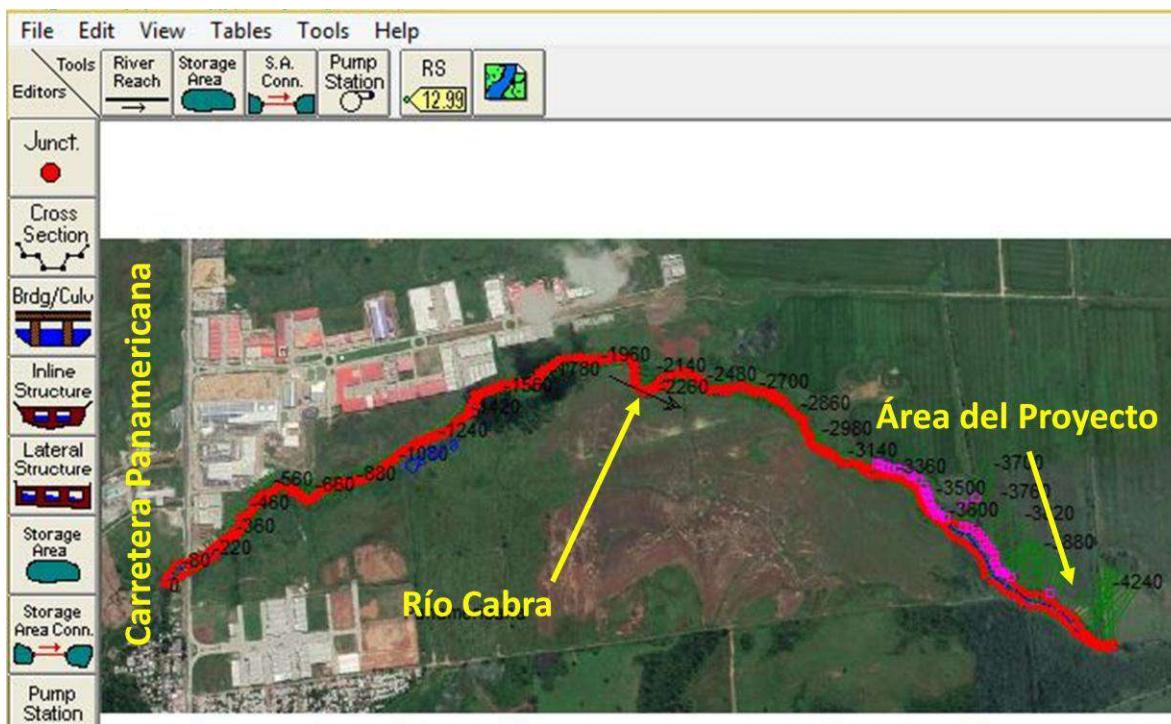


Figura 6. Configuración del tramo del Río Cabra con el modelo HEC-RAS.

La **Figura 7** muestra gráficamente los niveles del agua que se alcanzan en el tramo del Río Cabra en estudio, al transitar el caudal de diseño para el periodo de retorno de 50 años, al considerarse las secciones naturales y la sección típica respectivamente. Se muestra en azul los niveles del agua cuando se utilizan las secciones naturales, mientras que la línea celeste representa los niveles del agua que se alcanzaría si se tuviera la sección típica aprobada por el MOP en el año 2001.

El **Anexo 1** muestra las secciones con los niveles del agua al transitar el caudal de diseño en el tramo del Río Cabra. Para poder observar las diferencias alcanzadas en la elevación del agua, se hace una superposición de las simulaciones obtenidas con el modelo HEC-RAS con ambos escenarios: un escenario consiste en utilizar las secciones naturales y el otro con la sección típica.

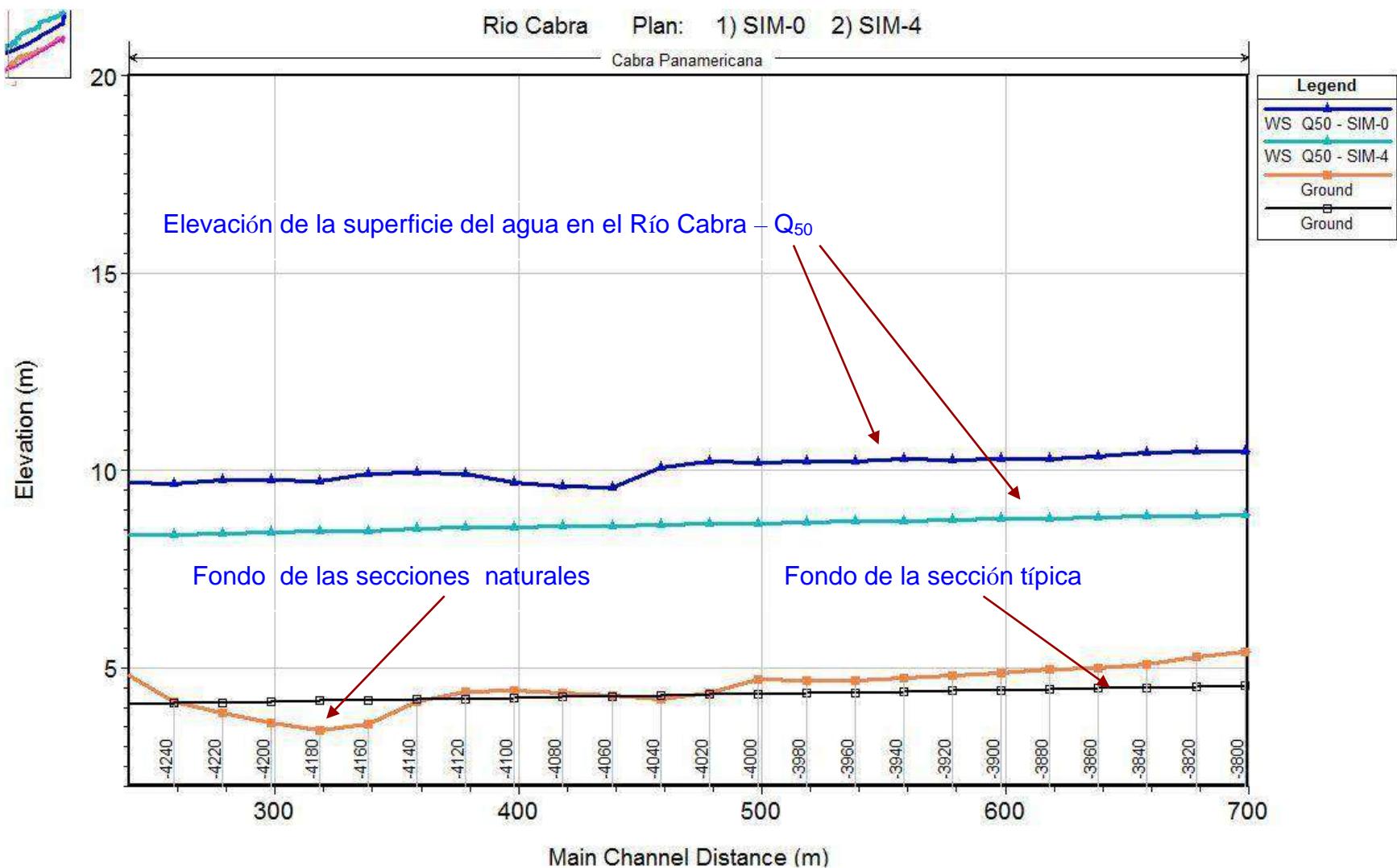


Figura 7. Elevación de la superficie del agua con las secciones naturales y la típica, para $Q_{50} = 505 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los niveles de terracería segura se calcularon tomando como referencia el tránsito del caudal de diseño de 50 años ($Q_{50} = 505 \text{ m}^3/\text{s}$), a través de la sección típica aprobada por el Ministerio de Obras Públicas en el año 2001. La **Tabla 12** contiene en sus dos últimas columnas los niveles de terracería seguros a lo largo del tramo que se encuentra entre las estaciones 3km + 800m a 4km + 260m. Frente a este tramo se encuentra el área del proyecto a desarrollar.

En conclusión, los resultados mostraron que con 1.00 metro por encima del nivel máximo de las aguas, se alcanzan los niveles seguros de terracería para el caudal $Q_{50}=505 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 9. Niveles de terracería seguros frente al proyecto para $Q_{50}=505 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando la sección Típica.

Hoja de Cálculos Hidráulicos para el Rio Cabra				
Considerando la Sección Típica de B=33.00 m				
TRAMO DEL RIO CABRA	Est.	EL. Sup. Del Agua Q50	Elv. Fondo	ELEV. TERRACERÍA (m)
Panamericana	-3800	8.87	4.54	9.87
Panamericana	-3820	8.85	4.52	9.85
Panamericana	-3840	8.83	4.50	9.83
Panamericana	-3860	8.81	4.48	9.81
Panamericana	-3880	8.79	4.46	9.79
Panamericana	-3900	8.77	4.44	9.77
Panamericana	-3920	8.75	4.42	9.75
Panamericana	-3940	8.73	4.40	9.73
Panamericana	-3960	8.71	4.38	9.71
Panamericana	-3980	8.69	4.36	9.69
Panamericana	-4000	8.67	4.34	9.67
Panamericana	-4020	8.65	4.32	9.65
Panamericana	-4040	8.62	4.30	9.62
Panamericana	-4060	8.6	4.28	9.60
Panamericana	-4080	8.58	4.26	9.58
Panamericana	-4100	8.55	4.24	9.55
Panamericana	-4120	8.55	4.22	9.55
Panamericana	-4140	8.53	4.20	9.53
Panamericana	-4160	8.48	4.18	9.48
Panamericana	-4180	8.45	4.16	9.45
Panamericana	-4200	8.43	4.14	9.43
Panamericana	-4220	8.4	4.12	9.40
Panamericana	-4240	8.38	4.1	9.38
Panamericana	-4260	8.35	4.08	9.35

Para observar más claramente las elevaciones que alcanza el agua (en las secciones naturales y la prismática) al transitar el caudal de diseño $Q_{50}=505 \text{ m}^3/\text{s}$, se procedió a levantar el nivel del terreno desde la línea de propiedad utilizando un talud ($H:V$) de 1:1 frente al área del proyecto. La modificación se realizó desde la sección 3km+ 800m hasta la sección 4km + 260m. La **Figura 8** muestra el área a desarrollar.

Las **Figuras 9 y 13** muestran cuatro secciones transversales con las elevaciones del agua; entre ellas la 3km + 800m (inicio del tramo) y la 4km + 260m (final del tramo) para Q_{50} . Se puede observar que la sección Típica del MOP de base 33 metros y taludes ($H:V$) de 1.5:1, logra contener los caudales de diseño.

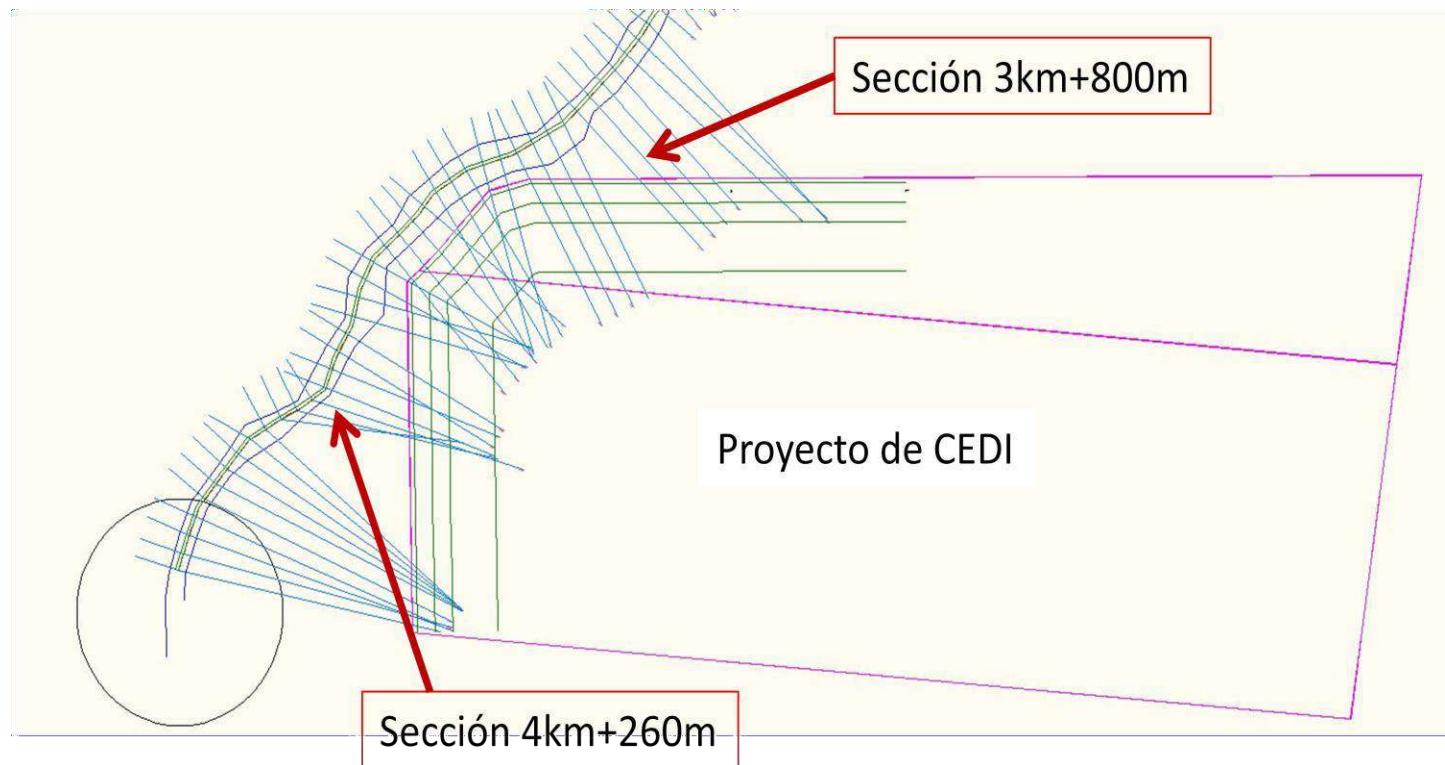


Figura 8. Ubicación del área a desarrollar respecto al levantamiento topográfico

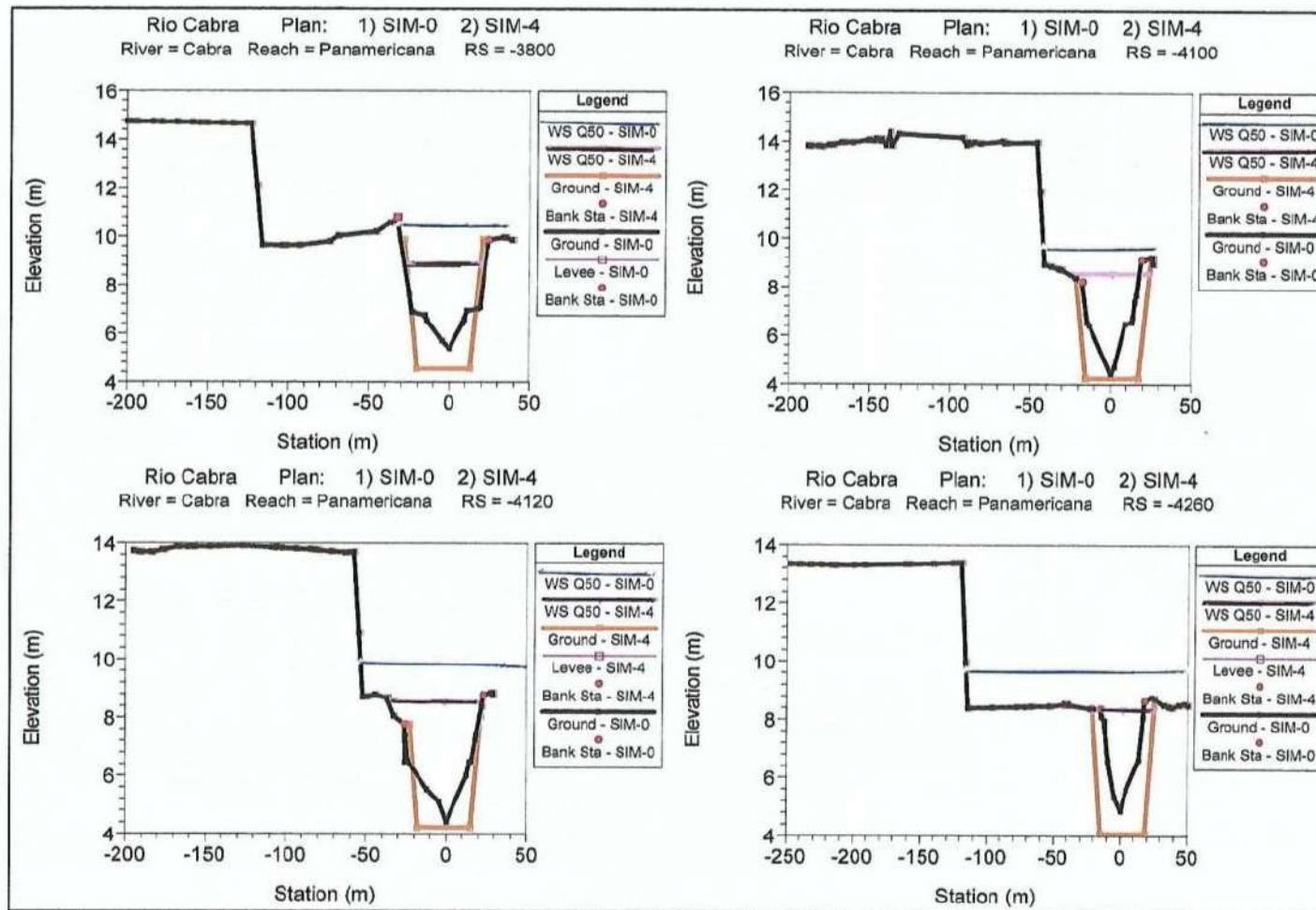


Figura 9. Secciones transversales que muestran los niveles del agua con ambos tipos de secciones para Q50.

Las secciones 4km + 100m y 4km + 120m muestran lo cerca que se encuentra la línea de propiedad del río. En la zona muy cerca a la estación 3km + 940m, el promotor del proyecto ha dejado un área verde no desarrollable de 1,283.82 m² como servidumbre hídrica que sirva de zona de amortiguamiento para las crecidas de la corriente. Adicionalmente, se construirá un parque recreativo de 2 hectáreas entre la corriente y las galeras del proyecto en la parte suroeste.

VI. CONCLUSIONES

1. El modelo HEC-RAS simula adecuadamente el tránsito de los caudales de diseño para el periodo de retorno de 50 años en el tramo de 460 m comprendido entre las secciones transversales 3km + 800m y 4km + 260m del Río Cabra
2. Las secciones naturales, como se muestran en la actualidad, no pueden desalojar adecuadamente el caudal de diseño para periodo de retorno de 50 años. Aunque en el pasado el río Cabra fue intervenido para aumentar su capacidad de desalojo de las crecidas, la falta de un plan sistemático de limpieza hace que haya mucha vegetación en sus riberas y algunas veces en el canal principal.
3. La sección típica trapezoidal (H:V) de 1.5:1.0, con base igual a 33 metros aprobada por el Ministerio de Obras Públicas en el año 2001 se puede utilizar para desalojar los caudales de diseños a lo largo del tramo de estudio.
4. Para garantizar la servidumbre hídrica de 20 metros (en la zona donde se encuentra la sección transversal 3km + 940m), se ha asignado un área de 1,283.82 m² de la finca del promotor garantizando así un área de amortiguamiento para las crecidas del Río Cabra.
5. La distancia del proyecto a la costa (aproximadamente 6.5 kilómetros) y la tortuosidad de la corriente logran minimizar el efecto de la marea en el proyecto.

VII. RECOMENDACIONES

1. Adecuar el tramo del río Cabra en estudio, con una longitud de 460 m y utilizar la sección Típica de base B=33.00 metros y taludes (H:V) de 1.5:1.0 propuesta por el MOP en el año 2001 para garantizar un mejor desalojo de los caudales de crecidas.
2. Añadir un sobreborde de 1.00 metros por encima del nivel del agua correspondiente al caudal de diseño $Q_{50}=505 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. Se recomienda que el Ministerio de Obras Públicas y las autoridades locales elaboren un plan de mantenimiento para garantizar el desalojo expedito de las futuras crecidas del Río Cabra.



VIII. REFERENCIAS

Chow, V. T., 1959, Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York.

Computer Applications in Hydraulics Engineering: Connecting Theory to Practice 1997-2004. Haestad methods, Inc.

Hoggan D. H., 1997, Computer-Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

Hidrologic Engineering Center, 1982, HEC-2 Water Surface Profiles, User's Manual, U. S. Army Corps of Engineering, Davis, CA.

Hidrologic Engineering Center, 1995, HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, U. S. Army Corps of Engineering, Davis, CA.

Hidrologic Engineering Center, 2008, HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual, U. S. Army Corps of Engineering, Davis, CA.

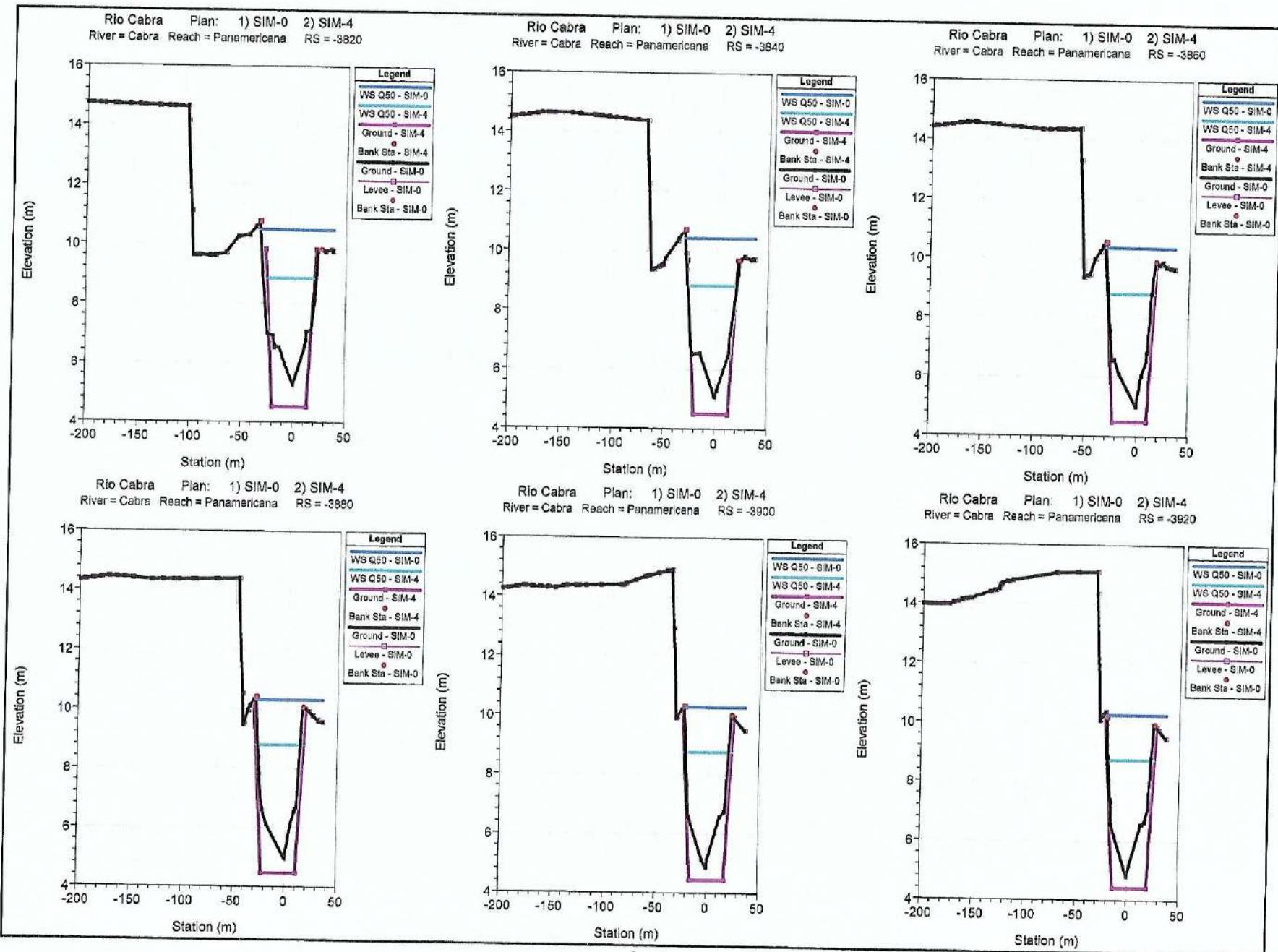
El modelo HEC-RAS fue aplicado en el tramo del Río Cabra, aguas abajo del puente sobre la Carretera Panamericana, por el Ingeniero Civil/Hidrólogo Matías Carrera Delgado, profesional idóneo con Licencia No. 93-006-007.

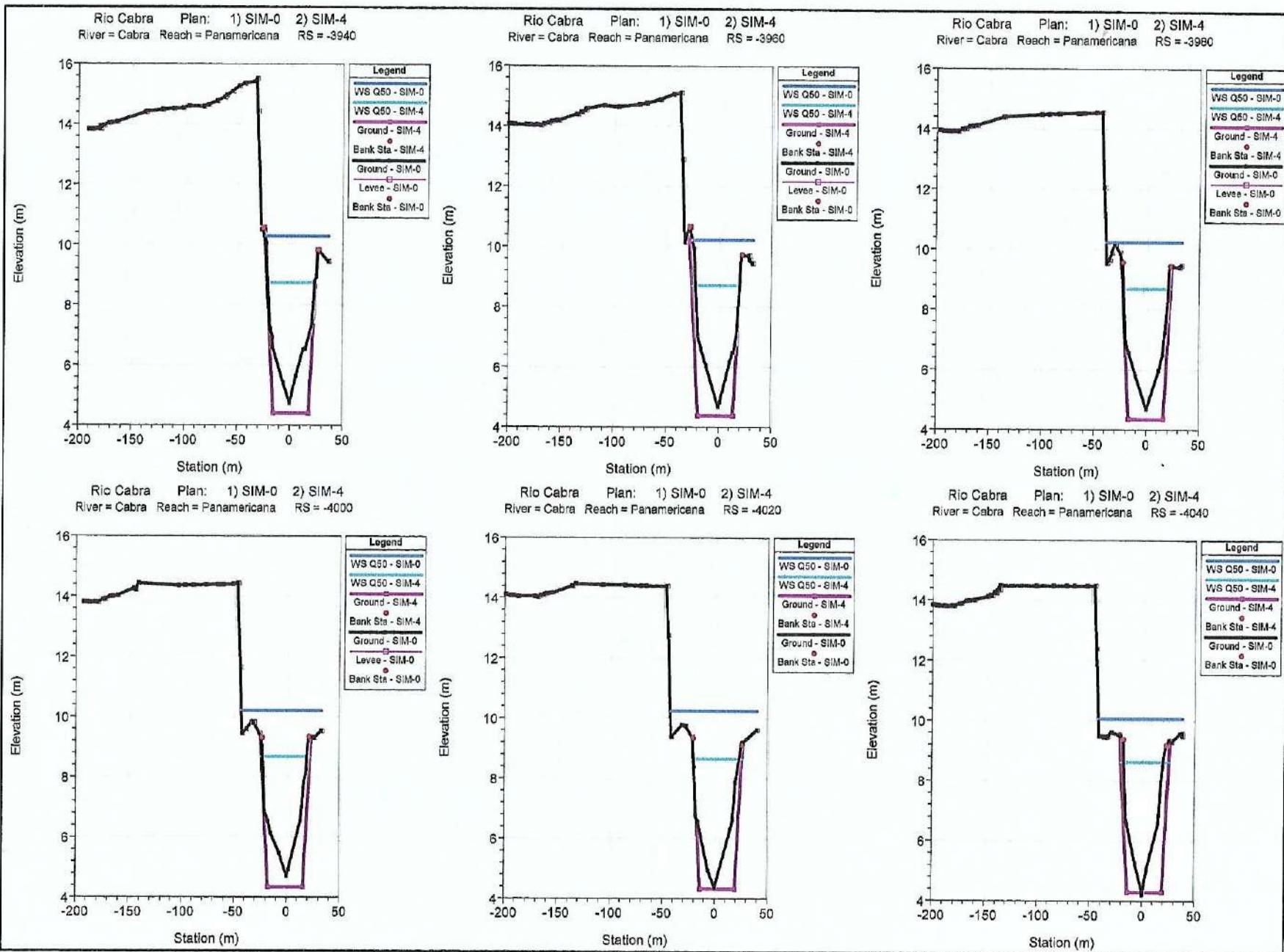
ANEXO 1

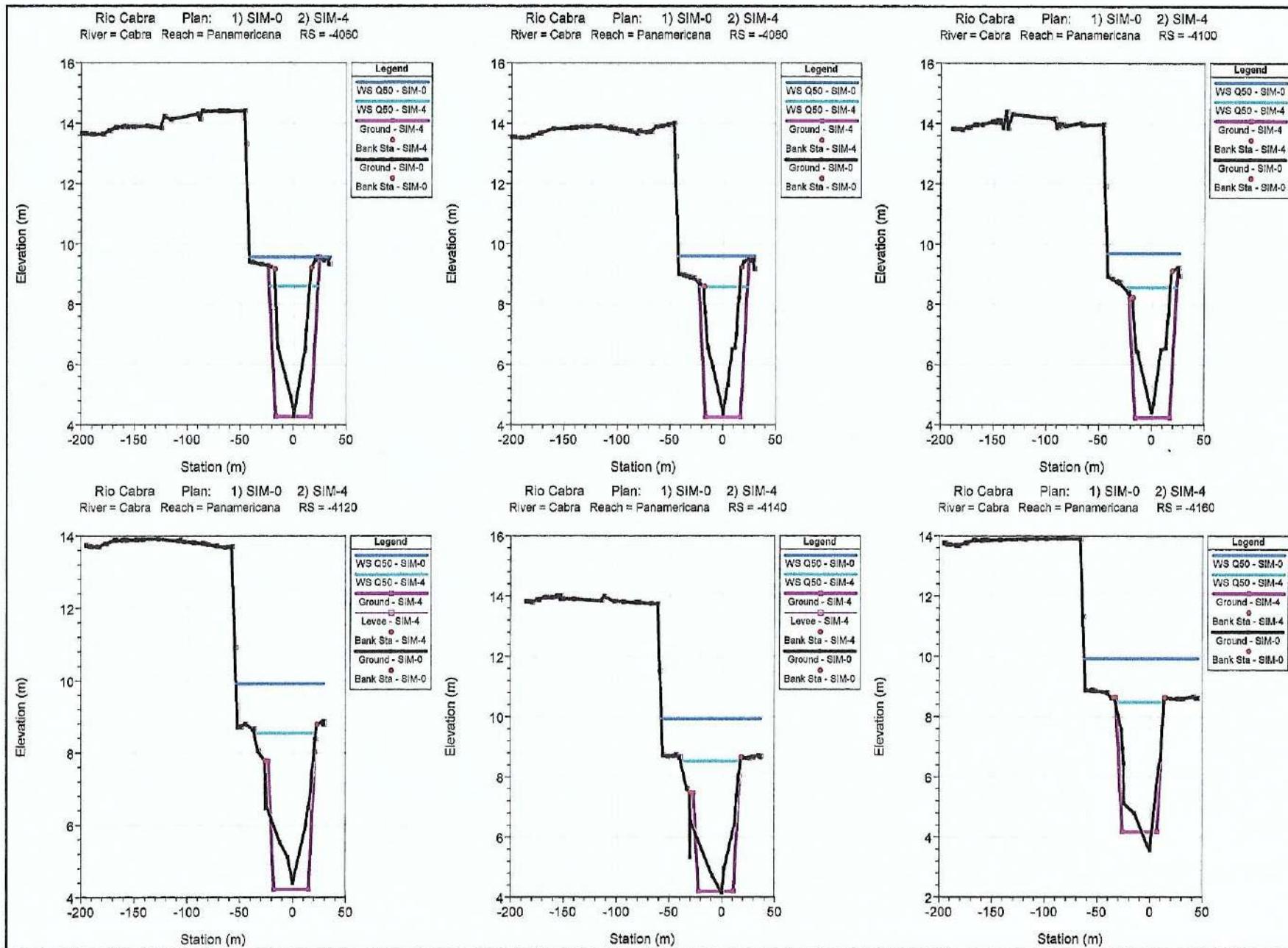
Niveles del agua en el Río Cabra para Q_{50}

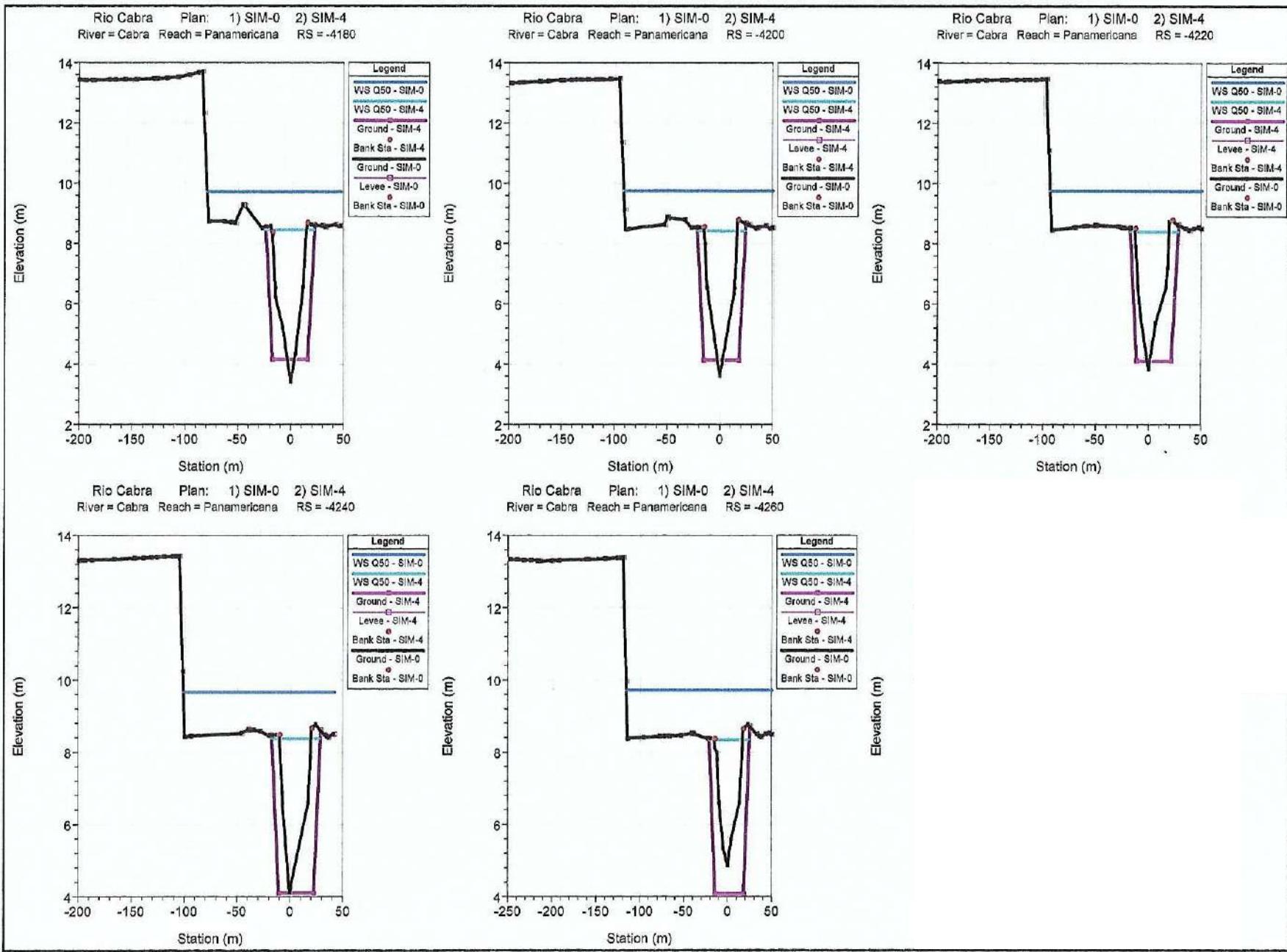
Niveles del agua para $Q_{50} = 505 \text{ m}^3/\text{s}$ con secciones naturales y
sección típica











Río Cabra

Tabla de elementos hidráulicos para $Q_{50}=505 \text{ m}^3/\text{s}$ con las secciones naturales y la sección típica

Reach	River Sta	Profile	Plan	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Depth (m)	Vel Chnl (m/s)	Sta W.S. Lft (m)	Sta W.S. Rgt (m)	Froude # Chl
Panamericana	-3800	Q50	SIM-0	505	5.39	10.49	5.1	2.49	-31.98	38.81	0.42
Panamericana	-3800	Q50	SIM-4	505	4.54	8.87	4.33	2.95	-27.22	18.78	0.49
0											
Panamericana	-3820	Q50	SIM-0	505	5.27	10.49	5.22	2.43	-32.68	37.06	0.41
Panamericana	-3820	Q50	SIM-4	505	4.52	8.85	4.33	2.95	-26.82	19.18	0.49
0											
Panamericana	-3840	Q50	SIM-0	505	5.08	10.44	5.36	2.54	-30.2	36.28	0.42
Panamericana	-3840	Q50	SIM-4	505	4.5	8.83	4.33	2.95	-27.18	18.82	0.49
0											
Panamericana	-3860	Q50	SIM-0	505	5.01	10.36	5.35	2.77	-30.69	35.15	0.46
Panamericana	-3860	Q50	SIM-4	505	4.48	8.81	4.33	2.95	-29.87	16.13	0.49
0											
Panamericana	-3880	Q50	SIM-0	505	4.95	10.31	5.36	2.89	-28.78	34.76	0.47
Panamericana	-3880	Q50	SIM-4	505	4.46	8.79	4.33	2.95	-29.44	16.56	0.49
0											
Panamericana	-3900	Q50	SIM-0	505	4.88	10.29	5.41	2.85	-22.61	35.51	0.46
Panamericana	-3900	Q50	SIM-4	505	4.44	8.77	4.33	2.95	-22.82	23.17	0.49

Panamericana	-3920	Q50	SIM-0	505	4.81	10.27	5.46	2.87	-21.23	35.97	0.47
Panamericana	-3920	Q50	SIM-4	505	4.42	8.75	4.33	2.95	-20.78	25.2	0.49
0											
Panamericana	-3940	Q50	SIM-0	505	4.74	10.29	5.55	2.7	-23.83	35.99	0.45
Panamericana	-3940	Q50	SIM-4	505	4.4	8.73	4.33	2.95	-22.4	23.58	0.49
0											
Panamericana	-3960	Q50	SIM-0	505	4.68	10.22	5.54	2.85	-25.18	31.72	0.47
Panamericana	-3960	Q50	SIM-4	505	4.38	8.71	4.33	2.95	-26.3	19.68	0.49
0											
Panamericana	-3980	Q50	SIM-0	505	4.69	10.23	5.54	2.72	-39.05	32.55	0.43
Panamericana	-3980	Q50	SIM-4	505	4.36	8.69	4.33	2.95	-23.83	22.15	0.49
0											
Panamericana	-4000	Q50	SIM-0	505	4.71	10.2	5.49	2.78	-43.06	32.18	0.44
Panamericana	-4000	Q50	SIM-4	505	4.34	8.67	4.33	2.96	-24.61	21.37	0.49
0											
Panamericana	-4020	Q50	SIM-0	505	4.38	10.23	5.85	2.55	-42.68	39.18	0.4
Panamericana	-4020	Q50	SIM-4	505	4.32	8.65	4.33	2.96	-20.95	25.03	0.49
0											
Panamericana	-4040	Q50	SIM-0	505	4.22	10.07	5.85	3.05	-41.81	37.5	0.49
Panamericana	-4040	Q50	SIM-4	505	4.3	8.62	4.32	2.96	-21.05	24.93	0.49
0											
Panamericana	-4060	Q50	SIM-0	505	4.3	9.56	5.26	4.2	-41.2	33.8	0.72
Panamericana	-4060	Q50	SIM-4	505	4.28	8.6	4.32	2.96	-23.37	22.59	0.49
0											
Panamericana	-4080	Q50	SIM-0	505	4.37	9.61	5.24	3.97	-42.02	29.26	0.68
Panamericana	-4080	Q50	SIM-4	505	4.26	8.58	4.32	2.96	-23.12	22.84	0.49
0											
Panamericana	-4100	Q50	SIM-0	505	4.43	9.69	5.26	3.54	-42.24	25.91	0.6
Panamericana	-4100	Q50	SIM-4	505	4.24	8.55	4.31	2.96	-26.34	23.28	0.49
0											
Panamericana	-4120	Q50	SIM-0	505	4.41	9.91	5.5	2.35	-53.47	28.89	0.37
Panamericana	-4120	Q50	SIM-4	505	4.22	8.55	4.33	2.91	-36.26	21.86	0.49

Panamericana	-4140	Q50	SIM-0	505	4.15	9.93	5.78	2.16	-57.1	36.39	0.33
Panamericana	-4140	Q50	SIM-4	505	4.2	8.53	4.33	2.89	-39.32	17.79	0.49
0											
Panamericana	-4160	Q50	SIM-0	505	3.58	9.92	6.34	2.14	-62.61	44.74	0.33
Panamericana	-4160	Q50	SIM-4	505	4.18	8.48	4.3	2.98	-33.28	12.62	0.49
0											
Panamericana	-4180	Q50	SIM-0	505	3.42	9.73	6.31	2.97	-78.9	46.92	0.46
Panamericana	-4180	Q50	SIM-4	505	4.16	8.45	4.29	2.98	-24.06	21.82	0.5
0											
Panamericana	-4200	Q50	SIM-0	505	3.62	9.75	6.13	2.84	-90.94	49.78	0.44
Panamericana	-4200	Q50	SIM-4	505	4.14	8.43	4.29	2.99	-22.01	23.85	0.5
0											
Panamericana	-4220	Q50	SIM-0	505	3.86	9.76	5.9	2.72	-93.05	50	0.44
Panamericana	-4220	Q50	SIM-4	505	4.12	8.4	4.28	2.99	-18.25	27.61	0.5
0											
Panamericana	-4240	Q50	SIM-0	505	4.13	9.67	5.54	3.05	-100.72	41.75	0.49
Panamericana	-4240	Q50	SIM-4	505	4.1	8.38	4.28	2.99	-17.61	28.23	0.5
0											
Panamericana	-4260	Q50	SIM-0	505	4.86	9.71	4.85	2.77	-115.41	50	0.48
Panamericana	-4260	Q50	SIM-4	505	4.08	8.35	4.27	3	-21.65	24.17	0.5