

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

# Práctica Supervisada

## Ingeniería Civil

*Modelación hidráulica del puente situado sobre el Riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N° 11 de la Provincia de Formosa.*

Autor: Yanina G. Ramseyer

Tutor: M.Sc. Ing. Cecilia E. Pozzi Piacenza

Supervisor externo: Dr. Ing. Tomás A. Prato

18 de Diciembre de 2015  
Córdoba, Argentina.



**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

**AGRADECIMIENTOS**

A mi familia: a mi madre y a mi padre, quienes han sido un apoyo fundamental en este camino, pero por sobre todas las cosas han sido ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Y a mis hermanas, que son fuente de inspiración y orgullo.

A Lucas, mi compañero de vida, por la paciencia y el aliento, sobre todo en los tiempos más difíciles.

A la M.Sc. Inga. Cecilia Pozzi, por haberme guiado y orientado como tutora de mi Práctica Supervisada, brindando sus conocimientos e interés para dar cierre a este informe.

Al Dr. Ing. Tomás Prato, por abrirme las puertas de su empresa para desarrollar mi Práctica Supervisada. Igualmente agradezco a todo el equipo de trabajo por hacer de mi PS una experiencia sumamente valiosa, facilitando mi integración al mismo desde un principio.

A la Universidad Nacional de Córdoba, la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y en particular a los profesores de esta casa de altos estudios, por haber brindado en cada clase sus sapiencias y experiencias profesionales.

A cada uno de los habitantes de este país, por hacer posible la educación pública. A ellos deberé mi vida profesional.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEFyN – Ingeniería Civil

**RESUMEN**

La presente Práctica Supervisada se ha llevado a cabo en la Consultora de Ingeniería INDIGO S.A. (Ingeniería, Desarrollo, Investigación y Gestión de Obras S.A.) en el marco del Proyecto Ejecutivo Obra Ruta Nacional N°11; Provincia de Formosa; Tramo: límite con la provincia de Chaco (km 1.103,16) – Empalme con Ruta Nacional N°81 (km 1.184,38); Sección 1: km 1.140,00 a km 1.160,55 el cual consiste en la duplicación de dicha vía para la construcción de la autovía Ruta Nacional N°11. Si bien dicho proyecto presenta la interacción de diversas ramas de la ingeniería, se ha acotado el mismo para los alcances del presente informe.

Sobre el riacho Cortapick se encuentran construidos en la actualidad dos puentes: uno inutilizado debido a que la cota de su tablero no supera a la cota de máxima crecida calculada para un periodo de recurrencia de 50 y 100 años; y otro situado aguas abajo del mismo sobre la actual traza de la Ruta Nacional N°11, cuyo desempeño hasta la actualidad es aceptable, y por lo tanto es el que se planea duplicar aguas abajo.

En el presente informe se detallarán los estudios hidrológicos e hidráulicos sobre el puente proyectado, y la afectación de su construcción sobre el puente actualmente en uso.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEFyN – Ingeniería Civil

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>4</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
1.1 Objetivos .....	7
1.2 Metodología de trabajo.....	8
1.3 Descripción del proyecto .....	9
<b>2 HIDROLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
2.1 Datos de la cuenca y obtención del hietograma de diseño .....	12
2.2 Descripción general de la cuenca del riacho Cortapick.....	13
2.2.1 Ubicación geográfica .....	13
2.2.2 Flora y fauna .....	13
2.2.3 Recursos hídricos.....	13
2.2.4 Clima.....	14
2.2.5 Suelo.....	14
2.2.6 Precipitaciones .....	15
2.2.7 Área .....	16
2.2.8 Tiempo de concentración.....	16
2.2.9 Número de curva de escorrentía (CN).....	17
2.3 Estudios probabilísticos para la determinación de la tormenta de diseño .....	19
2.4 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	24
2.5 Determinación del hietograma de diseño .....	27
2.6 Determinación del caudal de diseño.....	31

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

2.6.1	Modelo computacional HEC-HMS .....	31
2.6.2	Modelo de transferencia tipo Hidrograma Unitario de Clark.....	33
<b>3</b>	<b>HIDRÁULICA .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Factores hidráulicos en el diseño de puentes.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelo computacional HEC-RAS .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Descripción del modelo .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Estrategias de modelación .....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>ESTIMACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Erosión General .....</b>	<b>50</b>
4.1.1	Descripción del criterio de Lischtvan-Lebediev .....	52
4.1.2	Determinación de la profundidad de socavación generalizada .....	55
<b>4.2</b>	<b>Erosión por contracción .....</b>	<b>57</b>
4.2.1	Determinación de la profundidad de socavación por Contracción .....	57
<b>4.3</b>	<b>Erosión en pilas y estribos .....</b>	<b>61</b>
4.3.1	Cálculo de la socavación local en pilas .....	61
4.3.2	Cálculo de la socavación local en estribos.....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

## **1 INTRODUCCIÓN**

El presente informe expone las tareas ejecutadas en la empresa en el marco del desarrollo de la Práctica Supervisada. Lo cual, en gran parte, es producto de la elaboración del informe que se presentó en Dirección Nacional de Vialidad.

A toda esta información se le ha dado el marco teórico correspondiente, que integra los conceptos aprendidos durante la carrera de grado con las tareas de ingeniería desarrolladas en la actividad cotidiana de la empresa.

Desde un punto de vista general, el informe se ha centrado fundamentalmente en tres unidades: Hidrología, Hidráulica y Socavaciones.

Dentro de la primera se describe el análisis de antecedentes, la caracterización de la cuenca y la determinación del caudal de diseño, tomando como referencia la tormenta de diseño extraída y estudiada de los antecedentes.

En la segunda parte se describen los factores hidráulicos en el diseño de puentes, así como el modelo a aplicar y los escenarios en los cuales se plantearán las diversas situaciones para culminar con la determinación de la cota de máxima crecida.

En la última unidad se expone el proceso de estimación de las profundidades de socavación considerando tanto la erosión general como las localizadas, en los escenarios descritos anteriormente.

Finalmente se presentan las conclusiones arribadas con el presente trabajo.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

**1.1 Objetivos**

Los principales objetivos de esta Práctica Supervisada fueron:

- Relevar y analizar antecedentes para conocer y comprender las características de la cuenca del riacho Cortapick y de dicho curso de agua.
- Comprender y aplicar un modelo de balance hidrológico para la determinación de la cota de máxima crecida en los tiempos de recurrencia prefijados, así como las profundidades de socavación general, además de las socavaciones en pilas y estribos.
- Integrar un equipo de trabajo conformado por un universo multidisciplinario de profesionales y técnicos.
- Aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el desarrollo de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Redactar un Informe en el que se presenten los trabajos ejecutados en esta Práctica Supervisada y las conclusiones a las que se ha arribado.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

---

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

### 1.2 Metodología de trabajo

En primer lugar se llevó a cabo una revisión de antecedentes a fin de conocer y comprender el comportamiento de la cuenca que aporta al riacho Cortapick. De igual manera se profundizó en el conocimiento de los softwares de aplicación HEC-HMS y HEC-RAS, utilizados en el presente informe para la determinación del caudal pico de una crecida y la cota máxima alcanzada durante la misma en la sección de interés del río, como así también sus erosiones.

Se estudió la información hidrometeorológica antecedente a fin de determinar la confiabilidad o no de la lluvia de diseño asumida.

Mediante el software HEC-HMS se determinó el caudal pico para una recurrencia de 50 y 100 años, correspondiente a la lluvia de diseño adoptada y a las características de la cuenca definidas.

Se realizó un análisis morfológico del riacho para su correcta clasificación.

Para la aplicación del modelo computacional HEC-RAS, se analizó y trabajó sobre la información topográfica relevada en campaña, aguas arriba y aguas abajo del cruce.

Se plantearon 2 (dos) escenarios: El primero describe la **situación actual**, considera la presencia del puente existente a demoler y el puente existente en uso. El segundo describe la **situación proyectada**, planteando la presencia del puente existente en uso y de un nuevo puente proyectado.

En cada uno de los escenarios anteriormente descriptos se calculó la cota de máxima crecida para tiempos de recurrencia de 50 y 100 años.

De igual manera, para cada uno de los escenarios planteados, se determinaron la erosión general, por contracción, y en pilas y estribos de cada uno de los puentes tomando como base los estudios geotécnicos antecedentes.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

**1.3 Descripción del proyecto**

El proyecto en el cual se basa el presente Informe de Práctica Supervisada pertenece a la Obra: **“Construcción de Autovía y Multitrocha - Ruta Nacional N°11 - Provincia de Formosa - Sección 1: Km 1.140,00 a Km 1.160,55”**. Dentro de dicha obra, en la progresiva 4+885,94, se sitúa el puente cuyos estudios hidrológicos e hidráulicos son el eje del presente informe.

En la siguiente figura se muestra la zona de emplazamiento del riacho Cortapick dentro de la provincia de Formosa:

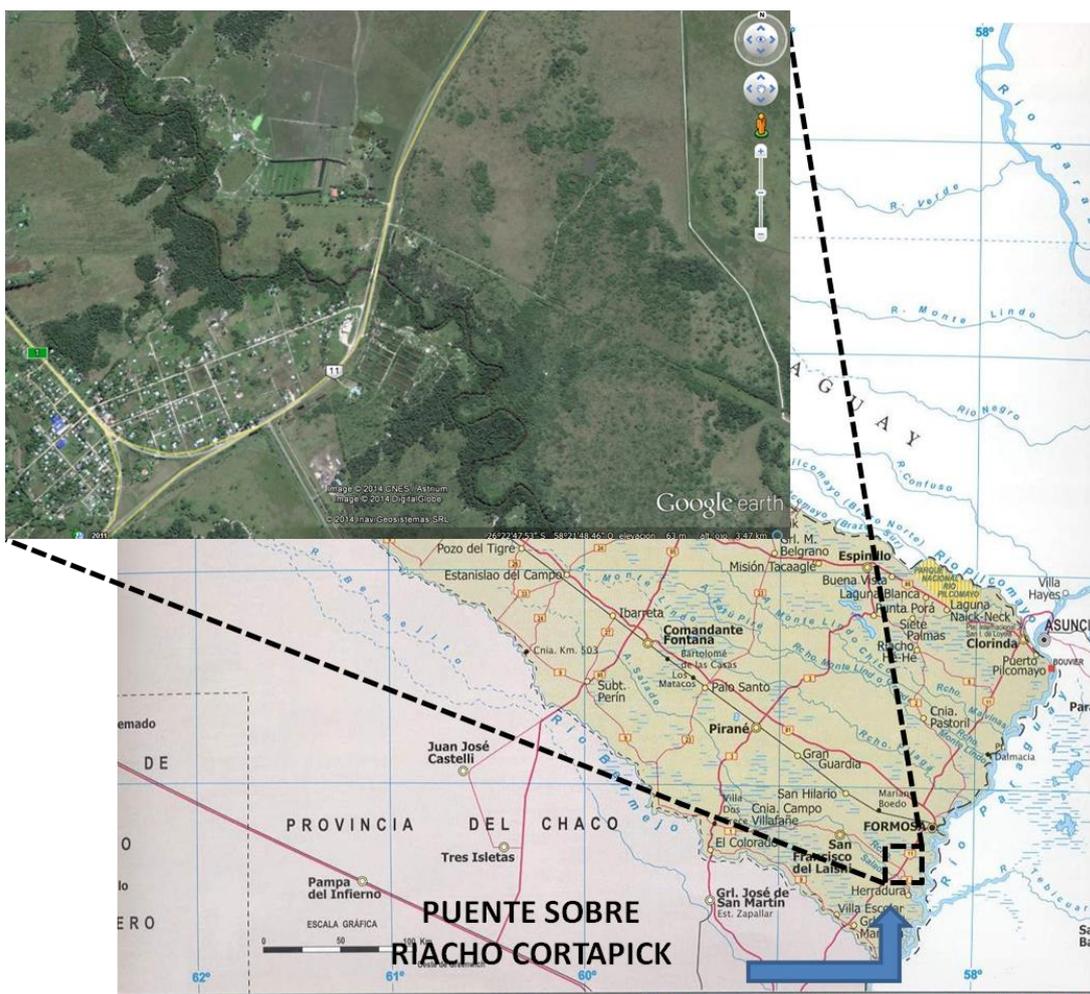


Figura 1: Ubicación Puente – Riacho Cortapick.

En la actualidad se encuentra sobre la traza un puente que será duplicado aguas abajo del existente. El mismo constará de 3 tramos de 20 m de longitud, ubicado con su eje paralelo al correspondiente al puente actual.

El tablero del puente existente tiene un ancho total de 11,50 m, con una calzada bidireccional de 8,30 m, la cual pasará a ser unidireccional una vez ejecutado el nuevo puente.

El tablero del puente proyectado tendrá un ancho total de 11,90 m, con una calzada unidireccional de 7,30 m.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil



*Figura 2: Vista de puente existente en Riacho Cortapick (Google Earth).*



*Figura 3: Vista desde el puente hacia aguas arriba (Google Earth).*

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil



*Figura 4: Vista desde el puente hacia aguas abajo (Google Earth).*

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

## **2 HIDROLOGÍA**

### **2.1 Datos de la cuenca y obtención del hietograma de diseño**

Para el diseño hidráulico del puente se procedió, en una primera instancia, a realizar una caracterización de la cuenca. Esto resultó esencial para luego determinar el caudal de diseño, calculado para tormentas de recurrencia igual a 25, 50 y 100 años. Los resultados obtenidos para tormentas con un tiempo de recurrencia de 25 años son usualmente utilizados en casos en que fuese necesaria la ejecución de protecciones hidráulicas. Las tormentas con recurrencias de 50 años y 100 años, en cambio, se emplearon en la determinación de las cotas de máxima crecida y profundidad de erosión.

Para la modelación hidrológica se contó con antecedentes donde se ha determinado la lluvia de diseño partiendo de análisis de frecuencias y estadísticos sobre registros pluviométricos de la estación Puerto Formosa, cercana a la cuenca del riacho en estudio.

El proceso de transformación de lluvia en escorrentía se ha realizado siguiendo una metodología que se basa en la aplicación del software computacional HEC-HMS desarrollado por Centro de Ingeniería Hidrológica de los EEUU.

Por último, una vez determinados los caudales de diseño, se realizó el dimensionamiento y verificación de la estructura de cruce propuesta, la determinación de las crecidas máximas para los períodos de retorno señalados y la estimación de las profundidades de socavación en pilas y estribos.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

### 2.2 Descripción general de la cuenca del riacho Cortapick.

#### 2.2.1 Ubicación geográfica

La provincia de Formosa, ubicada en la Zona Nordeste de la República Argentina, ocupa íntegramente el área del Chaco Central y define con sus características de sabana parque el gran ecosistema de la llanura chaqueña, conformado también por el Chaco boreal (Paraguay) y el Chaco austral (Argentina).

La cuenca del riacho Cortapick se encuentra al sudeste de la provincia de Formosa, unos 20 km al sur de la ciudad de Formosa. Su extensión incluye parte de los departamentos provinciales de Laishi, Formosa y Pirané.

#### 2.2.2 Flora y fauna

La zona donde se halla la cuenca del riacho Cortapick es una región boscosa por excelencia.

Conforman la vegetación de los albardones contiguos a los cursos de agua el quebracho colorado y blanco, el urunday, el lapacho, el algarrobo, la palmera Caranday, el Guayaibí, el Guayacán, el Cañar, el jacarandá, la espina corona, el aromito, el espinillo, el ibirá Pitá, el Timbó, el tatané, el viraró, el palo blanco, la guaranina, entre muchas otras especies.

Los más numerosos dentro de los vertebrados, son los mamíferos y las aves, característicos ambos de espacios abiertos y muy adaptados a los ecosistemas existentes (mono tití, mono aullador, coatí, hurón, nutria, ciervos de los pantanos, tapir, carpincho. Entre las aves sobresalen las garzas, el ñandú, el chajá, el martín pescador, el tucán, entre otros). También se encuentran reptiles (como el yacaré o la tortuga de río), anfibios y peces.

En cuanto a los cultivos, se destacan los cultivos de algodón, arroz, frutas (bananas, pomelo, melón, mamón, guayabas, mangos) y hortalizas (zapallo, mandioca, pimienta y tomate), también se siembra soja y maíz.

La ganadería está representada por cruces de razas británicas (Aberdeen Angus, Shorthorn y Heresford) y cebú (Brahman y Nelore). También se crían cabras y búfalos (*Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org>*).

#### 2.2.3 Recursos hídricos

El sistema hídrico formoseño forma parte de la Cuenca del Río de la Plata y presenta características muy particulares. Los tres ríos más importantes de la provincia de Formosa, constituyen sus límites naturales, ellos son el Pilcomayo, el Bermejo y el Paraguay.

La mitad oriental de la provincia está surcada por riachos y arroyos de escasa importancia que discurren de Oeste a Este, casi paralelos entre sí. Entre ellos podemos nombrar al San Hilario, Dobagán, Formosa, Alazán, Ramírez, Salado y el protagonista de este informe, el riacho Cortapick. Son temporarios, de bajo caudal y sus albardones son altos; lo cual, sumado a la baja pendiente del terreno, impide el libre drenaje y encauzamiento de las aguas. Esto da origen a grandes esteros y lagunas en las zonas más bajas. En general, los arroyos presentan escasa o nula conexión con los sistemas de ríos, drenando por sus partes centrales.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

Desarrollan, de esta manera, sistemas de cañadas, cárcavas y cursos con albardones, anchos y de poca profundidad.

Se encuentran también meandros y cauces abandonados -que permiten la formación de ríos de carácter irregular y temporario- y los denominados "madrejones" o "pozos", que son acumulaciones permanentes de agua que cobran vital importancia en las épocas de sequías prolongadas. Estos madrejones son en realidad parte de los cauces abandonados o ríos muertos, pertenecientes tanto al Sistema del río Pilcomayo como al del río Bermejo, o a otros sistemas fluviales ya fenecidos.

### 2.2.4 Clima

La provincia de Formosa, desde el punto de vista agroecológico, se divide en tres grandes áreas: la zona este o húmeda, la zona centro o sub-húmeda y la zona oeste o semiárida, tal como puede observarse en la Fig.5.

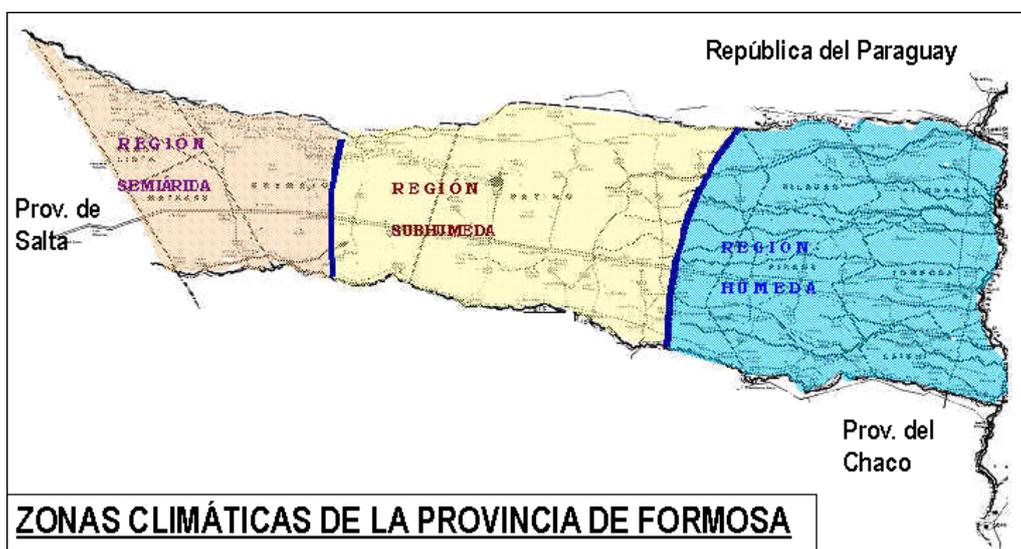


Figura 5: Zonas climáticas de la provincia de Formosa (<https://www.formosa.gob.ar/>).

La cuenca del riacho Cortapick se encuentra dentro de la región húmeda, al este de la provincia. Aquí el clima es cálido subtropical húmedo, con temperaturas medias anuales de 21,9 °C y precipitaciones abundantes durante todo el año, superiores a los 1.000 mm anuales.

### 2.2.5 Suelo

La cuenca del Cortapick se encuentra ubicada en la región geológica Chaco Pampeana, la cual es una Planicie suavemente ondulada, cubierta por sedimentos de la era Cuaternaria. Las cotas altimétricas rondan los 55 metros sobre el nivel del mar.

Los suelos del este formoseño forman parte de una amplia planicie de derrames rellenada por sedimentos limosos y arenosos no consolidados, ocasionalmente depositados en condiciones palustres. Los principales suelos son los pardos y regosoles.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

El riacho Cortapick tiene sus nacientes en la parte noroeste de la cuenca y discurre en dirección noroeste – sudeste, coincidente con el sentido de la pendiente general de la zona, desembocando en el río Paraguay, pocos kilómetros después de atravesar la Ruta Nacional N°11.

Desde sus nacientes, y hasta su desembocadura, la corriente presenta una pendiente muy baja, aproximadamente uniforme, con un promedio de 0,02 %.

**2.2.6 Precipitaciones**

En el siguiente gráfico se muestran las Isohietas Medias Anuales y la Evapotranspiración Potencial en la provincia de Formosa:

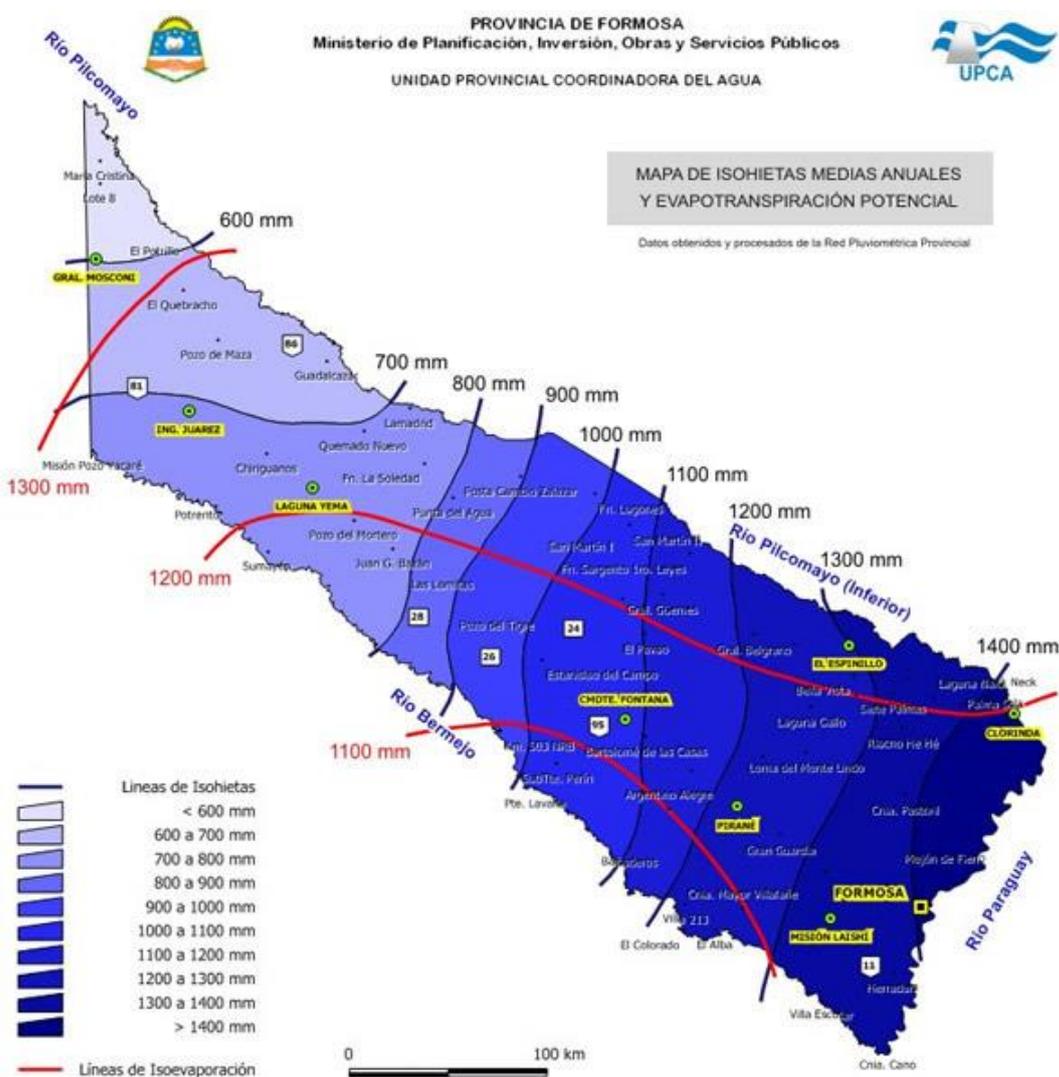


Figura 6: Mapa de isohietas medias anuales y evapotranspiración potencial de la provincia de Formosa (<https://www.formosa.gob.ar/>).

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

En la Fig. 6 puede observarse que en la región de la cuenca en estudio las isohietas medias anuales rondan los 1.300 mm. Mientras que los valores de evaporación potencial se encuentran entre los 1.100 mm y los 1.200 mm.

### 2.2.7 Área

La base de datos asociada a Google Earth posee, para la zona del tramo en estudio, imágenes de alta resolución que abarcan la mayor parte de la traza. Asimismo, dichas imágenes se encuentran vinculadas a un Modelo Digital de Elevaciones que permite la visualización tridimensional de éstas.

Mediante el análisis de las imágenes anteriormente descritas se procedió a la delimitación de la cuenca que conforma el área de aporte del riacho hasta la sección de control, determinada en la ubicación del puente proyectado sobre la Ruta Nacional N°11. En base a la delimitación realizada, la cuenca posee un total de 1.456 km<sup>2</sup>, como se observa en la Fig. 7 a continuación.

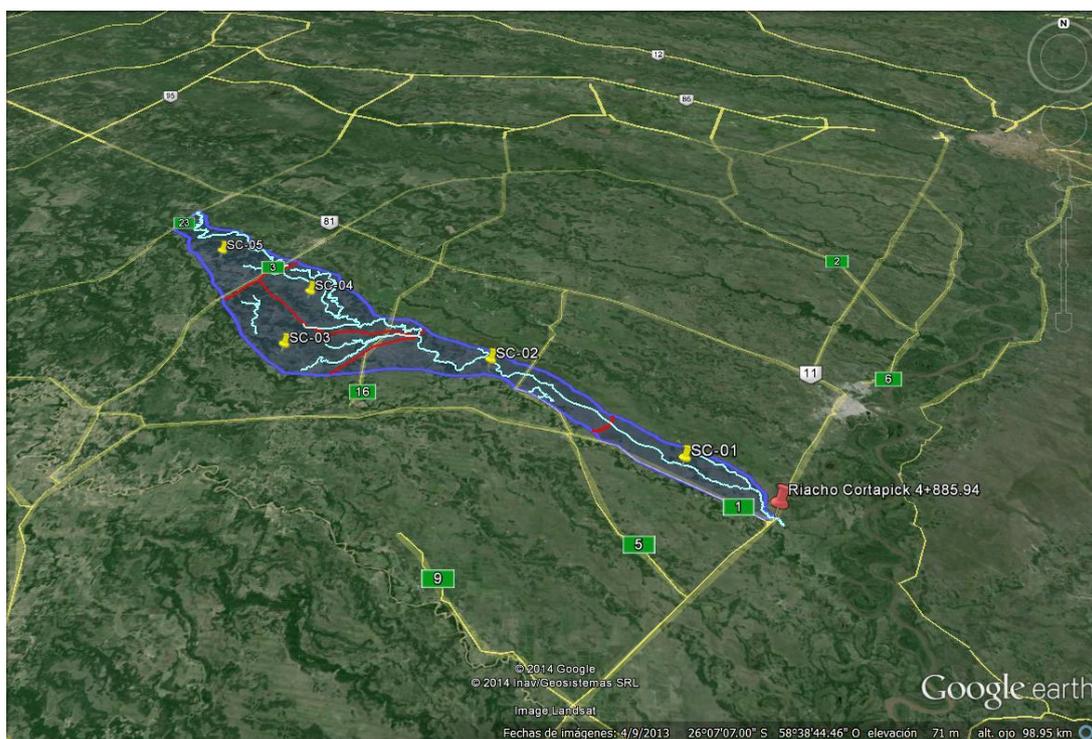


Figura 7: Cuenca y cauce principal del Riacho Cortapick (HEC-HMS).

### 2.2.8 Tiempo de concentración

Una de las características de importancia de la cuenca es el tiempo de concentración, que se define como el tiempo necesario para que una gota que cae en el punto “hidrológicamente” más alejado de la cuenca llegue a la salida. Para la determinación del mismo se utilizan diferentes fórmulas empíricas. En este caso se decidió adoptar la fórmula Dooge (Ecuación

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

N°1), cuya fiabilidad ha sido demostrada para cuencas con áreas de entre 140 y 930 km<sup>2</sup> (Tucci, 1993).

$$t_c = 21.88 \times A^{0.41} \times \left(\frac{P}{100}\right)^{-0.17}$$

Ecuación 1: Fórmula Dooge (Tucci, 1993)

Donde A es el área de la subcuenca y P es la pendiente.

A fin de lograr una más fiable representación de la situación real es que se ha subdividido a la cuenca de aporte del riacho Cortapick en una serie de 5 subcuencas, cuyas áreas van de los 166 km<sup>2</sup> a los 353 km<sup>2</sup>.

Para cada una de estas subcuencas se determinó el tiempo de concentración según la fórmula de Dooge anteriormente presentada. En la Tabla 1 se muestran los resultados arribados.

Tabla 1: Tiempo de Concentración.

CUENCA	ÁREA [Km2]	LONG [Km]	Hmáx [m]	Hmin [m]	ΔH [m]	PENDIENTE MEDIA [m/m]	Tc DOOGE [hs]
SC-01	166.0	36.80	68.0	62.0	6.0	0.00016	13.06
SC-02	314.0	53.00	79.0	68.0	11.0	0.00021	16.28
SC-03	353.0	56.00	89.0	79.0	10.0	0.00018	17.53
SC-04	315.0	61.00	86.0	79.0	7.0	0.00011	18.03
SC-05	308.0	55.00	92.0	86.0	6.0	0.00011	18.02
<b>ÁREA TOTAL:</b>	<b>1456.0</b>						

Como puede verse en la Tabla 1, la pendiente media de las subcuencas ronda el 0,2‰. El tiempo de concentración, por su parte, va de 13 a 18 horas.

### 2.2.9 Número de curva de escorrentía (CN)

El número de curva (CN) es un parámetro empírico que toma en cuenta las condiciones de humedad antecedente del suelo. Se representa mediante un número adimensional en curvas estandarizadas que varían entre 0 y 100. Un área con CN=0 no tiene escurrimiento, una con CN=100 es impermeable y toda la precipitación genera escorrentía.

El CN de la cuenca fue estimado de acuerdo a la Tabla 2. En ella se muestran los valores sugeridos por V.T. Chow (1994), para un tipo de suelo que de la tipología C. Es decir, para un tipo de suelo donde la infiltración es lenta si se encuentra muy húmedo, la profundidad del

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

suelo es inferior a la media, su textura es franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa o arcillo-arenoso y son suelos imperfectamente drenados.

Tabla 2: Números de curva de escorrentía (V.T. Chow, 1994)

### Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$ )

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas.	45	66	77	83
cubierta buena <sup>2</sup>	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial <sup>3</sup> :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup>			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. <sup>5</sup>	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>5</sup>	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Los valores adoptados de CN son, para cada subcuenca, los indicados en la Tabla 3. Se arriba a los mismos haciendo un promedio ponderado de los CN según el área que abarca cada actividad dentro de la subcuenca.

*Tabla 3: Determinación de CN.*

<b>CUENCA RIACHO CORTAPICK</b>							
SUBCUENCA	ÁREA DE SUBCUENCA	CULTIVO CN 88	PASTIZAL CN 74	BAÑADOS CN 87	BOSQUE CN 70	LAGUNA CN 100	CN ADOPTADO
SC-01	166.0	3.0	146.0	0.0	17.0	0.0	73.84
SC-02	314.0	11.0	266.0	13.0	24.0	0.0	74.72
SC-03	353.0	26.0	17.0	39.0	268.0	3.0	73.65
SC-04	315.0	0.0	53.0	19.0	240.0	3.0	71.98
SC-05	308.0	35.0	17.0	1.0	248.0	7.0	73.00
<b>ÁREA TOTAL:</b>	<b>1456.0</b>						

### 2.3 Estudios probabilísticos para la determinación de la tormenta de diseño

A continuación se presenta el resumen de los estudios realizados sobre los datos extractados en la estación Hidrometeorológica Puerto Formosa. Estos estudios forman parte de los antecedentes recopilados y analizados para ser aplicados en el presente informe.

La estación Puerto Formosa se consideró la más fiable de las ubicadas en las proximidades de la cuenca, según coeficientes obtenidos de estudios probabilísticos, longitud de la serie y ubicación geográfica respecto de la cuenca. Los datos fueron provistos por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

La Estación Meteorológica Puerto Formosa comprende un total de 52 años con datos de precipitaciones totales diarias, de donde se han seleccionado las Precipitaciones Máximas Diarias Anuales.

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el programa Statgraphics.

En la Tabla 4 se muestran las precipitaciones seleccionadas. Además, en la Tabla 5, se exponen las medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

*Tabla 4: Precipitaciones Medias diarias*

PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES - FORMOSA				
ORDEN	AÑO	PREC. 1 DÍA [mm]	PREC. 2 DÍAS [mm]	PREC. 3 DÍAS [mm]
1	1963	92.1	110.7	92.1
2	1964	115.1	121.5	125.2
3	1965	70.8	71.6	104.6
4	1966	221.5	373.8	458.5
5	1967	135.6	157.8	135.6
6	1968	140.2	143.9	168.8
7	1969	182.4	184.2	182.4
8	1970	80.9	82.2	84.8
9	1971	85.9	111.8	127
10	1972	76.2	83.3	83.7
11	1973	161.9	236.2	240
12	1974	132.7	146.5	153.3
13	1975	130.8	137.3	130.8
14	1976	92	107.2	109.7
15	1977	90.2	117	118.7
16	1978	68.4	76.9	78.1
17	1979	65.5	91	129.8
18	1980	70	102	115
19	1981	110	125	125.1
20	1982	126.4	175.4	187.5
21	1983	77	135	138
22	1984	139	139	139
23	1985	104.4	128.4	167.4
24	1986	127	234	261
25	1987	108	180.2	197.2
26	1988	86	91	86
27	1989	70	91	97.6
28	1990	83.8	86.8	118.2
29	1991	100	100.9	100
30	1992	124	124	137.3
31	1993	70	90	90.9
32	1994	75	92	142
33	1995	67	108	129
34	1996	121	125	139
35	1997	128.5	137.5	137.7
36	1998	211	250	276
37	1999	112	119	112
38	2000	159.1	159.3	159.1
39	2001	97	114	138
40	2002	165	165	183
41	2003	82	112	135
42	2004	113.5	122.5	131.5
43	2005	90	97	97.1
44	2006	78	102	131
45	2007	135	150	135
46	2008	58	98	74
47	2009	81	81	81
48	2010	74	116	112
49	2011	71	125	146
50	2012	106	118	115.5
51	2013	83	113	131
52	2014	115	127	115

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

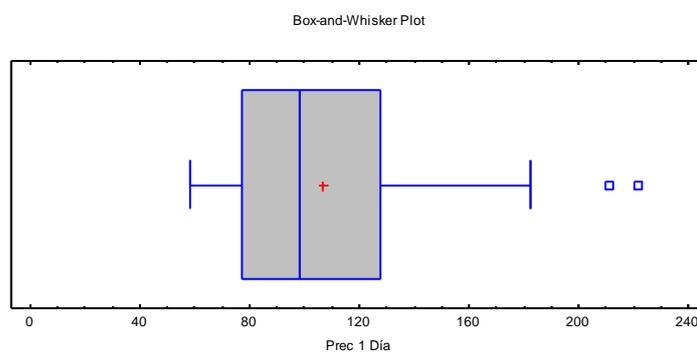
UNC – FCEyN – Ingeniería Civil

*Tabla 5: Resumen Estadístico para Precipitaciones (Statgraphics)*

ESTADÍSTICO	PREC. 1 DÍA [mm]	PREC. 2 DÍA [mm]	PREC. 3 DÍA [mm]
Recuento	52.00	52.00	52.00
Promedio	106.92	130.52	140.45
<b>Media</b>	98.50	118.50	130.90
Varianza	1362.28	2704.52	3812.05
<b>Desviación estándar</b>	36.91	52.01	61.74
Coeficiente de variación	0.35	0.40	0.44
Mínimo	58.00	71.60	74.00
Máximo	221.50	373.80	458.50
Rango	163.50	302.20	384.50
Sesgo estandarizado	3.50	7.50	9.17
Curtosis estandarizada	2.04	13.18	19.90

De particular interés aquí fueron el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que evidencian que se trata de una muestra que no posee una distribución normal. Esto es porque ambos estadísticos tienen valores fuera del rango de -2 a +2, lo cual indica desviaciones significativas de la normalidad.

En las Fig. 8 a 10 se muestran la dispersión de los datos y su ubicación respecto a la media y la mediana para la serie de valores correspondiente a precipitaciones de un día de duración:



*Figura 8: Gráfico de Caja y Bigote (Statgraphics).*

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYn – Ingeniería Civil

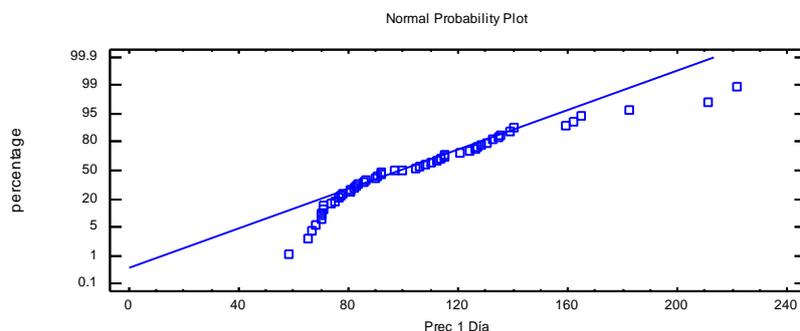


Figura 9: Gráfico de Probabilidad Normal (Statgraphics).

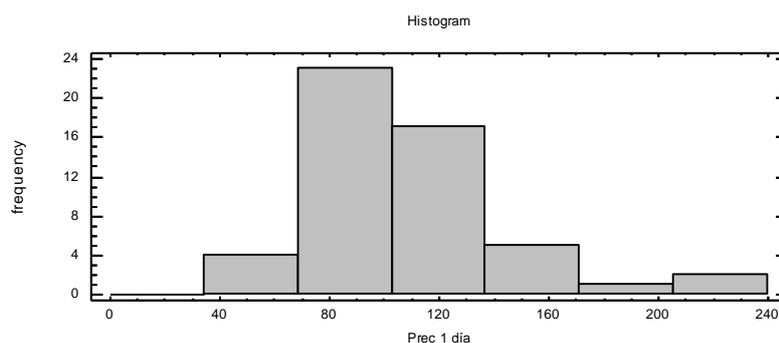


Figura 10: Gráficos de frecuencia (Statgraphics).

A continuación, se desarrolló un análisis de frecuencia de valores extremos. Este análisis se emplea para estimar los valores máximos asociados a diferentes periodos de retorno de las lluvias máximas registradas en una estación pluviométrica. Utilizando el programa computacional EasyFit se evaluaron las distribuciones de probabilidades que ajustaban al gráfico de la figura 8. Las principales características de este software son las siguientes:

- compatibilidad con más de 55 distribuciones
- modo eficaz de ajuste automático de datos
- capacidad de ajuste manual de distribución
- gráficos interactivos
- pruebas de bondad de ajuste

Durante el cursado de la materia Hidrología y Procesos Hidráulicos se estudiaron las distribuciones Normal, Gumbel, general de Valores Extremos y Log Pearson III.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Para determinar cuál de estas funciones representaba fielmente los datos de precipitación y si la misma podía utilizarse para predecir los eventos de precipitación que se pretendían determinar, se utilizaron diferentes técnicas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi Cuadrado. Éstas arrojaron como resultado que los datos de precipitaciones diarias máximas anuales provenientes de la estación Formosa Aero podían ser modelados adecuadamente por una distribución de Gumbel.

En la Fig. 11 a continuación se muestra el histograma superpuesto a un gráfico de la función de distribución de Gumbel para los datos correspondientes a precipitaciones de 1 día de duración.

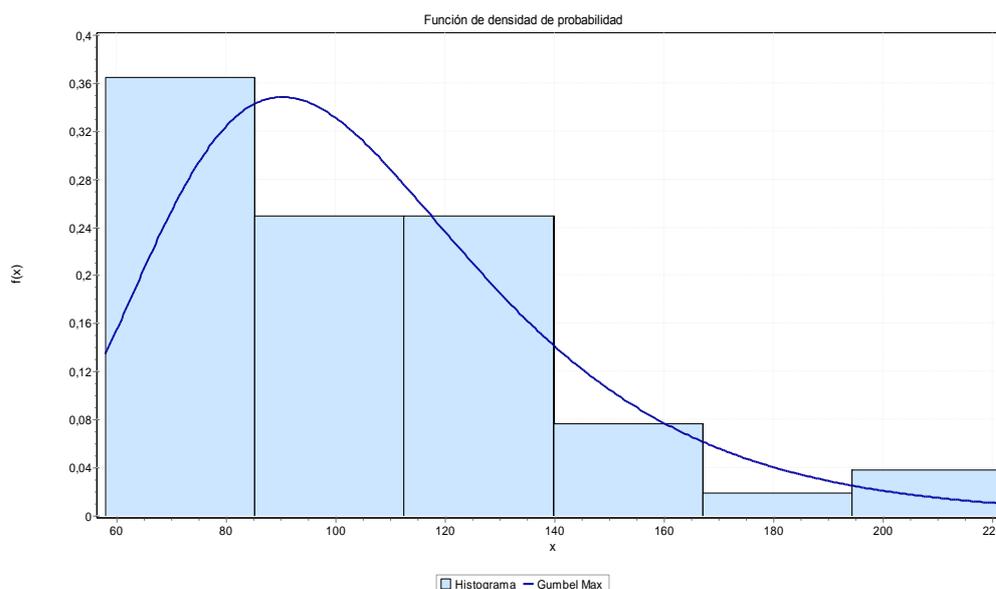


Figura 11: Gráfico de frecuencia y función de distribución Gumbel (EasyFit).

A partir de esta distribución, se obtuvieron los resultados de intensidad de lluvia expuestos en la Tabla 6, para 25, 50 y 100 años de recurrencia.

Tabla 6: Intensidad de Precipitaciones con Distribución Gumbel.

TR [años]	INTENSIDAD [mm/día]		
	1	2	3
25	182.36	118.41	88.88
50	202.60	132.67	100.17
100	222.69	146.82	111.37

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

### 2.4 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

A partir de la Distribución de Gumbel se obtuvieron las curvas I-D-F, mostradas en la Fig. 12, en la estación Formosa Aero, las cuales fueron finalmente adoptadas para la determinación de los caudales de diseño.

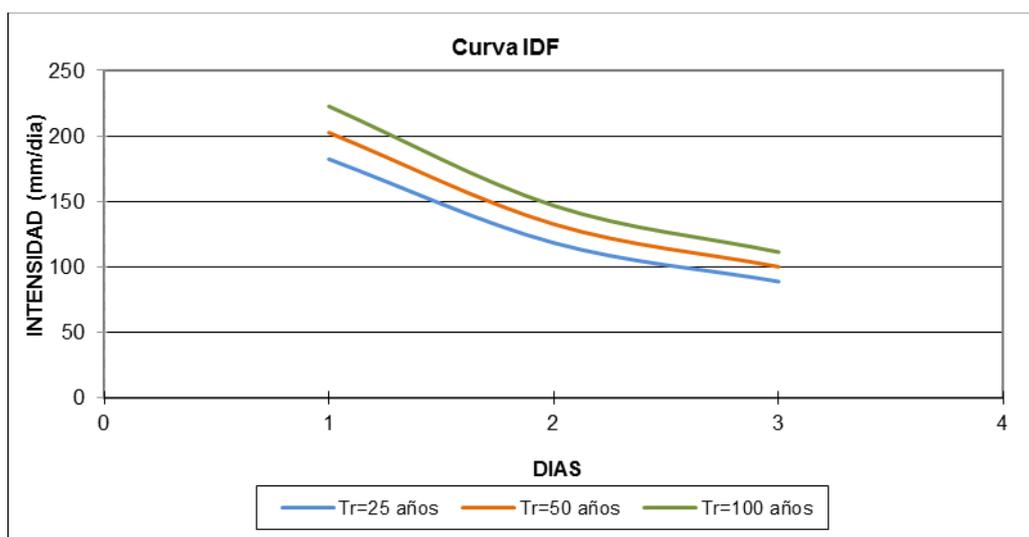


Figura 12: Curvas I-D-F para 25, 50 y 100 años.

Debido a que los valores sobre los que se ha trabajado poseen intervalos de tiempo mayores a los que se utilizaron como duración de la tormenta de proyecto, es que fue necesario discretizar los valores de precipitación e intensidad en intervalos de tiempo menores. Para ello, se tomaron los valores de precipitaciones obtenidos para duraciones de 24hs y se les aplicó a continuación el método de las relaciones.

Este método se basa en dos características observadas en las curvas IDF correspondientes a puestos localizados en diversas partes del mundo:

- Existe una tendencia de las curvas de probabilidad de diferentes duraciones a mantenerse paralelas entre sí (lo que es simple de observar cuando las mismas son graficadas en papel log-log).
- Para zonas próximas geográficamente, existe una gran similitud en las relaciones entre intensidades medias máximas de diferentes duraciones.

$$r_{t1/t2} = \frac{\text{relación de duración } t_1}{\text{relación de duración } t_2}$$

Ecuación 2

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

A partir de este método, se prefijaron valores de proporciones de intensidades de precipitación para duraciones menores a 1 día, previamente aplicando un factor (R) para pasar de una lluvia diaria (de la cual se tienen datos) a una máxima de 24 hs, fijado en 1,12.

$$I(d) = I(24hs) * rd(d) * R$$

*Ecuación 3*

donde I(d) es la intensidad de lluvia para una duración d determinada; I(24hs) es la intensidad de lluvia para 24 horas de duración; rd es el factor de relación y R es un factor adimensional asumido igual a 1,12.

Aplicando estas relaciones a los valores de intensidad antes conseguidos, se obtuvieron los valores de precipitaciones e intensidades para duraciones de lluvia menores expuestos en la Tabla 8.

*Tabla 7*

RELACIONES							
d [min]	15	30	60	120	180	360	720
rd/24hs	0.225	0.325	0.425	0.540	0.590	0.720	0.850
Int [mm] para Tr=25	46.0	66.4	86.8	110.3	120.5	147.1	173.6
Int [mm] para Tr=50	51.1	73.7	96.4	122.5	133.9	163.4	192.9
Int [mm] para Tr=100	56.1	81.1	106.0	134.7	147.2	179.6	212.0

*Tabla 8: Valores obtenidos por método de las relaciones.*

Tr= 25 años				Tr= 50 años				Tr= 100 años			
dr [mm]	dr [min]	Prec. [mm]	Int. [mm/h]	dr [mm]	dr [min]	Prec. [mm]	Int. [mm/h]	dr [mm]	dr [min]	Prec. [mm]	Int. [mm/h]
0.25	15	46	184	0.25	15	51	204	0.25	15	56	224
0.5	30	66	133	0.5	30	74	147	0.5	30	81	162
1	60	87	87	1	60	96	96	1	60	106	106
2	120	110	55	2	120	123	61	2	120	135	67
3	180	121	40	3	180	134	45	3	180	147	49
6	360	147	25	6	360	163	27	6	360	180	30
12	720	174	14	12	720	193	16	12	720	212	18
24	1440	204	9	24	1440	227	9	24	1440	249	10
48	2880	265	6	48	2880	297	6	48	2880	329	7
72	4320	299	4	72	4320	337	5	72	4320	374	5

Estos valores así obtenidos se ajustaron a la fórmula de Sherman (1931) mediante el programa PSIPlot. Esta ecuación, mediante sus parámetros característicos, permite calcular las intensidades máximas para cualquier periodo de retorno y duración de lluvia.

En la Tabla 9 a continuación se resumen los parámetros la ecuación de Sherman.

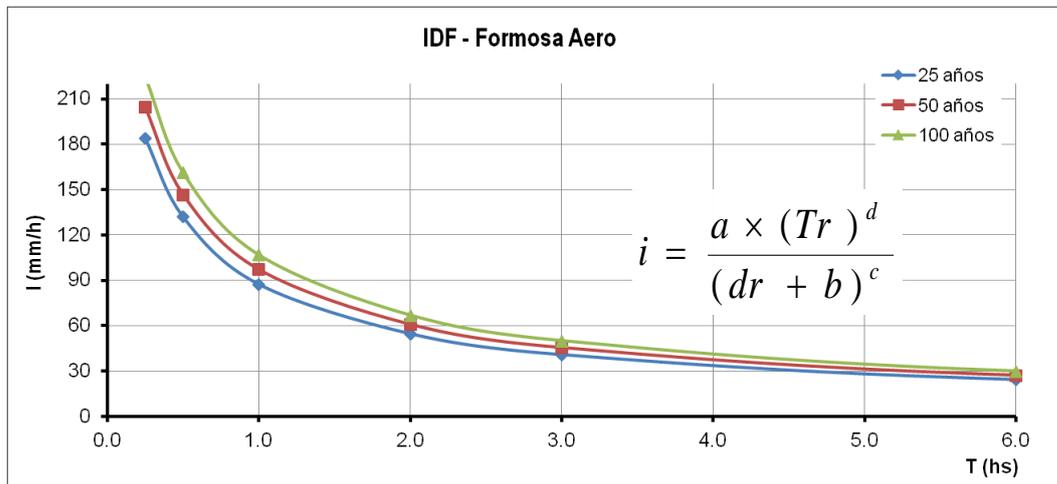
**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Por otra parte, en la figura 13 se grafican las curvas I-D-F obtenidas mediante dicha ecuación.

*Tabla 9: Parámetros de Sherman*

PARÁMETRO	Tr=25 años	Tr=50 años	Tr=100 años
<b>a</b>	1170.33	1093.51	1015.50
<b>b</b>	13.39	13.36	13.33
<b>c</b>	0.78	0.78	0.78
<b>d</b>	0.24	0.24	0.24



*Figura 13: Curvas I-D-F*

Con las curvas arriba definidas se obtuvo el hietograma de diseño, que permitió calcular el caudal para la verificación del puente.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

**2.5 Determinación del hietograma de diseño**

Se consideró una recurrencia de 25, 50 y 100 años, con un paso de tiempo de cálculo de 2 horas.

Para el cálculo de la intensidad de lluvia para el paso de tiempo dado se aplicó de la fórmula de Sherman (1931), con los parámetros antes obtenidos.

$$i = \frac{a \times (Tr)^d}{(dr + b)^c}$$

*Ecuación 4: Intensidad de precipitación (Sherman,1931).*

Al multiplicar las intensidades por las duraciones se obtuvieron los valores de lluvia acumulada. Luego haciendo la diferencia resultaron los valores precipitados en cada intervalo.

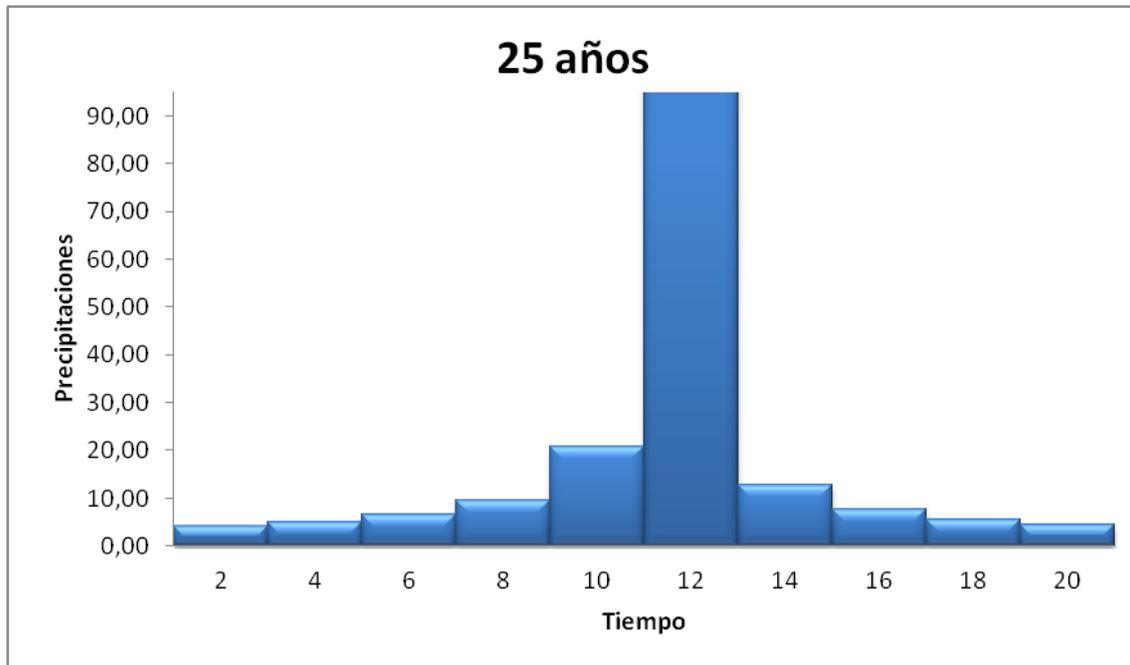
Posteriormente se aplicó el método del bloque alterno para ordenar los valores y brindarle al hietograma la forma característica de un evento de lluvia (ver Tablas 10 a 12 y Figuras de 14 a 16). Es debido a este método que el pico se presenta en la parte media del hidrograma, describiendo el mismo una distribución de tipo normal.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

*Tabla 10: Hietograma de precipitación para  $Tr = 25$  años.*

<b>Tr= 25 años</b>				
TIEMPO [hs]	INTENSIDAD [mm/h]	LLUVIA ACUMULADA [mm]	DIF. LLUVIA [mm]	HJET. DE PREC. [mm]
2	49.82	99.64	99.64	4.14
4	30.13	120.52	20.88	5.03
6	22.24	133.41	12.89	6.51
8	17.87	142.99	9.57	9.57
10	15.07	150.70	7.71	20.88
12	13.10	157.21	6.51	99.64
14	11.63	162.87	5.66	12.89
16	10.49	167.90	5.03	7.71
18	9.58	172.44	4.54	5.66
20	8.83	176.59	4.14	4.54



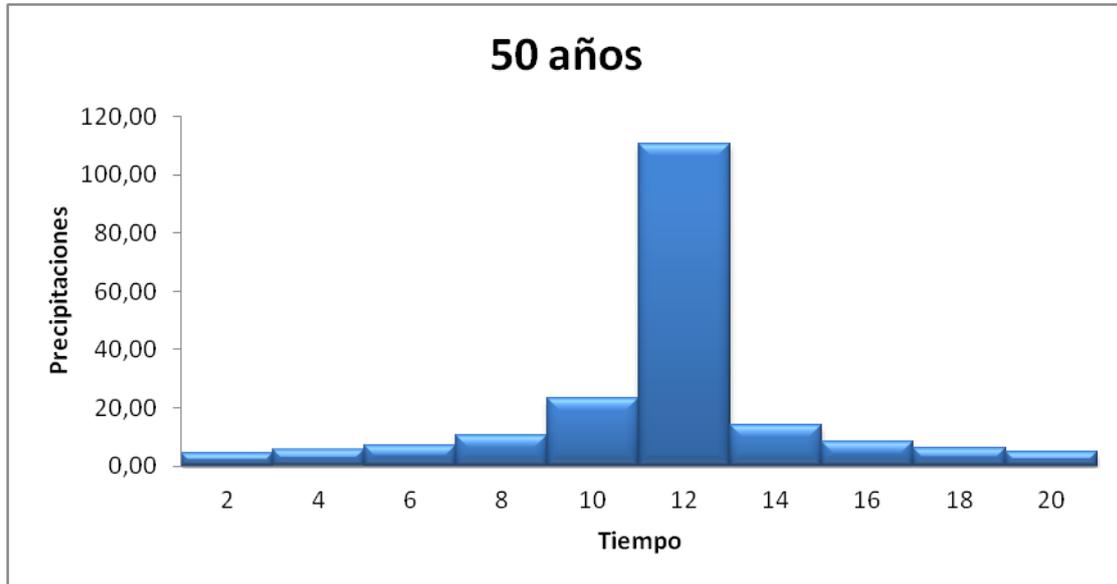
*Figura 14: Hietograma de precipitación para  $Tr = 25$  años.*

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYn – Ingeniería Civil

*Tabla 11: Hietograma de precipitación para Tr = 50 años.*

<b>Tr= 50 años</b>				
TIEMPO [hs]	INTENSIDAD [mm/h]	LLUVIA ACUMULADA [mm]	DIF. LLUVIA [mm]	HIET. DE PREC. [mm]
2	55.36	110.71	110.71	4.62
4	33.49	133.95	23.24	5.61
6	24.72	148.30	14.35	7.25
8	19.87	158.96	10.66	10.66
10	16.76	167.55	8.59	23.24
12	14.57	174.80	7.25	110.71
14	12.94	181.11	6.31	14.35
16	11.67	186.72	5.61	8.59
18	10.65	191.78	5.06	6.31
20	9.82	196.40	4.62	5.06



*Figura 15: Hietograma de precipitación para Tr = 50 años.*

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYn – Ingeniería Civil

Tabla 12: Hietograma de precipitación para  $Tr = 100$  años.

<b>Tr= 100 años</b>				
TIEMPO [hs]	INTENSIDAD [mm/h]	LLUVIA ACUMULADA [mm]	DIF. LLUVIA [mm]	HJET. DE PREC. [mm]
2	60.86	121.72	121.72	5.09
4	36.82	147.29	25.57	6.18
6	27.18	163.09	15.80	7.99
8	21.85	174.83	11.74	11.74
10	18.43	184.29	9.46	25.57
12	16.02	192.28	7.99	121.72
14	14.23	199.24	6.95	15.80
16	12.84	205.41	6.18	9.46
18	11.72	210.99	5.57	6.95
20	10.80	216.08	5.09	5.57

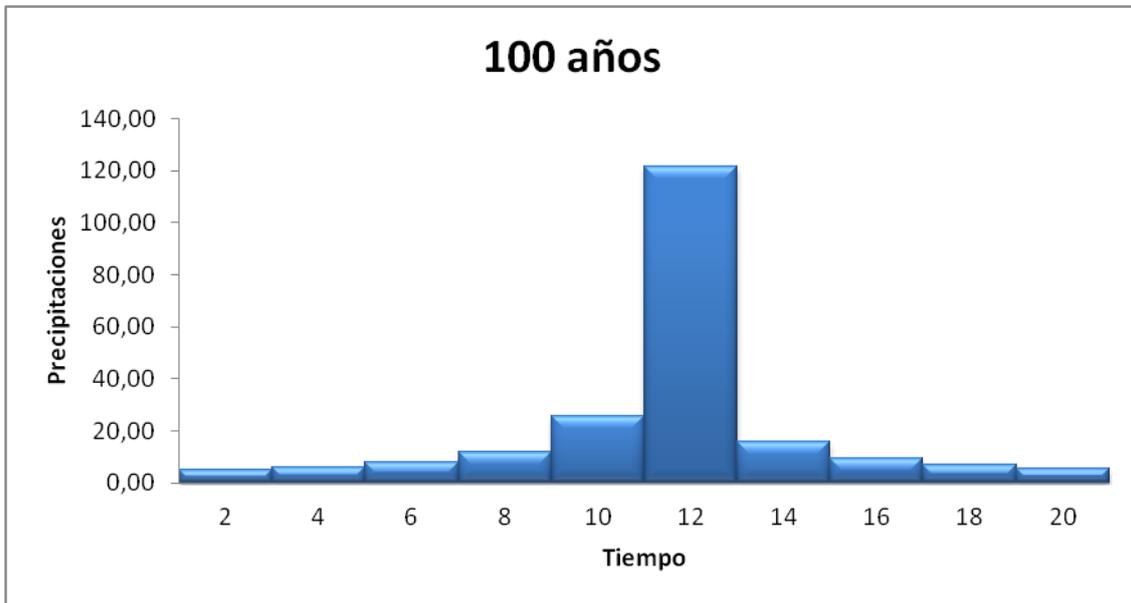


Figura 16: Hietograma de precipitación para  $Tr = 100$  años.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

### 2.6 Determinación del caudal de diseño.

Determinados los parámetros de la cuenca y definidas las tormentas de diseño, se calcularon los caudales mediante la aplicación del software de modelado numérico HEC-HMS.

#### 2.6.1 Modelo computacional HEC-HMS

El modelo HEC-HMS, de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) surgió como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-1, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso y la posibilidad, mediante HEC GeoHMS, de conectar con el sistema de información geográfica ArcGIS. La aplicación incluye un modelo precipitación - escorrentía para la estimación de avenidas.

El modelo numérico incluido en este programa permite realizar la transformación lluvia-caudal.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Cálculo hidrológico de crecidas. Leyes de frecuencia.
- Visualización gráfica de datos y resultados.
- Ejecutable en entorno Microsoft Windows.

Aplicaciones: Cálculo hidrometeorológico de crecidas.

Mediante este software se introdujeron los datos de la cuenca y de la lluvia, y se determinó el caudal pico de la crecida. Para ello se utilizó como función de producción la desarrollada por el Soil Conservation Service (S.C.S.) de EE.UU., que relaciona la lluvia efectiva acumulada ( $P_e$ ) con lluvia bruta acumulada ( $P_b$ ) mediante la ecuación:

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S}$$

*Ecuación 5*

Donde “ $I_a$ ” designa las pérdidas que se producen al inicio del evento y “ $S$ ” la capacidad de almacenamiento del suelo (infiltración acumulada).

Este modelo representa la evolución del coeficiente de escurrimiento superficial, desde 0 cuando el cúmulo de lluvia bruta es inferior a “ $I_a$ ”, hasta 1 cuando el cúmulo de lluvia bruta tiende a infinito.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

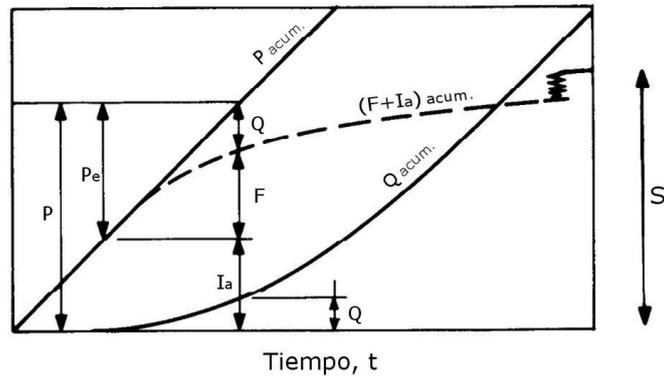


Figura 17: Precipitaciones y volúmenes acumulados en una tormenta de intensidad constante (Maidment D., 1993).

Los parámetros de ajuste del modelo son  $I_a$  y  $S$ , cuyos valores generalmente se relacionan mediante la ecuación:

$$I_a = 0.2 * S$$

Ecuación 6

$S$  puede también relacionarse con el Curve Number del S.C.S. mediante la ecuación:

$$S = 2.57 * \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Ecuación 7

En la Fig. 18 a continuación, se muestra el modelo confeccionado para la obtención del hidrograma de 25, 50 y 100 años, en la sección del puente:

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

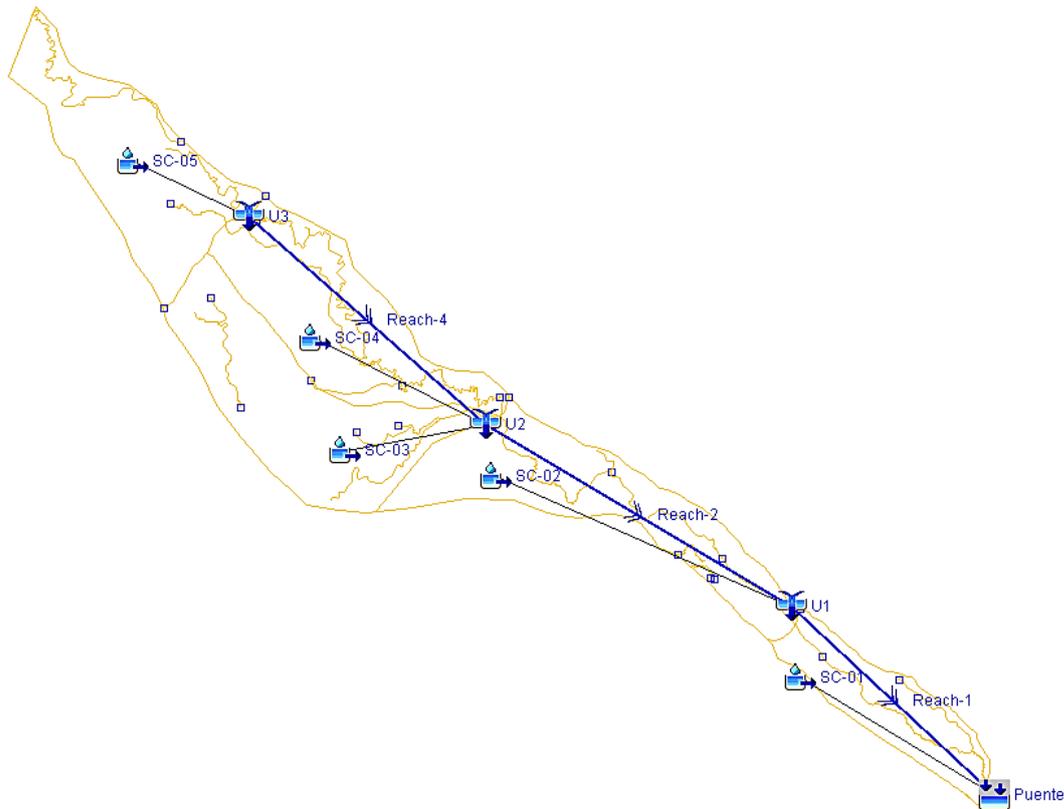


Figura 18: Modelo correspondiente al sistema del Riacho Cortapick (HEC-HMS).

### 2.6.2 Modelo de transferencia tipo Hidrograma Unitario de Clark

El hidrograma unitario de Clark es un método sintético que considera el tránsito a través de la cuenca en base a la generación de curvas isócronas. Las curvas isócronas son curvas que unen los puntos de la cuenca que tienen igual tiempo de desagüe (Figura 19a). Este método supone que la cuenca funciona como un depósito, y un aumento del caudal de entrada se refleja en el caudal de salida amortiguado y retardado.

Para construir el hidrograma unitario, a partir de las curvas isócronas trazadas cada un cierto intervalo de tiempo (por ej., 1 hora) se dibuja un histograma área-tiempo (Figura 19b). Si se aplica una lluvia efectiva instantánea de 1 cm uniforme en toda la cuenca, el histograma área-tiempo, multiplicado por 1 cm dará el volumen que es desaguado por la cuenca al final de cada intervalo de tiempo para el cual está definido el histograma, y éste será el hidrograma unitario instantáneo de la cuenca.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

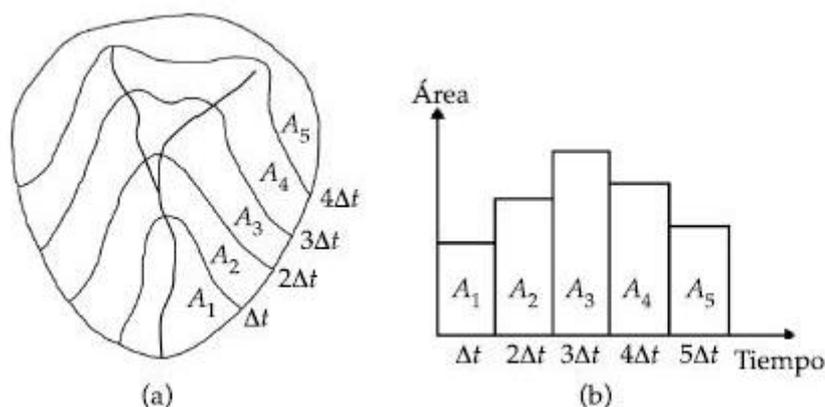


Figura 19: a) Ejemplo de curvas isócronas para una cuenca hidrográfica; b) Ejemplo de histograma tiempo-área (Maidment D., 1993)

Este método necesita un coeficiente de almacenamiento  $Tr$  (en horas) que surge de describir el fundamento del método de hidrograma unitario de Clark y representa el retardo que la cuenca impone a la escorrentía superficial para desplazarse. A los fines del presente informe, se ha considerado que el coeficiente de almacenamiento es directamente proporcional al tiempo de concentración.

En la Tabla 13 a continuación se detallan los parámetros utilizados en el modelo de transformación de Clark.

Tabla 13: Parámetro utilizados en el modelo de Clark.

SUBCUENCA	ÁREA	LONG	LONG	PENDIENTE	CN	Tc	Tr
	[Km <sup>2</sup> ]	[Km]	[m]	[m/m]	[m]	DOOGE [hs]	COEF. DE ALM. [hs]
SC-01	166.0	36.80	36800.0	0.00016	73.84	13.06	19.59
SC-02	314.0	53.00	53000.0	0.00021	74.72	16.28	24.42
SC-03	353.0	56.00	56000.0	0.00018	73.65	17.53	26.29
SC-04	315.0	61.00	61000.0	0.00011	71.98	18.03	27.05
SC-05	308.0	55.00	55000.0	0.00011	73.00	18.02	27.03
<b>ÁREA TOTAL:</b>	<b>1456.0</b>						

Para conocer cómo evoluciona el hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce se empleó el tránsito de hidrograma. Éste consiste básicamente en lo siguiente:

Supongamos que en el extremo de un canal seco arrojamamos un volumen de agua (Fig. 20). El pequeño hidrograma generado será inicialmente más alto y de menor duración (posición A de la Fig. 20) y, a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los puntos B y C con un hidrograma cada vez más aplanado. Dado que suponemos que no existe pérdida de volumen por infiltración o evaporación, el área comprendida bajo los tres hidrogramas es idéntica.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

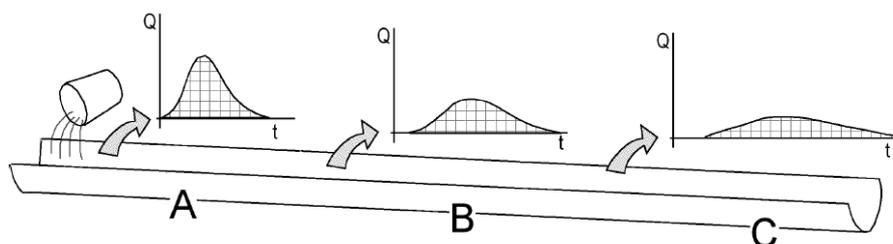


Figura 20: Esquema tránsito de hidrogramas (<http://www.ingenieroambiental.com/>)

Calcular el tránsito de un hidrograma es obtener el hidrograma en el punto C a partir del hidrograma en el punto A.

En el presente trabajo se empleó el método de Muskingum-Cunge para determinar el tránsito de hidrograma. Este método hidráulico emplea, además de las ecuaciones de continuidad, parámetros hidráulicos del cauce, expuestos en las Ec. 8 y 9.

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

Ecuación 8

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right)$$

Ecuación 9

Donde  $\Delta x$  es la longitud del tramo del cauce considerado;  $c$  es la velocidad media;  $S_0$  es la pendiente media del cauce;  $Q$  es el caudal y  $B$  es el ancho del cauce.

Empleando el software computacional HEC-HMS se obtuvieron los caudales y los correspondientes hidrogramas para recurrencias de 25, 50 y 100 años.

El caudal pico obtenido para **TR = 25 años** es de **342.30 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 21

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

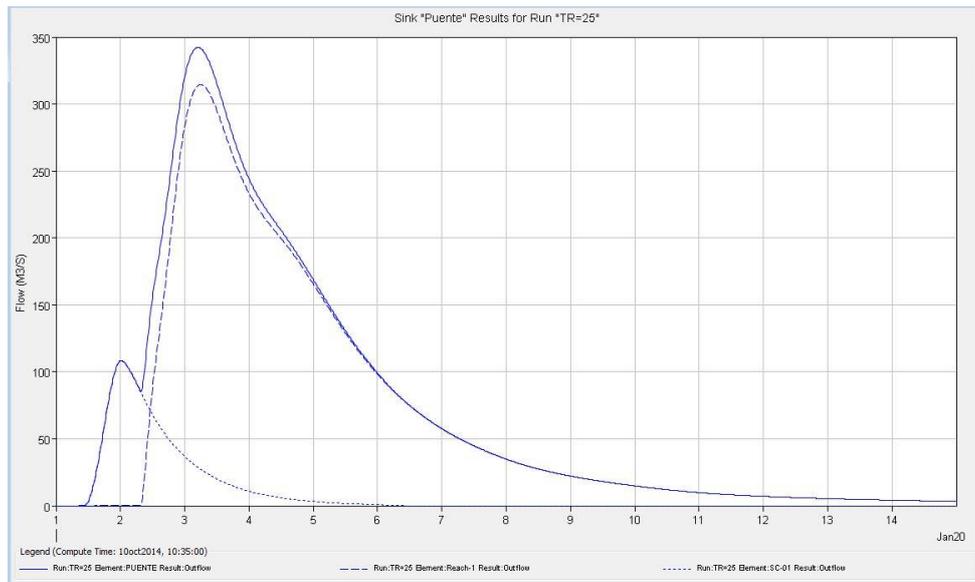


Figura 21: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para TR = 25 años (HEC-HMS).

Por otra parte, el caudal pico obtenido para **TR = 50 años** es de **428.8 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 22.

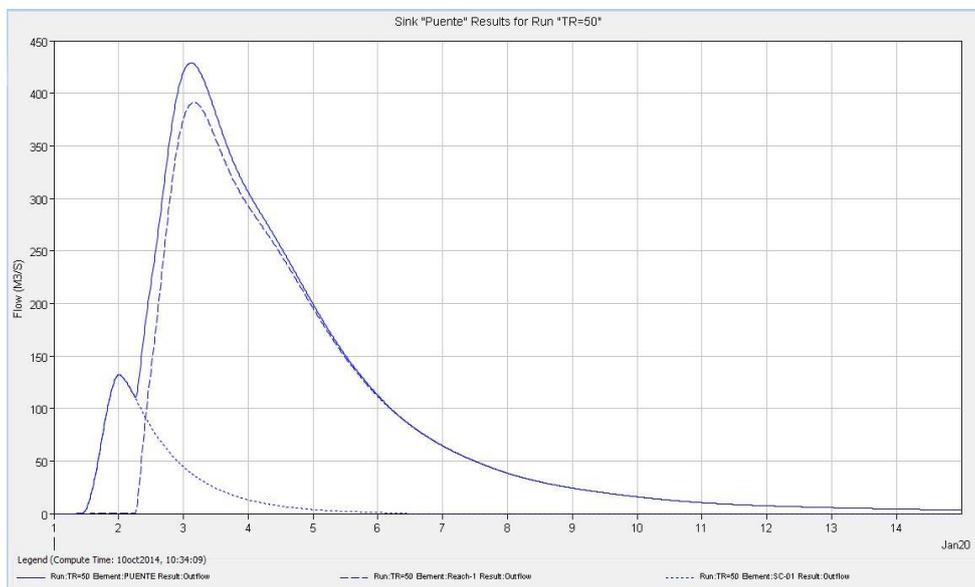


Figura 22: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para TR = 50 años (HEC-HMS).

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Y por último, el caudal pico obtenido para **TR = 100 años** es de **519.5 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 23.

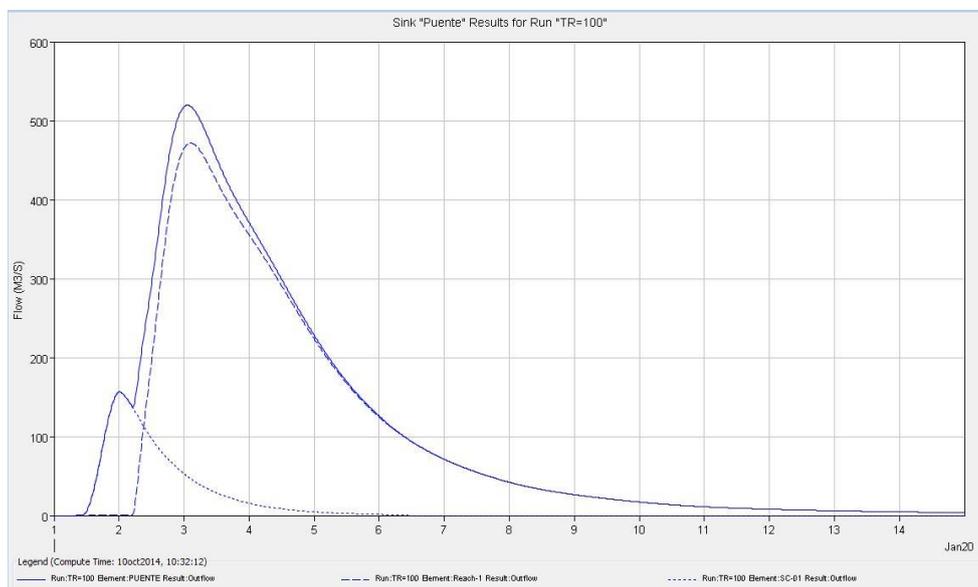


Figura 23: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para TR = 100 años (HEC-HMS)

Puede observarse que el caudal pico en los hidrogramas presentados en las Fig. 21 a 23, se presenta entre las 00:00 hs y las 04:00 hs del tercer día de lluvia; es decir, entre las 48 hs y las 52 hs de iniciada la misma, desplazándose el pico hacia la izquierda a medida que el tiempo de recurrencia es mayor.

Cabe destacar que en la modelación para la transformación lluvia-caudal no se ha tenido en cuenta el flujo base, tal como puede verse en las Fig. 21 a 23. Esto significa que se ha considerado que toda el agua precipitada ha llegado al punto de aforo (que en nuestro caso es el puente sobre el riacho Cortapick) sin infiltrarse, poniéndonos del lado de la seguridad.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

### 3 HIDRÁULICA

#### 3.1 Factores hidráulicos en el diseño de puentes

A continuación se describen los lineamientos seguidos en la realización del modelo hidráulico del puente ubicado sobre el riacho en estudio con el objetivo de poder definir sus dimensiones y establecer cotas seguras para la fundación.

La construcción del modelo matemático se ha basado en relevamientos topográficos, geotécnicos y cálculos hidrológicos, realizados en el apartado anterior, para la obtención de los caudales de diseño. Este modelo permite reproducir las variables existentes, con y sin la presencia del puente, permitiendo conocer en cada una de las corridas, variables hidráulicas tales como profundidades, velocidades de flujo y números de Froude en cada una de las secciones transversales a lo largo del curso.

Previamente se realizó un análisis morfológico del riacho de modo tal que permita una correcta clasificación de éste. La clasificación del curso provee las bases desde donde puede predecirse su comportamiento, desarrollar relaciones empíricas para tipos de corrientes individuales, extrapolar datos de otros ríos, anticipar consecuencias futuras de la evaluación de distintas alternativas y establecer estrategias para su manejo.

Actualmente existen diferentes esquemas de clasificación de corrientes. La clasificación de Leopold y Wolman (1957), basadas en el patrón de alineamiento del cauce; la clasificación de Brice y Bloguett (1978) orientada a la estabilidad lateral de las corrientes; la clasificación de Rosgen y Silvey (1998), la cual se basa fundamentalmente en la forma del cauce, en el nivel de encajonamiento, tipo de sustrato y pendiente, solo representan algunas de ellas.

Para el presente proyecto, se ha aplicado el sistema de clasificación fluvial de Rosgen para definir las propiedades fluvio-morfológicas del riacho en estudio. Este sistema está basado en observaciones realizadas a centenas de ríos de variados tamaños distribuidos en diferentes regiones climáticas de América del Norte y Nueva Zelanda.

La clasificación de canales fluviales desarrollada por Rosgen (1994) incluye cuatro niveles de detalle: caracterización morfológica básica (nivel I), descripción morfológica (nivel II), levantamiento de las condiciones de estabilidad del río (nivel III) y verificación (nivel IV). En este trabajo serán presentados los resultados de la aplicación del nivel I.

En el nivel I son diferenciados nueve tipos de canales con la aplicación secuencial de cinco parámetros: número de canales, relación de excavación (RE), relación ancho/profundidad, índice de sinuosidad y declividad del flujo. Número de canales: los ríos con un único canal pertenecen a los tipos Aa+, A, B, C, E, F y G, en cuanto que los ríos multicanales corresponden a los grupos D y DA.

En las Fig. 24 y 25 presentadas a continuación se muestra esta metodología propuesta por Rosgen y Silvey (1998). Gracias a éstas, teniendo en cuenta los clasificadores estandarizados, pudo afirmarse que el cauce de estudio se encuadra en la tipología "E": ríos con pendientes suaves, que discurren sobre depósitos de materiales finos, y que desarrollan un patrón de alineamiento planimétrico de tipo meandriforme.

Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

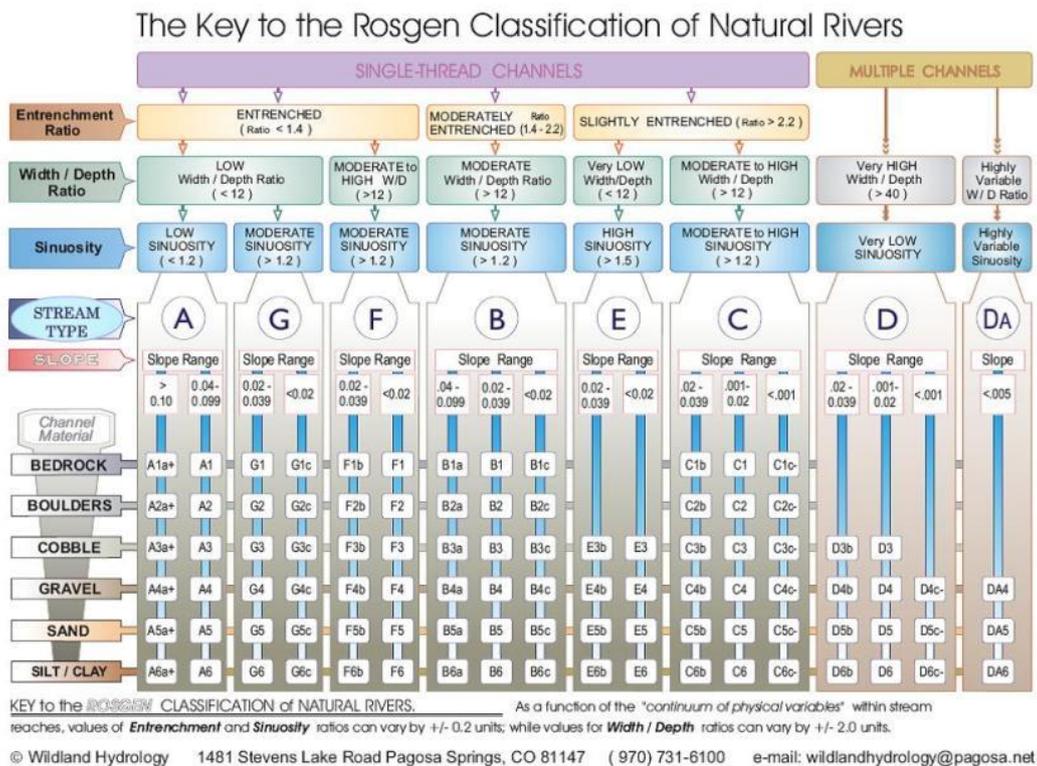


Figura 24: Sistema de clasificación de para ríos naturales (Rosgen y Silvey, 1998).

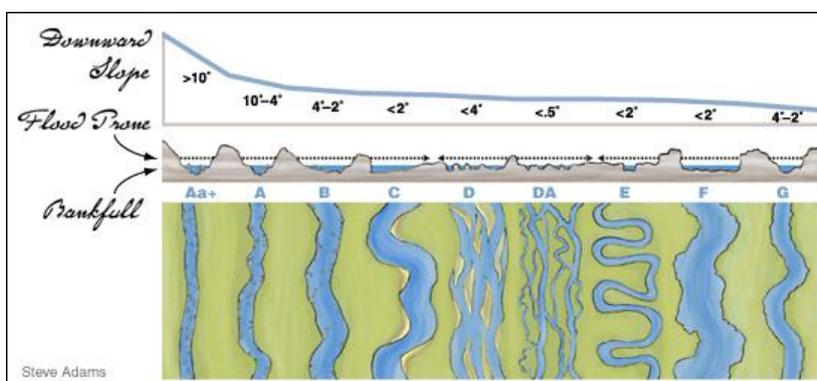


Figura 25: Forma de los Ríos (Rosgen y Silvey, 1998).

La Fig. 26 a continuación corresponde a una imagen satelital de la zona de implantación del puente en estudio, donde se ha resaltado el cauce principal, la traza de la Ruta Nacional N° 11 y la ubicación del puente existente.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

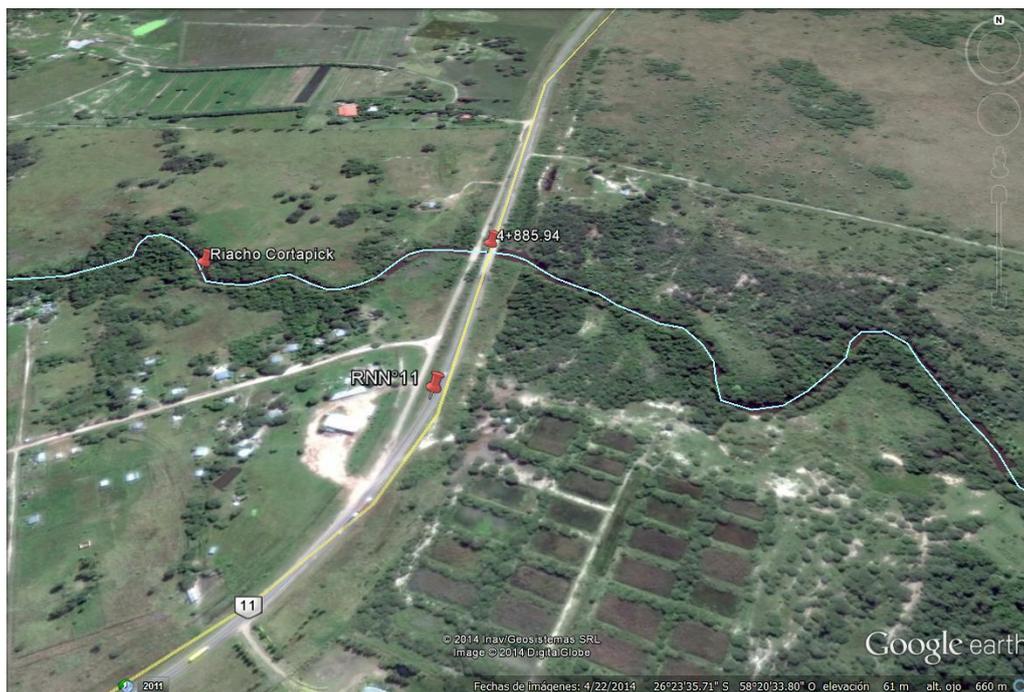


Figura 26: Zona de implantación del puente sobre la Ruta Nacional N° 11.

La modelación hidráulica de los distintos escenarios para el análisis de los flujos conducidos ha sido realizada mediante la aplicación del software HEC-RAS (River Analysis System) de uso muy difundido en nuestro medio y cuya introducción fue dada durante el cursado de la carrera.

### 3.2 Modelo computacional HEC-RAS

El software HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center, 1998) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (U. S. Army Corps of Engineers), el cual es una evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste.

El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional (1D) gradualmente variado en cauces naturales de secciones transversales de geometría cualesquiera.

El sistema es capaz de realizar el cálculo del perfil de flujo en régimen estacionario y no estacionario, y también incluye (desde su versión 3.1 en adelante) un módulo elemental para estimar el transporte de sedimentos y realizar varios cálculos de diseño hidráulico.

Como cualquier software de aplicación, HEC-RAS posee ciertas limitaciones que es necesario conocer para no cometer el error de esperar resultados que el software no sea capaz de proporcionar.

Las hipótesis implícitas en las ecuaciones empleadas por el programa son las siguientes:

- El flujo es permanente

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

- El flujo es gradualmente variado, excepto en algunas estructuras hidráulicas donde se emplea la ecuación de cantidad de movimiento o ecuaciones empíricas de flujo rápidamente variado.
- El flujo es unidimensional
- Las pendientes son inferiores a 10%.

Adicionalmente a lo señalado, debe recalcar que los modelos habitualmente utilizados para el cálculo de erosiones no contemplan la incidencia de la estratigrafía sobre los resultados totales obtenidos. El material del cauce es considerado únicamente a través de su parámetro característico D50, por lo que indirectamente supone la uniformidad de ese parámetro característico en toda la profundidad de perfil erosionada.

Además, una de las limitaciones más importantes resulta de la imposibilidad de analizar fondos móviles (por ejemplo, transporte de sedimentos) y que necesita que las pérdidas de carga se definan en los términos contenidos en la ecuación de energía. Por ello, se optó por calcular los parámetros hidráulicos con HEC-RAS y luego usar este producto como “input” para aplicar otro procedimiento semi-empírico alternativo para evaluar las características de contornos móviles imperantes en los ríos naturales.

El cálculo del perfil hidráulico se realiza de una sección a otra mediante el empleo de la ecuación de la energía a través del método iterativo conocido como el Método Estándar por Etapas. Este es un método que desarrolla los cálculos para cada sección comenzando por una conocida (la sección de control por ejemplo). De esta manera se determina, por aproximaciones sucesivas, la profundidad que debe tener el agua en una abscisa determinada para que se satisfagan las relaciones de disipación de energía.

La ecuación de la energía puede escribirse:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

*Ecuación 10*

donde  $y_1$  e  $y_2$  son las profundidades del agua en las secciones transversales 1 y 2 respectivamente;  $z_1$  y  $z_2$  son las elevaciones del canal principal en las secciones 1 y 2;  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades promedio en las secciones 1 y 2 (e iguales a Caudal/Área);  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los coeficientes de Coriolis;  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $h_e$  es la pérdida de carga.

En la Fig. 27 se grafican los términos de la Ec. 10.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

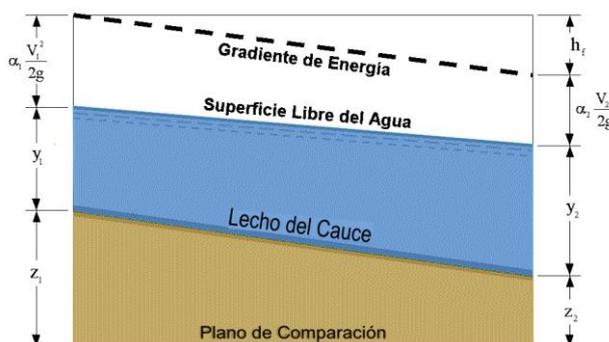


Figura 27: Flujo variado (Chow, V. T. 1982).

Para cargar la geometría del modelo, se utilizaron puntos georeferenciados pertenecientes a un conjunto de secciones transversales del cauce, tanto aguas arriba como aguas abajo de la sección de cruce, obtenidos del relevamiento topográfico en campaña.

Considerando los aspectos de resistencia al flujo y teniendo en cuenta las singularidades observadas durante los relevamientos de campaña, se adoptaron para los coeficientes de rugosidad de Manning los siguientes valores: para el cauce  $n=0,035$  correspondiente a corrientes menores en planicies limpias y serpenteantes; para la planicie de inundación, en cambio, se adoptó un  $n=0,100$  correspondiente a matorrales medios a densos. Estos valores se obtuvieron tomando de referencia la tabla del coeficiente de rugosidad de Manning, la cual presenta una lista de valores de  $n$  para canales de diferentes clases, mostrando un valor mínimo, uno normal y uno máximo para cada tipo de canal.

### 3.3 Descripción del modelo

Se plantearon dos escenarios con el fin de analizar el comportamiento del cauce para las distintas corridas con tiempos de recurrencia de 50 y 100 años. Estos escenarios son presentados en la Tabla 14.

Tabla 14: Escenarios modelados

	PRESENCIA DEL PUENTE VIEJO	PRESENCIA DEL PUENTE EXISTENTE EN USO	PRESENCIA DEL PUENTE PROYECTADO	OBSERVACIONES
ESCENARIO 1	Sí	Sí	No	Describe la situación actual
ESCENARIO 2	No	Sí	Sí	Describe la situación proyectada

### 3.4 Estrategias de modelación

En cuanto a las condiciones de borde adoptadas para la modelación, se consideró la hipótesis de flujo uniforme aguas arriba y aguas abajo del segmento simulado, para lo cual (para el cálculo del tirante normal) se aplicó la pendiente regional dominante, la cual ronda el 0,02% en la sección de implantación del puente.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

En la modelación de puentes, HEC-RAS define internamente dos secciones de cálculo, BU (aguas arriba del puente) y BD (aguas abajo del puente), ubicadas tal como se muestra en las Fig. 28 y 29.

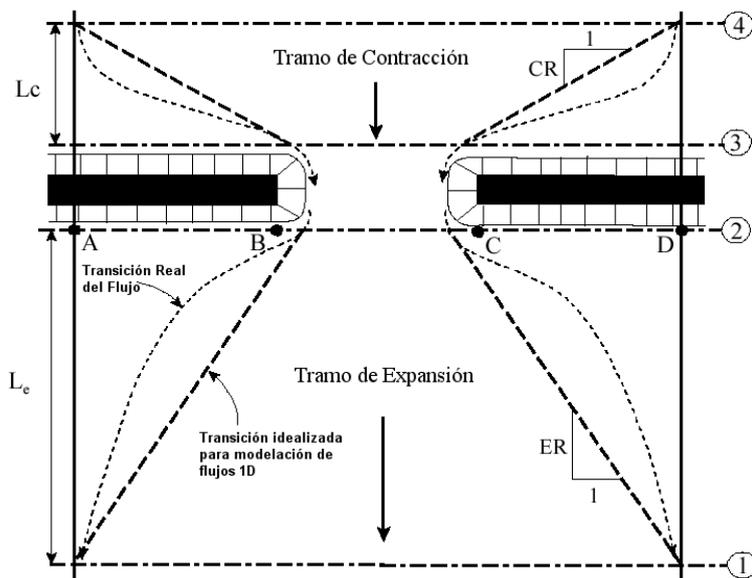


Figura 28: Esquema de definición de las secciones transversales (HEC-RAS)

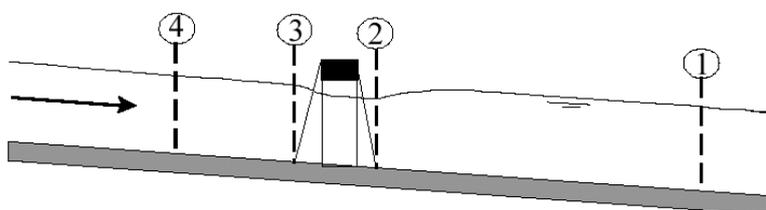


Figura 29: Esquema de ubicación longitudinal de las secciones (HEC-RAS)

Una vez generado el modelo en el software HEC-RAS se realizó una primera corrida sin puente con el fin de determinar las características del flujo en la sección de emplazamiento, y estabilizar el modelo. Luego, observando que las características fueron las esperadas, se ingresaron los datos de los puentes correspondientes a cada escenario.

Se efectuó una corrida para cada escenario. En cada una de ellas se calculó el nivel máximo del flujo asociado al caudal con la recurrencia dada, en la sección situada aguas arriba del puente en la cual se produce el máximo efecto de remanso (curva «M1» en este caso).

La primera corrida representa la situación actual, con el puente viejo y el puente existente en uso. La Fig. 30 muestra una imagen satelital actualizada extraída del programa Google Earth.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEFyN – Ingeniería Civil

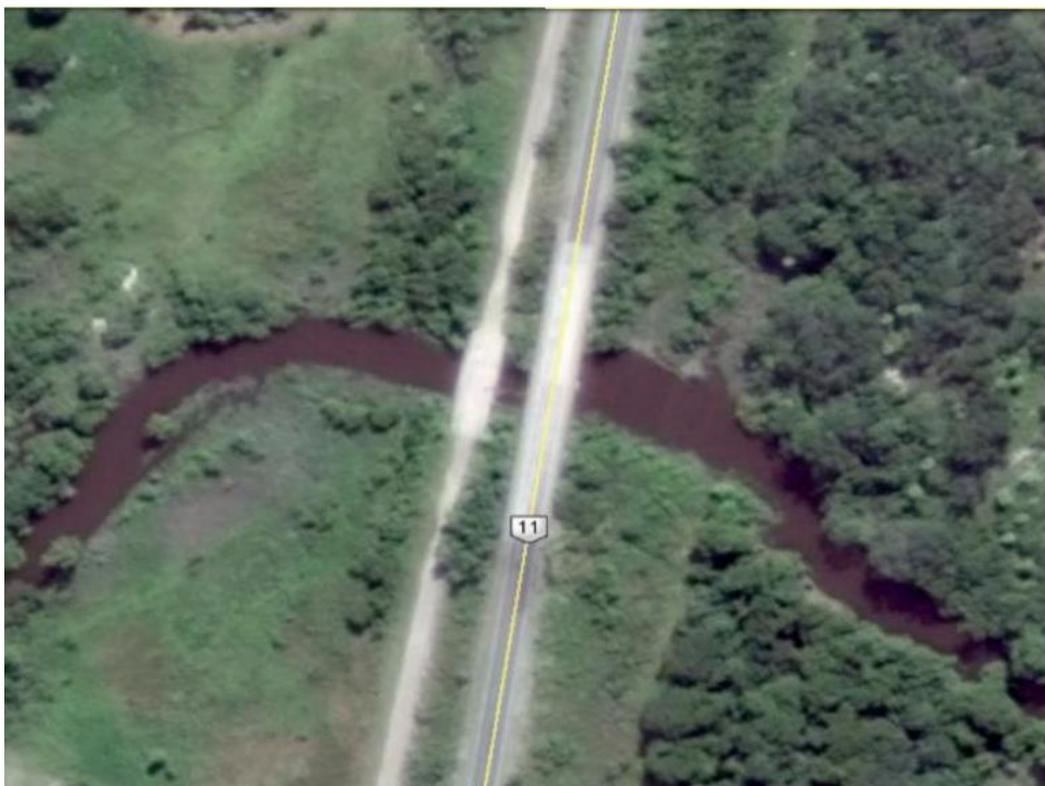


Figura 30: Imagen satelital de la situación actual (Escenario 1): Puente viejo y Puente existente en uso (Google Earth)

A continuación, en la Tabla 15, se muestran los valores de la cota de pelo de agua, aguas arriba del puente existente en uso, para tiempos de recurrencia de 50 años y 100 años. De la misma puede deducirse que, para un incremento del caudal de  $90,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene un aumento de 17 cm en la cota de pelo de agua.

Tabla 15: Cota de Máxima Crecida en el puente existente en uso para el Escenario 1.

	CAUDAL	COTA DE MÁXIMA CRECIDA
	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	[msnm]
Tr= 50 años	428,8	57,94
Tr= 100 años	519,5	58,11

En las Fig. 31 y 32 se exponen los resultados de la modelación en una sección transversal y una sección longitudinal, respectivamente, en un tramo del riacho de la zona del puente existente en uso, outputs del software HEC-RAS.

Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYn – Ingeniería Civil

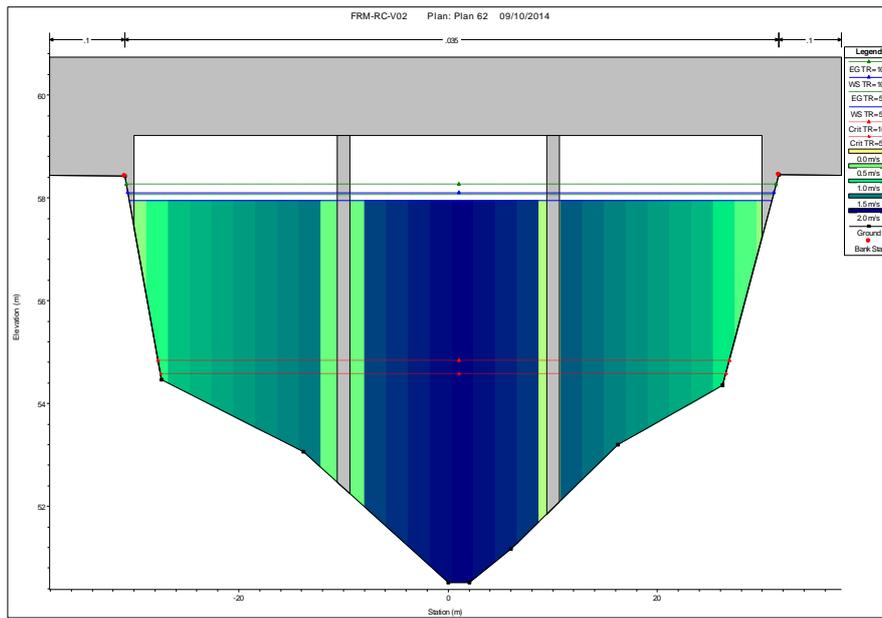


Figura 31: Sección transversal y ubicación del Puente existente en uso para el Escenario 1 (HEC-RAS)

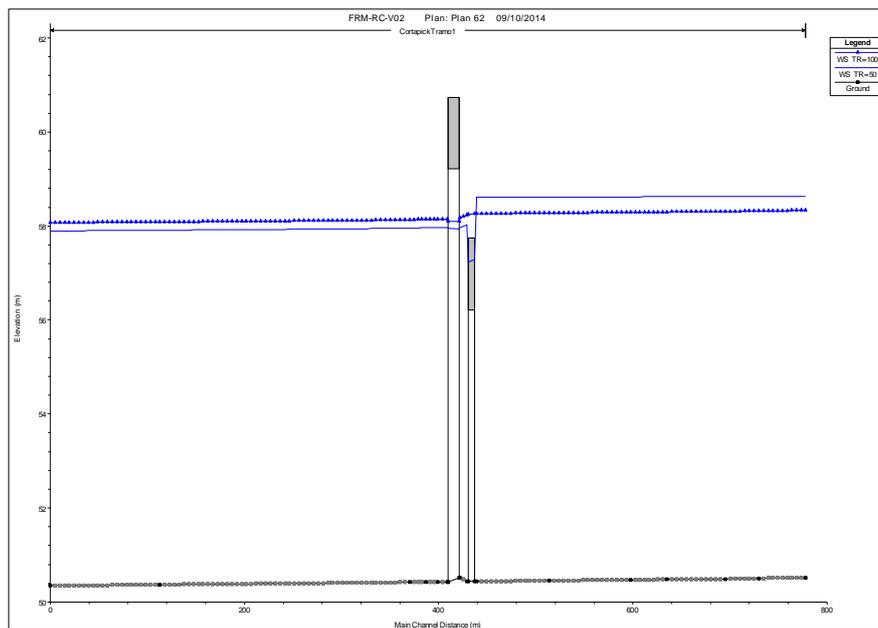


Figura 32: Sección longitudinal y ubicación del puente existente en uso y el puente viejo para el Escenario 1 (HEC-RAS)

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

La segunda corrida representa la situación proyectada, que corresponde al puente existente en uso y el puente proyectado. La Fig. 33 muestra una imagen satelital con un boceto del proyecto.

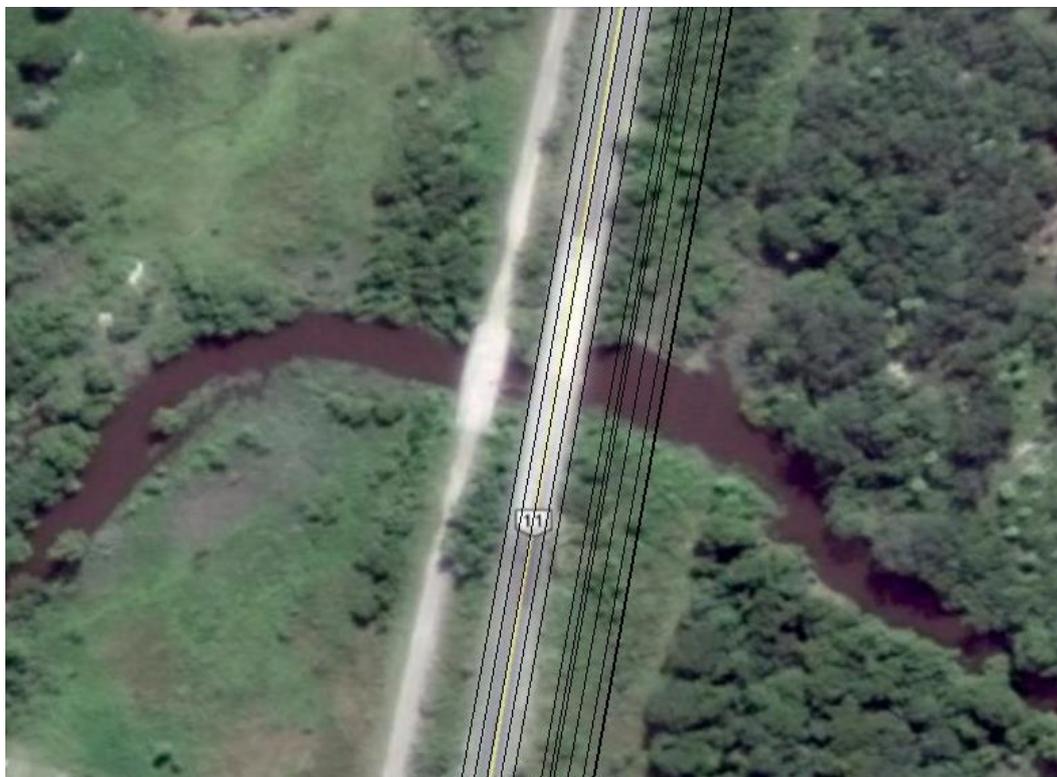


Figura 33: Imagen satelital con boceto de la situación proyectada (Escenario 2): puente existente en uso y puente proyectado.

En la Tabla 16 se muestran los valores de la cota de pelo de agua, aguas arriba del puente existente en uso, para tiempos de recurrencia de 50 años y 100 años. En la misma puede destacarse que, tal como era de esperarse, la variación de la cota de pelo de agua para los distintos tiempos de recurrencia se mantiene. Por otra parte, puede observarse un incremento de la misma en 2 cm, tanto para un  $Tr=50$  años como para un  $Tr=100$  años, respecto a la primera corrida, es decir, sin el puente proyectado. Esto se debe a que la presencia de este nuevo puente aguas abajo del existente en uso y con las mismas dimensiones que éste, significa una obstrucción más relevante al paso del agua.

Tabla 16: Cota de Máxima Crecida en el puente existente en uso para el Escenario 2.

	CAUDAL [m <sup>3</sup> /s]	COTA DE MÁXIMA CRECIDA [msnm]
Tr= 50 años	428,8	57,96
Tr= 100 años	519,5	58,13

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Por otra parte, los valores de la cota de pelo de agua en el puente proyectado son expuestos en la Tabla 17, tanto para un tiempo de recurrencia de 50 años como de 100 años. Los resultados obtenidos en esta modelación para un  $Tr=100$  años fueron tomados como referencia para determinar la Cota de Fondo de Viga del puente proyectado, aplicándole la revancha correspondiente.

Tabla 17: Cota de Máxima Crecida en el puente proyectado para el Escenario 2.

	CAUDAL	COTA DE MÁXIMA CRECIDA
	[m3/s]	[msnm]
Tr= 50 años	428,8	57.95
Tr= 100 años	519,5	58.11

A continuación, en las Fig. 34 a 36 se exponen las secciones transversales de cada uno de los puentes del Escenario 2, y una sección longitudinal en un tramo del riacho de la zona del puente proyectado, resultantes de la modelación con el software HEC-RAS.

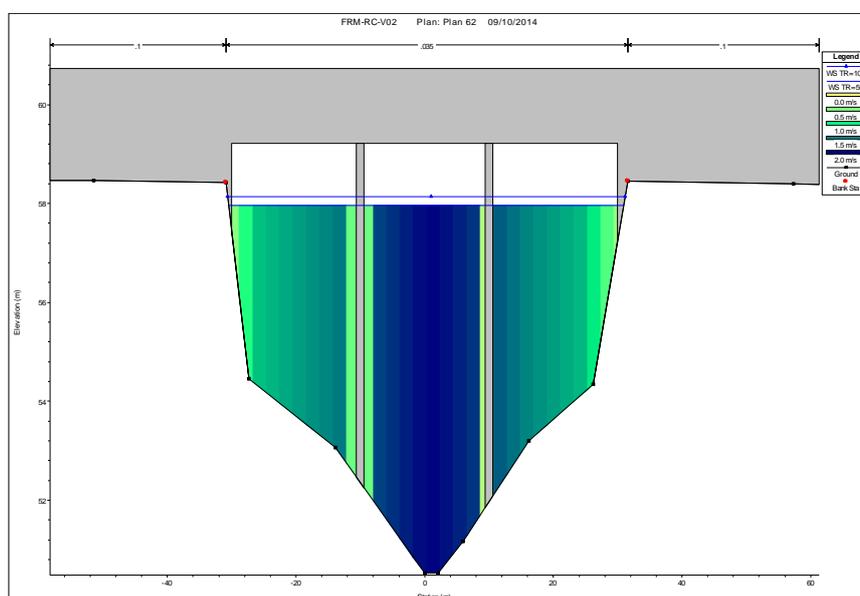


Figura 34: Sección transversal y ubicación del puente existente en uso para el Escenario 2 (HEC-RAS).

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

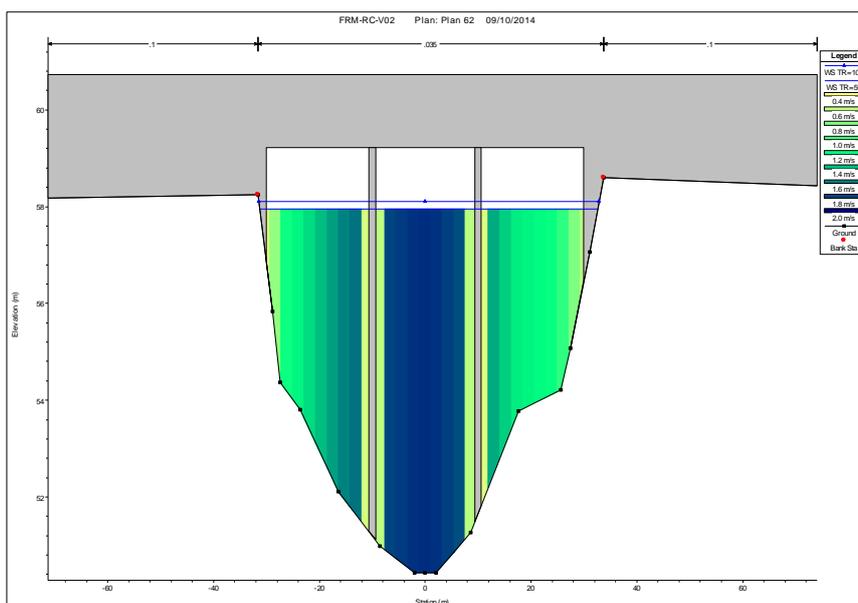


Figura 35: Sección transversal y ubicación del puente proyectado para el Escenario 2 (HEC-RAS).

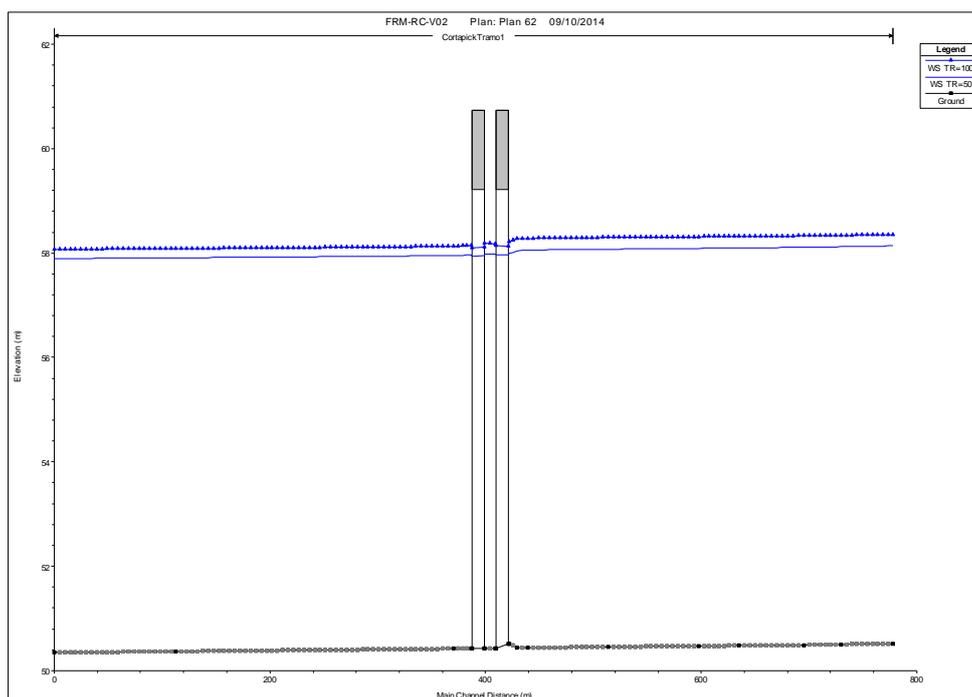


Figura 36: Sección longitudinal y ubicación del Puente existente en uso y del puente proyectado para el Escenario 2 (HEC-RAS)

De la la primera corrida, la cual representa la situación actual (con el puente viejo y el puente existente en uso, tal como lo muestra la Fig. 30) puede deducirse que, para un incremento de

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

caudal de  $90,7 \text{ m}^3/\text{s}$  (entre el caudal correspondiente a un  $\text{Tr}=100$  años y un  $\text{Tr}=50$  años), se tiene un aumento de 17 cm en la cota de pelo de agua aguas arriba del puente existente en uso.

En la Fig. 32 queda en evidencia que para recurrencias de 50 y 100 años, el tablero del puente viejo queda sumergido, motivo por el cual se ha planificado su demolición.

En la segunda corrida la variación de la cota de pelo de agua aguas arriba del puente existente en uso, para los distintos tiempos de recurrencia se mantiene. Puede observarse un incremento de la misma en 2 cm, tanto para un  $\text{Tr}=50$  años como para un  $\text{Tr}=100$  años, respecto a la primera corrida, es decir, sin el puente proyectado. Esto se debe a que la presencia de este nuevo puente aguas abajo del existente en uso y con las mismas dimensiones que éste, significa una obstrucción al paso del agua.

En el puente proyectado, para esta segunda corrida, la cota de pelo de agua es 0,01 m ó 0,02 m por debajo de la correspondiente al puente existente en uso.

La Cota de Fondo de Viga del puente proyectado se fijó sumando a la Cota de Máxima Crecida del puente proyectado para un  $\text{Tr}=100$  años, una revancha de 1m. Por lo tanto: **C.F.V= 59,11 m.**

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

### 4 ESTIMACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN

Todos los procesos fluviales que llevan involucrados la alteración de las condiciones naturales de un curso de agua, por la implantación de una obra, producen una serie de modificaciones en el escurrimiento. Dichas modificaciones involucran la variación de los niveles del río, los cambios en el perfil de velocidades del río y la generación de corrientes secundarias y torbellinos.

Como consecuencia, cambia la capacidad de transporte de sedimentos por parte de la corriente.

En el caso particular del emplazamiento de un puente en el curso de un río, todos estos procesos tienen lugar y aparecen tres clases de erosión: la erosión generalizada, la erosión por contracción y la localizada.

#### 4.1 Erosión General

La erosión generalizada es aquella producida en un cauce debido al aumento de la capacidad de transporte de material sólido de un curso al incrementarse su caudal. Este fenómeno, que se desarrolla en una escala de tiempo a corto plazo, pone en movimiento partículas del fondo que inicialmente se encontraban en equilibrio debido a un incremento de la tensión de corte sobre el lecho sin necesidad de que exista, para la ocurrencia del proceso, alguna obra en particular.

Los estudios geotécnicos realizados en la zona de implantación del puente, donde se llevaron a cabo 3 sondeos, arrojan como resultado que la magnitud de erosión se encuentra incluida dentro de los primeros 10 metros de terreno.

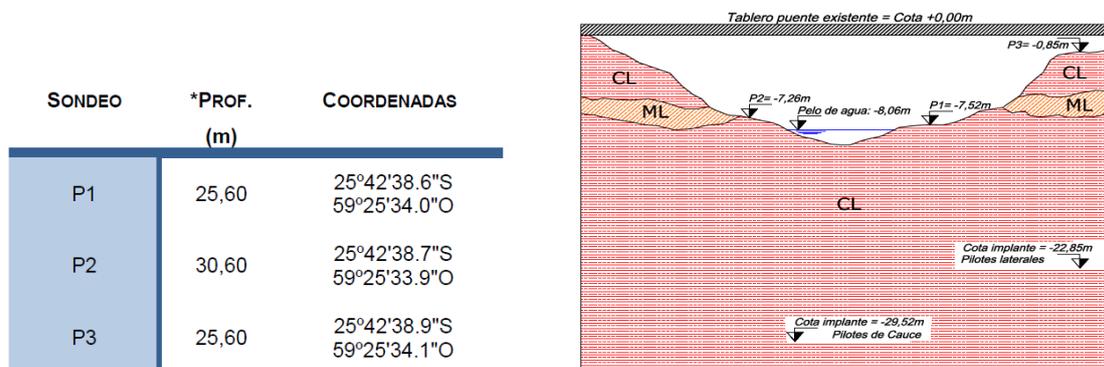


Figura 37: Resultados de estudios geotécnicos en la zona de implantación del puente.

Para las perforaciones 1 y 2, el estrato superior está compuesto por limo arcilloso de baja plasticidad con restos de material orgánico, color marrón claro. Luego encontramos un estrato que alcanza los 30,60 m de profundidad, de arcilla inorgánica de plasticidad media con toscas, color marrón claro grisáceo con manchas oscuras.

Para la perforación 3, encontramos un manto de 4 m de espesor, de arcillas de plasticidad baja con restos de material orgánico en las capas superiores, color marrón claro. Los siguientes 2 m contienen limo inorgánico, color marrón claro. Y finalmente, hasta los 25,6m de profundidad,

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

encontramos arcilla inorgánica de plasticidad media con toscas, color marrón claro grisáceo con manchas oscuras.

Del estudio de suelos se obtuvieron los datos de peso específico húmedo y seco expuestos en la Tabla 18.

*Tabla 18: Peso Específico Húmedo y Seco para los tres sondeos.*

SONDEO 1		
PROFUNDIDAD [m]	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO $\gamma$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	PESO ESPECÍFICO SECO $\gamma_d$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
1	2.13	1.74
2	2.19	1.74
4	2.16	1.81
6	2.19	1.84
8	2.18	1.84
10	2.26	1.93

SONDEO 2		
PROFUNDIDAD [m]	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO $\gamma$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	PESO ESPECÍFICO SECO $\gamma_d$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
1	2.15	1.73
2	2.14	1.78
5	2.13	1.79
7	2.16	1.82
9	2.18	1.84
10	2.21	1.86

SONDEO 3		
PROFUNDIDAD [m]	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO $\gamma$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	PESO ESPECÍFICO SECO $\gamma_d$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
8	2.15	1.73
9	2.19	1.75
11	2.19	1.84
16	2.17	1.82
20	2.22	1.86

Analizando la información suministrada por los estudios geotécnicos, se ha adoptado para la determinación de la erosión general un peso específico seco igual a 1,81 g/cm<sup>3</sup>.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Para la determinación de la profundidad de erosión general se ha aplicado el criterio de Lischvan-Lebediev modificado por Maza para los caudales de diseño obtenidos de los cálculos hidrológicos.

### 4.1.1 Descripción del criterio de Lischvan-Lebediev

El criterio propuesto por Lischvan y Lebediev para la determinación de socavación general, establece que el mecanismo de erosión se detendrá cuando la velocidad del escurrimiento ( $V_r$ ) se reduzca hasta un punto tal en que iguale a la velocidad mínima requerida para mantener un movimiento generalizado del material del fondo ( $V_e$ ). La hipótesis fundamental sobre la cual se basa el método establece que la distribución transversal de caudales de una sección se mantiene invariable durante todo el desarrollo del proceso erosivo.

En este caso fue considerada la formulación para erosión general en cauce definido, para suelos cohesivos con distribución de material de fondo homogénea y rugosidad uniforme. En este método la velocidad erosiva o velocidad media que se requiere para erosionar un determinado material está dado por la expresión:

$$V_e = C \gamma_s^{1.18} \beta h_s^x$$

Ecuación 11

donde  $V_e$ (m/s) es la velocidad máxima admisible sin erosión;  $C$  un coeficiente que en el método original se propuso igual a 0,60 (si el peso específico seco del material  $\gamma_s$  se expresa en  $t/m^3$ ;  $\beta$  (adim) es un coeficiente que depende de la probabilidad de ocurrencia de la crecida (ver Tabla 19);  $h_s$  (m) es el tirante asociado a  $V_e$  hasta donde llegará la erosión y  $x$  (adim) es un coeficiente que depende del peso específico seco, ver Tabla 20.

Tabla 19: Coeficiente  $\beta$ .

Probabilidad anual (en %) de que se presente el caudal de DISEÑO	1% 100 Años	50	20	10	5	2	100% 1 Año	0,3	0,2	0,1
Coeficiente $\beta$	0,77	0,82	0,86	0,90	0,94	0,97	1,00	1,03	1,05	1,07

Tabla 20: Coeficiente  $x$  vs  $\gamma_d$ .

$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$x$	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$x$
0,80	0,52	1,20	0,39
0,83	0,51	1,24	0,38
0,86	0,50	1,28	0,37
0,88	0,49	1,34	0,36
0,90	0,48	1,40	0,35
0,93	0,47	1,46	0,34
0,96	0,46	1,52	0,33
0,98	0,45	1,58	0,32
1,00	0,44	1,64	0,31
1,04	0,43	1,71	0,30
1,08	0,42	1,80	0,29
1,12	0,41	1,89	0,28
1,16	0,40	2,00	0,27

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEyN – Ingeniería Civil

Al aumentar la velocidad del cauce se incrementa la capacidad de arrastre de la corriente, con lo cual el fondo comienza a degradarse y por consecuencia a descender. Esto conduce a un aumento del área hidráulica de la sección transversal del cruce. Simultáneamente, por la ley de continuidad, el aumento del área hace disminuir la velocidad hasta que se llega a una velocidad del cauce ( $V_r$ ) igual a  $V_e$  y cesa la socavación general. De esta forma las hipótesis del método son las siguientes:

- El caudal por unidad de ancho del cauce es constante durante el proceso erosivo.
- El tiempo que dura la creciente es suficientemente grande para equilibrar la velocidad real con la velocidad capaz de arrastrar el material de fondo.

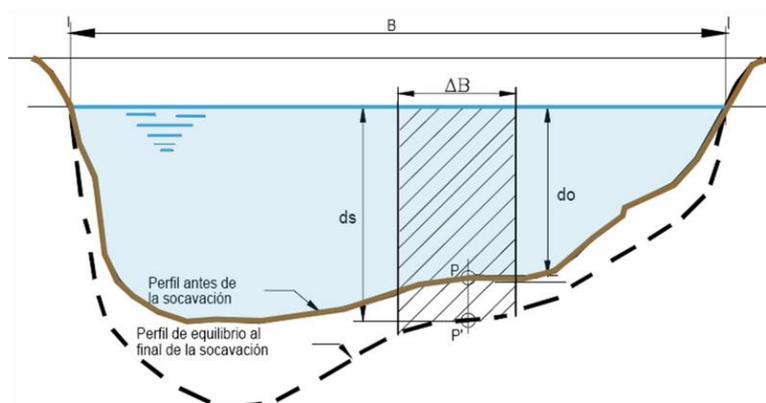


Figura 38: Configuración de la erosión generalizada (Suárez Díaz, 2001).

Considerando la franja de ancho  $b$  y aplicando la ecuación de continuidad,

$$\Delta Q = V_r \times \Delta A = V \times h_0 \times b$$

Ecuación 12

donde  $h_0$  es el tirante original de la sección antes de la erosión y  $V$  es la velocidad del flujo en la franja considerada de ancho  $b$ .

Aplicando para la velocidad la ecuación de Manning y considerando que el tirante y el radio hidráulico son iguales, se tiene la expresión indicada en la Ec. 13.

$$\Delta Q = V_r \times h_0 \times b = \frac{1}{n} \times S^{\frac{1}{2}} \times h_0^{\frac{5}{3}} \times b = h_0^{\frac{5}{3}} \times b \times \alpha$$

Ecuación 13

Donde:

$$\alpha = \frac{1}{n} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 14

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

De igual manera, el caudal de diseño  $Q$ , se puede expresar en función del tirante medio ( $hm$ ) de la sección, tal como queda expresado en la Ec. 15.

$$Q = \alpha \times hm^{\frac{5}{3}} \times B$$

*Ecuación 15*

De la Ec. 15, despejando  $\alpha$  obtenemos la Ec. 16.

$$\alpha = \frac{Q}{hm^{\frac{5}{3}} \times B}$$

*Ecuación 16*

Por otro lado, cuando se presenta la erosión tenemos una expresión similar a la indicada en la Ec. 12, pero que en lugar de presentar al caudal en función del tirante original de la sección antes de la erosión, lo presenta en función del tirante de la sección socavada en la franja considerada ( $hs$ ) tal como puede verse en la Ec. 17.

$$\Delta Q = Vr \times hs \times b$$

*Ecuación 17*

Si además planteamos una analogía con la Ec. 13 y consideramos lo siguiente:

$$\alpha \times h_0^{\frac{5}{3}} \times \Delta B = Vr \times hs \times \Delta B$$

*Ecuación 18*

Tendremos como resultado que el tirante de la sección socavada en la franja considerada, estará dado por la Ec. 19.

$$hs = \frac{\alpha \times h_0^{\frac{5}{3}}}{Vr}$$

*Ecuación 19*

De igual manera, la velocidad media del flujo resulta determinada por la Ec. 20.

$$Vr = \frac{\alpha \times h_0^{\frac{5}{3}}}{hs}$$

*Ecuación 20*

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Asumiendo que la rugosidad es constante en toda la sección transversal, la profundidad de socavación  $h_s$  se determina empleando la Ec. 21, obtenida a partir de la condición de equilibrio  $V_r = V_e$

$$\text{Suelos cohesivos: } H_s = \left[ \frac{\frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot H_0^{\frac{5}{3}}}{0.60 \cdot \gamma_d^{1.18} \cdot \beta} \right]^{\frac{1}{x+1}}$$

Ecuación 21

donde  $V_e$  es la velocidad máxima admisible sin erosión;  $\gamma_d$  es el peso volumétrico del material seco que se encuentra a una profundidad  $h_s$ ;  $\beta$  es un coeficiente que depende del período de retorno de la crecida que se estudia y  $h_s$  es la profundidad de agua.

### 4.1.2 Determinación de la profundidad de socavación generalizada

Para determinar los efectos que la socavación generalizada tiene sobre el cauce en estudio, se emplearon los valores resultantes del software HEC-RAS (usado anteriormente para determinar las cotas de máxima crecida, ver Capítulo IV.II) para una modelación inicial correspondiente a una geometría sin puente. Esto es así porque la erosión general es debida a la corriente fluvial natural del cauce, y considerar la presencia de algún obstáculo (como por ejemplo un puente), condicionaría los resultados.

Del modelo hidráulico HEC-RAS se extrajeron el caudal, el área, el tirante original y la velocidad en el cauce, cuyos valores fueron discretizados en 15 fajas de ancho similar. A estas fajas se les aplicaron las ecuaciones de Listchvan-Lebediev para suelos cohesivos. Los parámetros adoptados y extraídos del estudio de suelo correspondiente a la zona de emplazamiento del puente proyectado fueron los indicados en la Tabla 21.

*Tabla 21: Parámetros utilizados para la determinación de la profundidad de erosión generalizada.*

PARÁMETROS UTILIZADOS	
X	0.289
$\beta_{50}$	0.82
$\gamma_d$	1.81
S	0.0002

Aplicando el criterio de Listchvan-Lebediev se estimaron las socavaciones generales producidas para el caudal resultante de la tormenta de 50 años de recurrencia en una sección del cauce donde se implantará el puente proyectado. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la Tabla 22.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

*Tabla 22: Cálculo de la erosión general aguas arriba para  $T_r=50$  años.*

FAJA	POSICIÓN	BMI [m]	BMD [m]	$\Delta Q$ [m <sup>3</sup> /s]	ÁREA [m <sup>2</sup> ]	TIRANTE ORIGINAL [m]	VELOCIDAD [m/s]	n MANNING	COTA TN	TIRANTE EROSIÓN GENERAL	COTA EROSIÓN GENERAL	PROFUNDIDAD EROSIÓN GENERAL
1	Canal	-34.37	-29.52	9.54	13.66	2.81	0.70	0.035	55.20	1.90	55.20	0.00
2	Canal	-29.52	-24.67	14.14	16.96	3.50	0.83	0.035	54.51	2.52	54.51	0.00
3	Canal	-24.67	-19.81	14.96	17.55	3.62	0.85	0.035	54.39	2.63	54.39	0.00
4	Canal	-19.81	-14.96	15.64	18.02	3.71	0.87	0.035	54.30	2.72	54.30	0.00
5	Canal	-14.96	-10.11	18.36	19.95	4.11	0.92	0.035	53.90	3.10	53.90	0.00
6	Canal	-10.11	-5.26	25.24	24.17	4.98	1.04	0.035	53.03	3.97	53.03	0.00
7	Canal	-5.26	-0.41	33.51	28.82	5.94	1.16	0.035	52.07	4.99	52.07	0.00
8	Canal	-0.41	4.45	46.32	35.02	7.22	1.32	0.035	50.79	6.43	50.79	0.00
9	Canal	4.45	9.30	40.71	32.46	6.69	1.25	0.035	51.32	5.82	51.32	0.00
10	Canal	9.30	14.15	27.27	25.57	5.27	1.07	0.035	52.74	4.28	52.74	0.00
11	Canal	14.15	19.00	18.13	19.82	4.08	0.91	0.035	53.93	3.07	53.93	0.00
12	Canal	19.00	23.85	16.44	18.57	3.83	0.89	0.035	54.18	2.83	54.18	0.00
13	Canal	23.85	28.71	15.33	17.80	3.67	0.86	0.035	54.34	2.68	54.34	0.00
14	Canal	28.71	33.56	14.62	17.30	3.57	0.84	0.035	54.44	2.58	54.44	0.00
15	Canal	33.56	38.41	9.34	13.56	2.79	0.69	0.035	55.22	1.88	55.22	0.00

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Tal como puede observarse en la Tabla 22, las erosiones generales han resultado nulas para la tormenta de diseño con un  $T_r=50$  años. Esto se debe a las bajas velocidades resultantes de la escasa pendiente topográfica del cauce, que caracteriza a toda la región. Las mismas no superan la velocidad límite necesaria para iniciar el movimiento de las partículas.

### 4.2 Erosión por contracción

En cauces fluviales, la presencia de puentes presenta un condicionamiento geométrico al escurrimiento en el río al ocasionar un estrechamiento de la sección mojada, sobre todo en condiciones de crecida. En esta situación, la condición de borde impuesta por la estructura da lugar a la formación de un esquema de flujo complejo que se materializa en un marcado cambio en las zonas del lecho del río afectadas por el campo de velocidades resultante.

Estos cambios morfológicos observados en las cercanías de los puentes durante y tras el pasaje de una crecida, son función de las condiciones geométricas y morfológicas del cauce y del valle de inundación, de la localización en planta y ancho de la obra, y de las características de las pilas y estribos.

Es así que la erosión que puede observarse en la sección de un río, dentro de un tramo recto y en coincidencia con la ubicación de un puente, será la superposición de una componente general, definida como los descensos del lecho en un tramo de río de gran longitud, y una debida a la contracción impuesta por la estructura.

En este caso, como se trata de una duplicación del puente existente 23 m aguas abajo, se efectuaron dos corridas del programa computacional HEC-RAS para el cálculo de las erosiones por contracción, representando cada una de ellas un escenario particular:

- Primer escenario (describe la situación actual): Considerando la presencia del puente viejo y el puente existente en uso.
- Segundo escenario (describe la situación proyectada): Planteando la presencia del puente existente en uso y el puente proyectado.

Con la corrida del primer escenario se buscó determinar los valores de la erosión por contracción que se tienen en la actualidad para luego comparar el comportamiento del puente existente en uso con el correspondiente al puente proyectado, y por otro lado observar la influencia del nuevo puente sobre el puente existente en uso.

#### 4.2.1 Determinación de la profundidad de socavación por Contracción

El cálculo de la socavación por contracción se efectuó siguiendo la circular HEC # 18. Ésta recomienda basar el cálculo de dicha erosión en estudios realizados por Laursen (1963). Las fórmulas de Laursen se clasifican, según el lecho sea móvil o tenga aguas claras. En las Ec. 21 y 22 se exponen las mismas.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

$$y_2 = \left[ \frac{Q_2^2}{C D_m^{2/3} W_2^2} \right]^{3/7}$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

*Ecuación 22: Erosión por contracción en aguas claras (Laursen, 1963).*

$$y_2 = y_1 \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{6/7} \left[ \frac{W_1}{W_2} \right]^{K_1}$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

*Ecuación 23: Erosión por contracción en lechos móviles (Laursen, 1963).*

Donde  $y_s$  es la profundidad promedio de la erosión por contracción;  $y_2$  es la profundidad promedio después de la erosión en la sección contraída;  $y_0$  es la profundidad promedio en el cauce principal o llanura de inundación en la sección contraída;  $W_1$  es el ancho del fondo del cauce principal o llanura de inundación en la sección de aproximación;  $W_2$  es el ancho máximo del área activa de flujo (ancho del fondo del cauce principal o llanura de inundación en la sección contraída menos el ancho de los pilares) y  $D_m$  es el diámetro de la menor partícula no transportable en el material del lecho (1.25xD50), en la sección contraída.

Para cada uno de los escenarios planteados se efectuó el cálculo de la erosión por contracción.

En el primer escenario (considerando la presencia del puente viejo y el puente existente en uso), se determinó el valor de este tipo de erosión en el puente existente en uso. Para ello, se emplearon los datos de salida de la corrida del modelo HEC-RAS para este escenario, para un periodo de recurrencia de 50 años. El ancho del cauce en la sección contraída fue dividido en 30 fajas de idéntico ancho, donde se definieron caudal, área y tirante medio. Con el cálculo de la velocidad crítica, comparándola con la velocidad en cada faja, se determinó si se estaba en presencia de un lecho móvil o no para emplear la ecuación de Laursen (1963) adecuada.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

*Tabla 23: Datos de ingreso para cálculo de erosión por contracción en puente existente en uso para el Escenario 1.*

<b>DATOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E1)</b>	
Caudal en la sección de aproximación [m <sup>3</sup> /s]	383.4
Caudal en la sección contraída [m <sup>3</sup> /s]	428.8
Ancho en la sección de aproximación [m]	67.62
Ancho en la sección contraída [m]	57.6
Tirante medio en la sección de aproximación [m]	4.6
D50 [mm]	0.074
Coefficiente K1 en función del material transportado	0.69

Los resultados del análisis indicaron que se estaba en presencia de un lecho móvil, por lo que se empleó la Ec. 23. Ésta arrojó como resultado que la profundidad de erosión (ys) en el puente existente en uso, para un periodo de recurrencia de 50 años en el escenario 1 fue de 0,71 metros. En la Tabla 24 se exponen resumidamente los resultados del cálculo.

*Tabla 24: Resultados del cálculo de la erosión por contracción en el puente existente en uso para el Escenario 1.*

<b>RESULTADOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E1)</b>	
Profundidad de Erosión Ys [m]	0.71
Velocidad Crítica [m/s]	0.33
Ecuación	Lecho Móvil

Para el segundo escenario, con la presencia del puente existente en uso y del puente proyectado, se determinó el valor de la erosión por contracción en ambos puentes tomando los datos de salida de la corrida del modelo HEC-RAS para este escenario, para un periodo de recurrencia de 50 años. El ancho del cauce en las secciones contraídas de los puentes fue dividido en 30 fajas donde se definieron caudal, área y tirante medio. Al igual que en el escenario anterior, se determinó si se trataba de un lecho móvil o no para emplear la ecuación adecuada. A continuación, en las Tablas 25 y 26, se muestran los datos de ingreso para la sección de aproximación y contraída, tanto del puente existente en uso, como así también del puente proyectado.

*Tabla 25: Datos de ingreso para cálculo de erosión por contracción en puente existente en uso para el Escenario 2.*

<b>DATOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E2; PEU)</b>	
Caudal en la sección de aproximación [m <sup>3</sup> /s]	379.02
Caudal en la sección contraída [m <sup>3</sup> /s]	428.8
Ancho en la sección de aproximación [m]	67.62
Ancho en la sección contraída [m]	57.6
Tirante medio en la sección de aproximación [m]	4.62
D50 [mm]	0.074
Coefficiente K1 en función del material transportado	0.69

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

*Tabla 26: Datos de ingreso para cálculo de erosión por contracción en el puente proyectado para el Escenario 2.*

<b>DATOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E2; PP)</b>	
Caudal en la sección de aproximación [m <sup>3</sup> /s]	410.04
Caudal en la sección contraída [m <sup>3</sup> /s]	428.8
Ancho en la sección de aproximación [m]	64.43
Ancho en la sección contraída [m]	57.6
Tirante medio en la sección de aproximación [m]	5.08
D50 [mm]	0.074
Coeficiente K1 en función del material transportado	0.69

Los resultados obtenidos de la erosión por contracción, en cada puente, se presentan en las Tablas 27 y 28.

*Tabla 27: Resultados del cálculo de la erosión por contracción en el puente existente en uso para el Escenario 2.*

<b>RESULTADOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E2; P.E.U.)</b>	
Profundidad de Erosión Ys [m]	0.77
Velocidad Crítica [m/s]	0.33
Ecuación	Lecho Móvil

*Tabla 28: Resultados del cálculo de la erosión por contracción en el puente proyectado para el Escenario 2.*

<b>RESULTADOS EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Tr=50 AÑOS (E2; P.P.)</b>	
Profundidad de Erosión Ys [m]	0.36
Velocidad Crítica [m/s]	0.33
Ecuación	Lecho Móvil

Del análisis de los resultados obtenidos tanto en el escenario 1 como en el escenario 2, se deduce que existe socavación por contracción con transporte de sedimentos en el cauce principal, debido a que las velocidades obtenidas para las crecidas estudiadas, superan las velocidades críticas de la partícula.

La sección contraída del puente existente tiene una profundidad de erosión que ronda los 0,70 m para el escenario 1, la cual se incrementa en unos 0,06 m con la presencia del nuevo puente. Por otra parte, debido a que el puente proyectado se encuentra aguas abajo del puente existente en uso, la profundidad de erosión por contracción en éste no supera la mitad del valor correspondiente al puente ya construido.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

### 4.3 Erosión en pilas y estribos

#### 4.3.1 Cálculo de la socavación local en pilas

El principal mecanismo causante de la socavación local en pilas es el de la formación de vórtices. Dichos vórtices tienen su origen en la sobre elevación del flujo aguas arriba de la pila debido a la obstrucción y la subsecuente aceleración del flujo alrededor de la pila. La acción de dicho vórtice remueve material desde los alrededores de la base de la obstrucción. A medida que aumenta la profundidad de la fosa, la magnitud del vórtice disminuye y por lo tanto disminuye la tasa a la cual se remueve el material. Cuando el ingreso del material a la fosa se equilibra con el material de salida, se alcanza el equilibrio y se detiene su desarrollo.

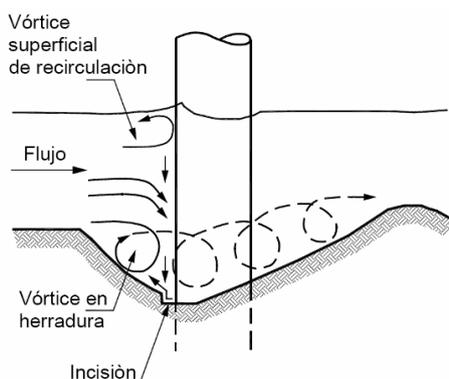


Figura 39: Vórtices en pilas (Suárez Díaz, 2001).

La Circular HEC # 18 recomienda el uso de la ecuación de la Universidad del Estado de Colorado (CSU) (Richardson, 1990; HEC 1998b) para el cálculo de la socavación en pilas tanto para ríos con transporte de sedimentos como para flujos limpios.

La ecuación de la Universidad del Estado de Colorado (CSU), definida en la Ec. 24, predice una profundidad máxima en la fosa de socavación tanto para el caso de ríos con transporte de sedimentos como el de aquellos con flujos limpios.

$$h_s = 2,0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times a^{0,65} \times h_1^{0,35} \times Fr_1^{0,43}$$

Ecuación 24

Donde  $h_s$  es la profundidad de la fosa;  $K_1$  es un factor de corrección debido a la forma de la nariz de la pila;  $K_2$  es un factor de corrección debido al ángulo de ataque del flujo;  $K_3$  es un factor de corrección debido a la condición del material del lecho;  $K_4$  es un factor de corrección debido al acorazamiento del material del lecho;  $a$  es el ancho de la pila;  $h_1$  es la profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila y  $Fr_1$  es el Número de Froude inmediatamente aguas arriba de la pila.

Cabe aclarar que para pilas con nariz redondeada alineadas con el flujo, la profundidad máxima de socavación se limita según:

$$h_s = 2,4 \text{ veces el ancho de la pila (a) para } Fr_1 \leq 0,8$$

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

$h_s = 3,0$  veces el ancho de la pila (a) para  $Fr_1 > 0,8$

Para el primer escenario (puente viejo y puente existente en uso) se definieron las profundidades de socavación en pilas del puente existente en uso, para un periodo de recurrencia de 50 años. Los parámetros adoptados son los presentados en la Tabla 29 a continuación.

Tabla 29: Datos de ingreso para cálculo de erosión en pilas del puente existente en uso para el Escenario 1

<b>DATOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E1)</b>	
Factor de corrección por forma de nariz (K1)	1
Factor de corrección por ángulo de ataque (K2)	1
Factor de corrección por condición del lecho (K3)	1.1
$K_4 = [1 - 0.89 \cdot (1 - VR)^2]^{0.5}$	1
Ancho de pila	1.2

En la Tabla 30 se exponen los resultados de dicho análisis.

Tabla 30: Cálculo de la socavación en pilas del puente existente para el Escenario 1.

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E1)</b>		
	PILA 1 (-10)	PILA 2 (10)
Profundidad de erosión	2.23	2.28
Froude	0.19	0.19
Ecuación	CSU	CSU

Para el segundo escenario (puente existente en uso y puente proyectado) se definieron las profundidades de socavación tanto en pilas de ambos puentes, para un periodo de recurrencia de 50 años. Los parámetros adoptados son los presentados en la Tabla 31 y 32.

Tabla 31: Datos de ingreso para cálculo de erosión en pilas del puente existente en uso para el Escenario 2.

<b>DATOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E2; P.E.U.)</b>	
Factor de corrección por forma de nariz (K1)	1
Factor de corrección por ángulo de ataque (K2)	1
Factor de corrección por condición del lecho (K3)	1.1
$K_4 = [1 - 0.89 \cdot (1 - VR)^2]^{0.5}$	1
Ancho de pila	1.2

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

*Tabla 32: Datos de ingreso para cálculo de erosión en pilas del puente proyectado para el Escenario 2.*

<b>DATOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E2; P.P.)</b>	
Factor de corrección por forma de nariz (K1)	1
Factor de corrección por ángulo de ataque (K2)	1
Factor de corrección por condición del lecho (K3)	1.1
$K4 = [1 - 0.89 * (1 - VR)^2]^{0.5}$	1
Ancho de pila	1.2

Los resultados del análisis de la socavación localizada en las pilas de ambos puentes son expuestos en las Tablas 33 y 34, y analizados a continuación.

*Tabla 33: Cálculo de la socavación en pilas del puente existente en uso para el Escenario 2.*

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E2; P.E.U.)</b>		
	PILA 1 (-10)	PILA 2 (10)
Profundidad de erosión [m]	2.22	2.27
Froude	0.19	0.19
Ecuación	CSU	CSU

*Tabla 34: Cálculo de la socavación en pilas del puente proyectado para el Escenario 2.*

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN PILAS Tr=50 AÑOS (E2; P.P.)</b>		
	PILA 1 (-10)	PILA 2 (10)
Profundidad de erosión [m]	2.22	2.13
Froude	0.16	0.16
Ecuación	CSU	CSU

De los resultados antes expuestos podemos deducir que la profundidad de erosión localizada en pilas es idéntica en ambos puentes para el escenario 2, siendo levemente mayor en la pila situada a la izquierda (observando la sección transversal desde aguas arriba hacia aguas abajo). Por otra parte, es de notar que la presencia del nuevo puente (puente proyectado) no afecta prácticamente a la socavación en las pilas del puente existente en uso.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

### 4.3.2 Cálculo de la socavación local en estribos

La socavación en estribos constituye el descenso abrupto del lecho fluvial, generado por la remoción del material del fondo, cuando éstos obstruyen parcialmente el flujo. Esta obstrucción provoca la curvatura del flujo en la zona de aproximación al estribo causando una corriente secundaria que forma un vórtice horizontal principal, similar al que se desarrolla en una curva de un río (Raudkivi, 1985), y que a su vez induce un vórtice secundario pero de menor poder erosivo (Hoffmans, 1997). Aguas abajo del estribo se presenta una zona de separación en correspondencia con la zona de desaceleración en la que las líneas de escurrimiento comienzan a ser divergentes, desarrollándose allí un tren de vórtices verticales que divide al flujo principal de una zona de aguas muertas.

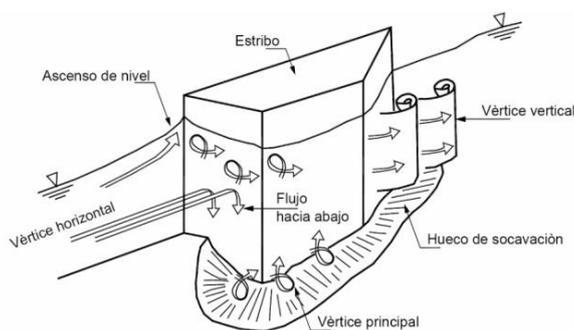


Figura 40: Esquema de vórtices generados en estribos (Suárez Díaz, 2001)

Las expresiones más utilizadas para la estimación de la erosión local en estribos se han obtenido, en general, a partir de información compilada de ensayos de laboratorio en canales rectangulares (Melville, 1992; Lim, 1997; Kothyari - Ranga Raju, 2001; Richardson, 2002). La mayor parte de los datos disponibles se corresponden con ensayos para estribos de pared vertical, habiendo adicionalmente algunos para estribos conformados por paredes verticales con muros guía (wing wall) y unos pocos para estribos de sobrepaso o no verticales indicados como spill-through en la literatura anglosajona (Liu, 1961; Wong, 1982; Tey, 1984; Dongol, 1994; Kuhnle, 1999).

La FHWA HEC define, en su circular N° 18, dos ecuaciones para el cálculo de la socavación en estribos. La ecuación a ser aplicada se encuentra en función de la relación existente entre la longitud mojada del terraplén y la profundidad de aproximación del flujo ( $h_1$ ). Cuando la longitud mojada del terraplén ( $L$ ) dividida entre la profundidad de aproximación del flujo ( $h_1$ ) es mayor que 25, se sugiere emplear la ecuación HIRE (Richardson, 1990; H.E.C. 1998b). Cuando esta razón es menor o igual que 25, se recomienda emplear la ecuación de Froehlich, 1989.

De acuerdo a los cálculos realizados, se debe aplicar la Ec. 25, correspondiente a la ecuación de Froehlich, 1989.

$$\frac{e}{y_1} = 2.27 K_1 K_2 \left( \frac{L}{y_1} \right)^{0.43} Fr_1^{0.61} + 1$$

Ecuación 25

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Donde  $e$  es la profundidad de erosión máxima de equilibrio;  $y_1$  es la profundidad promedio en el cauce principal o llanura de inundación en la sección aguas arriba;  $L$  es la longitud del estribo proyectada en la dirección perpendicular del flujo;  $V_e$  es la velocidad promedio del flujo de aproximación;  $Q_e$  es el caudal obstruido por el estribo y el terraplén en la sección de aproximación;  $A_e$  es el área de flujo en la sección de aproximación obstruida por el estribo y el terraplén;  $K_1$  es un factor de forma;  $K_2$  es un factor que considera el ángulo respecto al flujo y  $Fr_1$  es el Número de Froude aguas arriba, siendo su ecuación la siguiente:

$$Fr = \frac{V_e}{\sqrt{g y_1}}$$

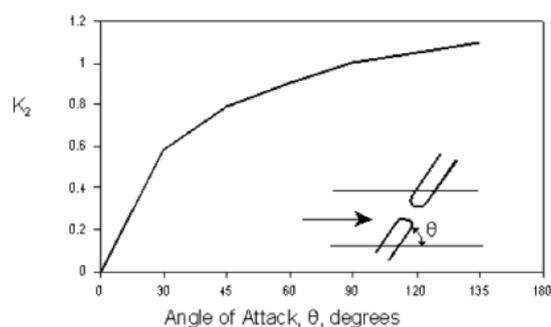


Figura 41: Factor  $K_2$  que considera el ángulo del estribo respecto al flujo (Suárez Díaz, 2001).

En el estudio de la socavación localizada en estribos del puente existente en uso se consideraron los dos escenarios antes mencionados.

- Primer Escenario: Puente viejo y Puente existente en uso.

Los datos de entrada, considerando el primer escenario, para el cálculo de socavación en estribos del Puente Existente en uso son los que se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35: Datos de ingreso para cálculo de erosión en estribos del puente existente en uso para el escenario 1

DATOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS $Tr=50$ AÑOS (E1)	
Factor de corrección por forma de estribo ( $K_1$ )	1
Factor que considera el ángulo respecto al flujo ( $K_2$ )	1
Ángulo de estribo ( $\theta$ )	90

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Los resultados obtenidos son los presentados en la Tabla 36 a continuación.

*Tabla 36: Cálculo de la erosión en estribos del puente existente en uso para el escenario 1*

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS Tr=50 AÑOS (E1)</b>		
	IZQUIERDO	DERECHO
Profundidad de erosión [m]	2.10	2.46
Froude	0.14	0.10
Ecuación	HIRE	HIRE

- Segundo Escenario: Puente Existente en uso y Puente proyectado.

Los datos de ingreso (considerando el escenario N°2) para el cálculo de la socavación en estribos del puente existente en uso son presentados en la Tabla 37.

*Tabla 37: Datos de ingreso para cálculo de erosión en estribos del puente existente en uso para el escenario 2.*

<b>DATOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS Tr=50 AÑOS (E2; P.E.U.)</b>	
Factor de corrección por forma de estribo (K1)	1
Factor que considera el ángulo respecto al flujo (K2)	1
Ángulo de estribo ( $\theta$ )	90

La Tabla 38 muestra los resultados arribados tras el análisis de socavaciones en los estribos del puente existente en uso.

*Tabla 38: Cálculo de la erosión en estribos del puente existente en uso para el escenario 2.*

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS Tr=50 AÑOS (E2; P.E.U.)</b>		
	IZQUIERDO	DERECHO
Profundidad de erosión [m]	2.16	2.52
Froude	0.14	0.10
Ecuación	HIRE	HIRE

En el estudio de la socavación localizada en estribos del puente proyectado se consideró sólo el escenario N°2.

Los datos de ingreso fueron los indicados en la Tabla 39.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCFyN – Ingeniería Civil

*Tabla 39: Datos de ingreso para el cálculo de la erosión en estribos del puente proyectado para el escenario 2*

<b>DATOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS Tr=50 AÑOS (E2; P.P.)</b>	
Factor de corrección por forma de estribo (K1)	1
Factor que considera el ángulo respecto al flujo (K2)	1
Ángulo de estribo ( $\theta$ )	90

Y los resultados obtenidos:

*Tabla 40: Cálculo de la erosión en estribos del puente proyectado para el escenario 2*

<b>RESULTADOS SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS Tr=50 AÑOS (E2; P.P.)</b>		
	IZQUIERDO	DERECHO
Profundidad de erosión [m]	0.00	5.27
Froude	0.00	0.11
Ecuación	DEFAULT	HIRE

La socavación en los estribos del puente ejecutado en uso es idéntica en ambos escenarios, rondando los 2,10 metros la correspondiente al estribo izquierdo y los 2,50 metros la del estribo derecho.

En el puente proyectado cabe señalar que sobre el estribo izquierdo la erosión es despreciable, mientras que sobre el estribo derecho ésta ronda los 5,27 metros. Esta desigualdad puede deberse a que el cauce del río posee una curva con concavidad hacia el margen derecho y convexidad hacia el izquierdo, depositando sedimentos sobre este último y erosionando el estribo derecho.

En las Fig. 42 a 44 presentadas a continuación se muestran las secciones transversales de los puentes con sus correspondientes erosiones.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

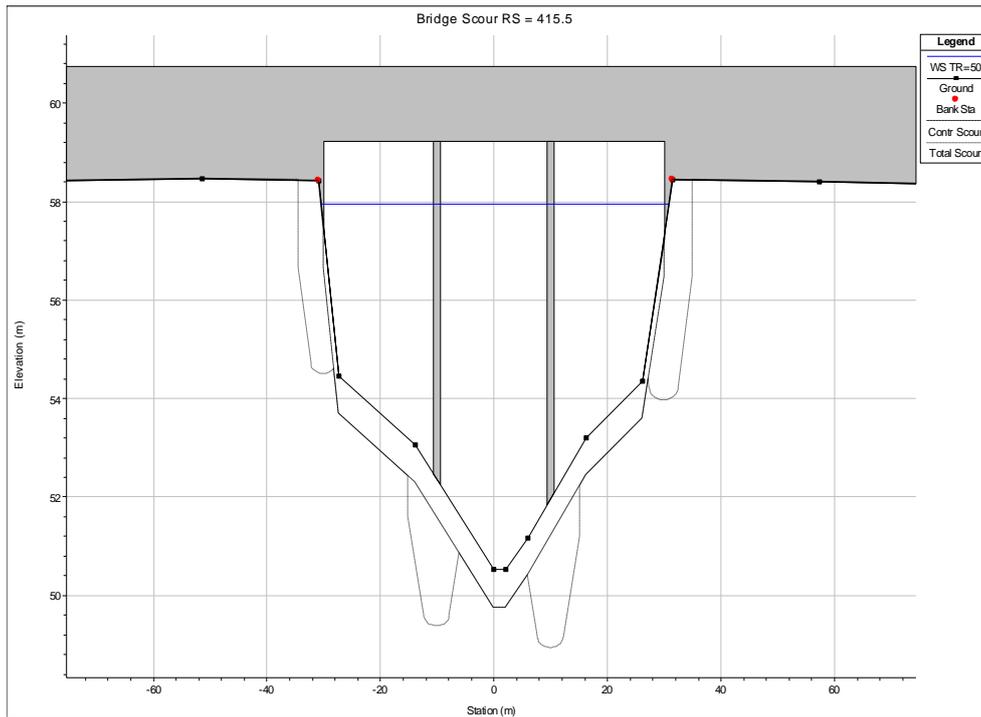


Figura 42: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente existente en uso para el escenario 1 (HEC-RAS).

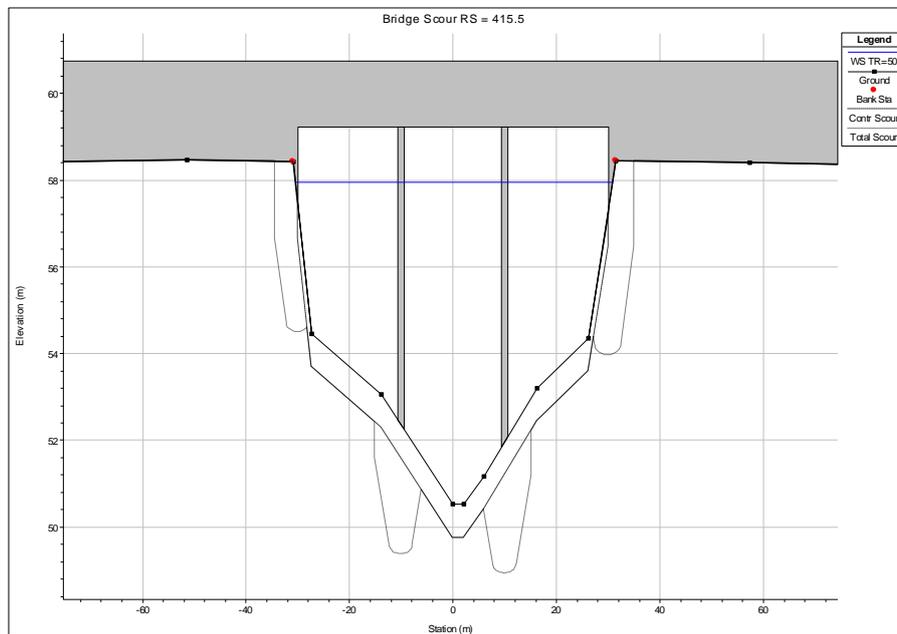


Figura 43: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente existente en uso para el escenario 2 (HEC-RAS).

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

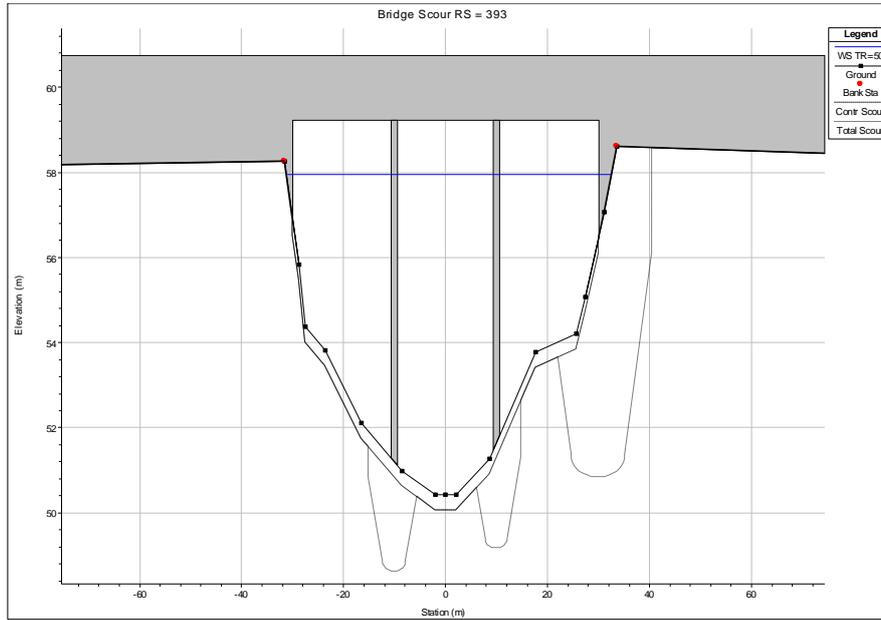


Figura 44: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente proyectado para el escenario 2 (HEC-RAS)

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

**5 CONCLUSIONES**

Tras el análisis de los antecedentes referidos a la lluvia de diseño, se arribó a los siguientes resultados:

- Para  $Tr=25$  años el caudal pico es de **342,30 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 45.

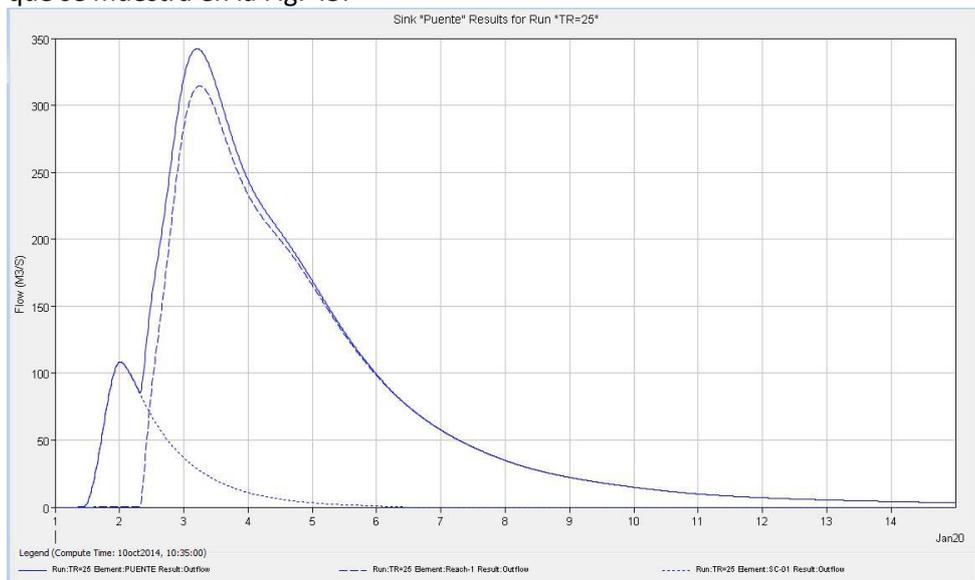


Figura 4425: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para  $TR = 25$  años (HEC-HMS).

- Para  $Tr=50$  años el caudal pico es de **428.8 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 46.

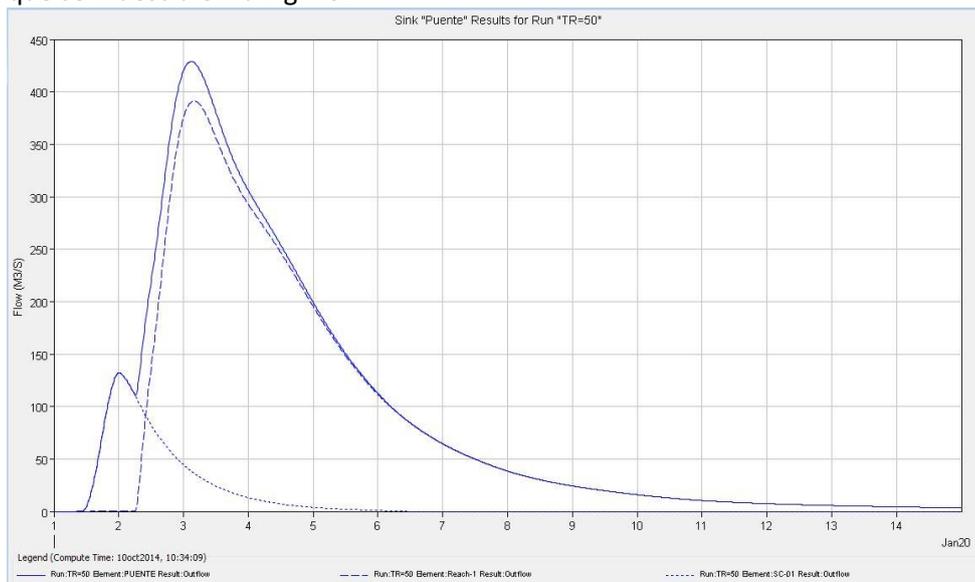


Figura 46: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para  $TR = 50$  años (HEC-HMS).

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

- Para  $Tr=100$  años el caudal pico es de **519,5 m<sup>3</sup>/s**, y el hidrograma de la crecida es el que se muestra en la Fig. 47.

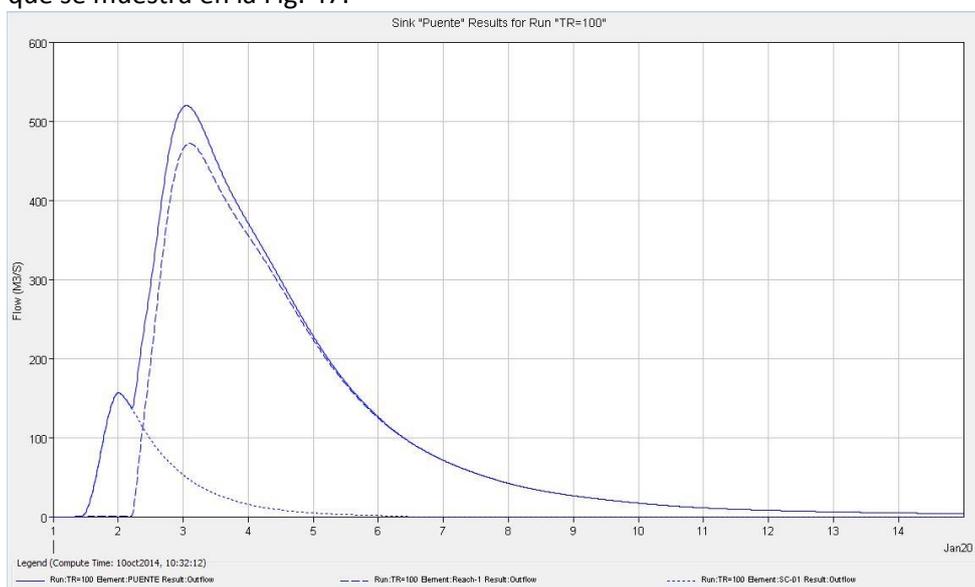


Figura 47: Hidrograma obtenido utilizando el modelo de transferencia tipo Clark para  $TR = 100$  años (HEC-HMS).

Puede observarse que el caudal pico en los hidrogramas presentados en las Fig. 45 a 47, se presenta entre las 00:00 hs y las 04:00 hs del tercer día de lluvia; es decir, entre las 48 hs y las 52 hs de iniciada la misma, desplazándose el pico hacia la izquierda a medida que el tiempo de recurrencia es mayor.

Cabe destacar que en la modelación para la transformación lluvia-caudal no se ha tenido en cuenta el flujo base, tal como puede verse en las Fig. 45 a 47. Esto significa que se ha considerado que toda el agua precipitada ha llegado al punto de aforo (que en nuestro caso es el puente sobre el riacho Cortapick) sin infiltrarse, poniéndonos del lado de la seguridad.

Para la determinación de las cotas de máxima crecida para los diferentes tiempos de recurrencia se plantearon dos escenarios: uno, que describe la situación actual (con el puente viejo y el puente existente en uso) y otro, que describe la situación proyectada (con el puente existente en uso y el puente proyectado).

De la primera corrida puede deducirse que, aguas arriba del puente existente en uso, para un incremento del caudal de 90,7 m<sup>3</sup>/s (entre el caudal correspondiente a un  $Tr=100$  años y un  $Tr=50$  años), se tiene un aumento de 17 cm en la cota de pelo de agua.

En la Fig. 48 queda en evidencia que, tanto para una recurrencia de 50 años como para una de 100 años, el tablero del puente viejo queda sumergido. Este es el motivo por el cual se ha planificado su demolición.

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYn – Ingeniería Civil

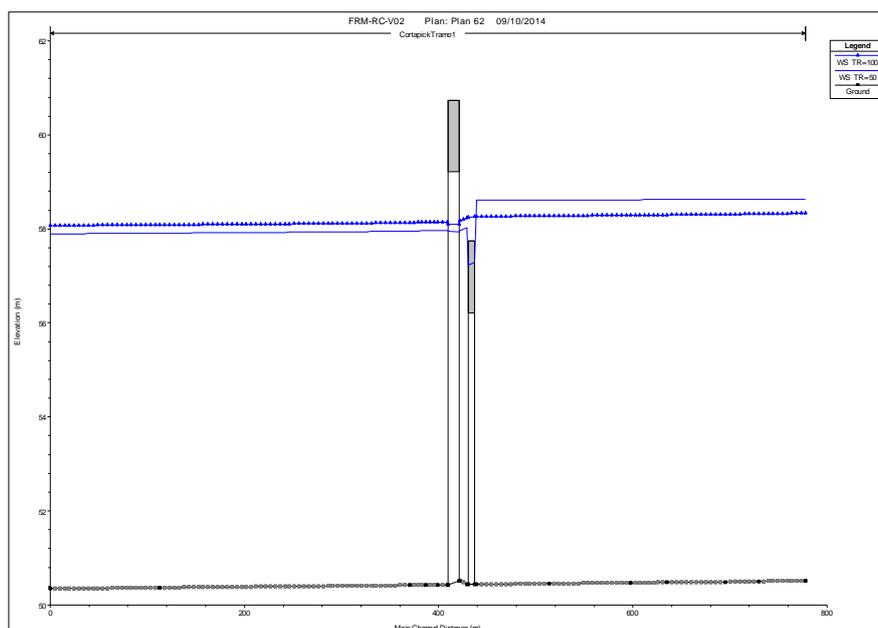


Figura 48: Sección longitudinal y ubicación del puente existente en uso y el puente viejo para el Escenario 1 (HEC-RAS).

Para la segunda corrida, en el puente existente en uso, puede observarse un incremento del valor de la cota de máxima crecida en 2 cm (tanto para un  $Tr=50$  años como para un  $Tr=100$  años) respecto a la primera corrida, es decir, sin el puente proyectado. Esto se debe a que la presencia de este nuevo puente aguas abajo del existente en uso, y con las mismas dimensiones que éste, significa una obstrucción al paso del agua.

En el puente proyectado, para esta segunda corrida, la cota de pelo de agua es 0,01 m ó 0,02 m por debajo de la correspondiente al puente existente en uso.

**La Cota de Fondo de Viga del puente proyectado se fijó sumando a la Cota de Máxima Crecida del puente proyectado para un  $Tr=100$  años, una revancha de 1 m. Por lo tanto: C.F.V= 59,11 m.**

En cuanto a las socavaciones, cabe destacar que el software HEC-RAS es un modelo unidimensional. Esto nos pone del lado de la seguridad ya que considera el material erosionado, pero no así el depositado.

Para la determinación de las erosiones generales se ha corrido el modelo HEC-RAS sin considerar la presencia de ningún puente. Esto contribuye a la comprensión del curso del riacho en su estado natural. **Las socavaciones generales siguiendo este criterio, resultan nulas para tormentas de diseño de 50 años de recurrencia.** Esto se debe a las bajas velocidades resultantes de la escasa pendiente topográfica del cauce. Las mismas no superan la velocidad límite necesaria para iniciar el movimiento de las partículas.

Para el análisis de las socavaciones por contracción, como así también las correspondientes a pilas y estribos, se modelaron los dos escenarios antes planteados (uno representando la situación existente y el otro la proyectada).

## Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.

UNC – FCEfYN – Ingeniería Civil

Del análisis de los resultados obtenidos tanto en el escenario 1 como en el escenario 2, se deduce que existe socavación por contracción con transporte de sedimentos en el cauce principal, debido a que las velocidades obtenidas para las crecidas estudiadas, superan las velocidades críticas de la partícula.

La sección contraída del puente existente tiene una profundidad de socavación que ronda los 0,70 m para el escenario 1, la cual se incrementa a unos 0,76 m con la presencia del nuevo puente. Por otra parte, debido a que el puente proyectado se encuentra aguas abajo del puente existente en uso, la profundidad de socavación por contracción en éste no supera la mitad del valor correspondiente al puente ya construido.

La profundidad de socavación localizada en pilas es idéntica en ambos puentes para el escenario 2, rondando los 2,20 m. Por otra parte, es de notar que la presencia del nuevo puente (puente proyectado) no afecta prácticamente a la socavación en las pilas del puente existente en uso.

La socavación en los estribos del puente existente en uso es idéntica en ambos escenarios, rondando los 2,10 metros la correspondiente al estribo izquierdo y los 2,50 metros la del estribo derecho.

En el puente proyectado cabe señalar que sobre el estribo izquierdo la socavación es despreciable, mientras que sobre el estribo derecho ésta ronda los 5,27 metros. Esta desigualdad puede deberse a que el cauce del río posee una curva con concavidad hacia el margen derecho y convexidad hacia el izquierdo, depositando sedimentos sobre este último y erosionando el estribo derecho.

En las Fig. 49 a 51 presentadas a continuación se muestran las secciones transversales de los puentes con sus correspondientes perfiles de socavaciones.

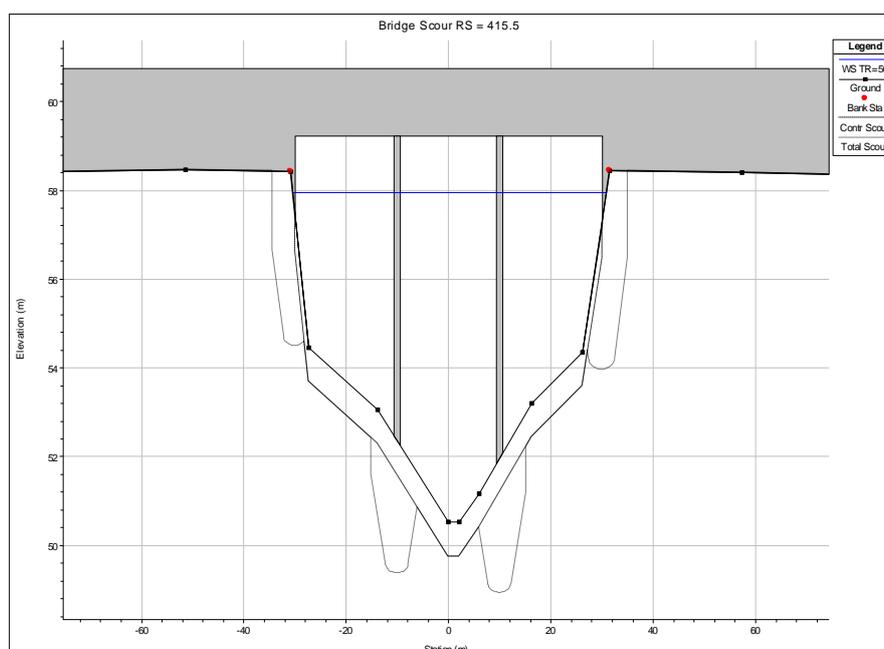


Figura 49: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente existente en uso para el escenario 1 (HEC-RAS).

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEfN – Ingeniería Civil

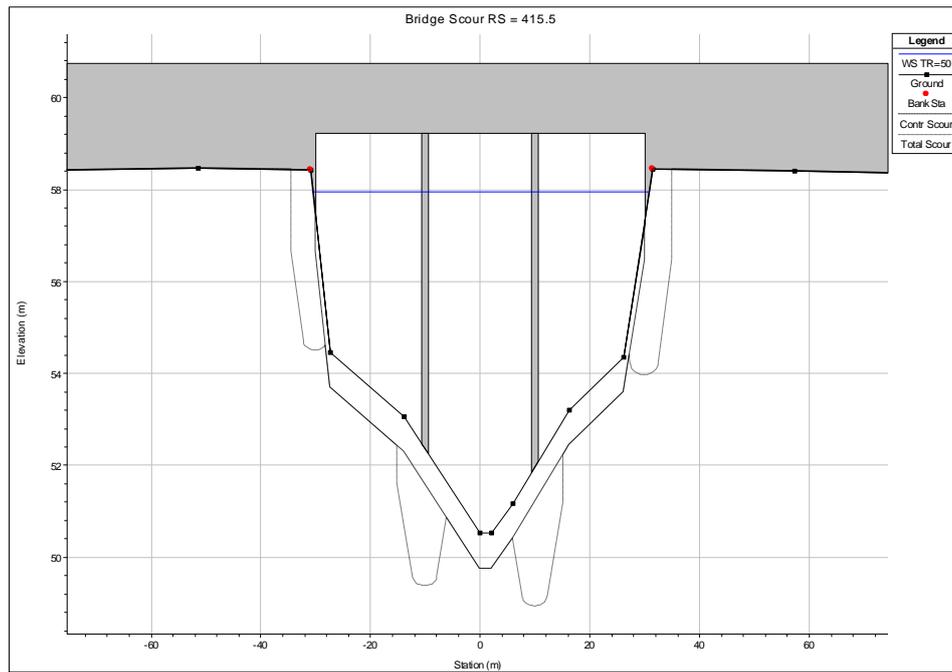


Figura 50: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente existente en uso para el escenario 2 (HEC-RAS).

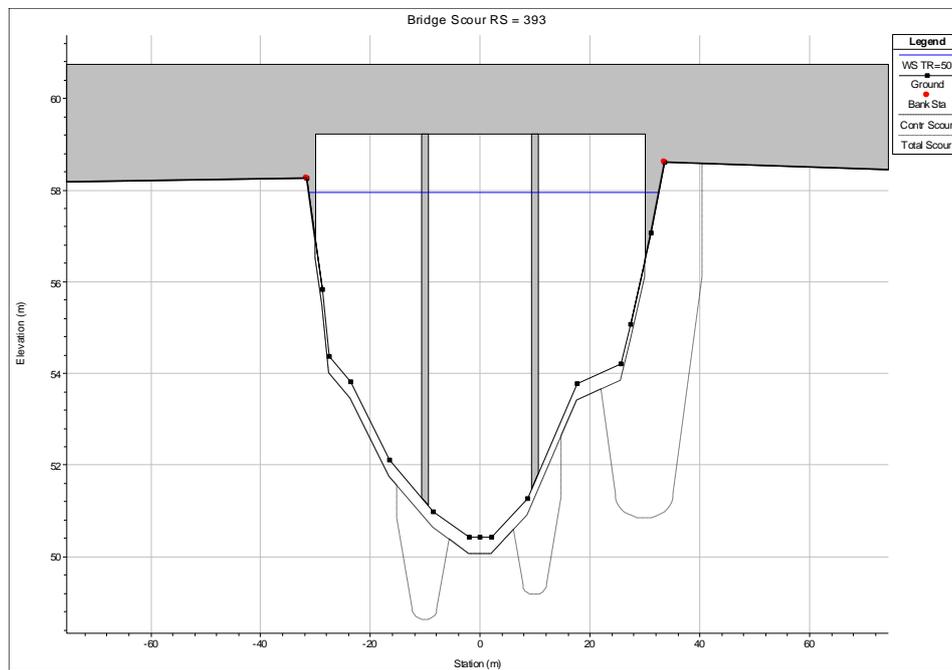


Figura 51: Erosión por contracción, en pilas y estribos del puente proyectado para el escenario 2 (HEC-RAS).

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEfyN – Ingeniería Civil

Para alcanzar las conclusiones y los resultados antes expuestos, se formó parte de un grupo de profesionales y técnicos con los que hubo una constante interacción y a los que se consultó en todo momento, a saber: ingenieros civiles hidráulicos, viales y estructurales, topógrafos, técnicos en geología, entre otros.

Lo anterior, sumado a los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil, permitió aplicar conocimientos en el desarrollo del trabajo profesional y ampliarlos con dicha práctica.

Con todo esto se ha alcanzado el último pero no menos importante de los objetivos planteados en un principio: la redacción del presente informe exponiendo los trabajos ejecutados durante la Práctica Supervisada y la extracción de conclusiones y resultados de significativa utilidad y aplicación en el ámbito profesional.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

UNC – FCEyN – Ingeniería Civil

**6 BIBLIOGRAFÍA.**

- APARICIO MIJARES, F. J. (1992). "Fundamentos de hidrología de superficie". México D. F., México: Limusa.
- BERTONI, J. C., CHEVALLIER, P., BOUVIER, C., DESBORDES, M. (2000). "Análisis relativo a la estimación del tiempo de concentración: Aplicación a tres cuencas semi urbanizadas de la región central argentina.". XIX Congreso latinoamericano de hidráulica. Córdoba. Argentina.
- BREA, SPALETTI Y RODRÍGUEZ (2007): "Erosión local en estribos de puentes – Estudio experimental" III Simposio Regional de Ríos – Córdoba. Argentina.
- CAAMAÑO, N. G.; DASSO, M. C. (2003). "Lluvias de diseño. Conceptos, técnicas y experiencias". Argentina: Universitas.
- CHOW, V. T. (1958). "Hidráulica de canales abiertos". Mc Graw-Hill.
- CHOW, V. T. (1987). "Hidrología aplicada". Mc Graw-Hill.
- FARÍAS, H. D: "Forma en Planta de Ríos de Llanura. Conciliación de Criterios Empíricos y Analíticos para la Identificación de Umbrales Morfológicos". Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE).
- GUITELMAN, LEIVA, BEBCZUK (2006): "Comparación de métodos de cálculo de erosión en puentes". Buenos Aires. Argentina.
- MAIDMENT, D. R. (1993): "Handbook of hydrology". McGraw-Hill.
- NANIA, L. S. (2003). "Métodos de Transformación Lluvia-Escorrentía y de Propagación de Caudales".
- ROSGEN, D. L; SILVEY, L. (1998): "Field Guide for Stream Classification". Wildland Hydrology Books.
- SCHREIDER, SCACCHI, REYNARES, FRANCO: "Aplicación del Método de Lischtván-Lebediev al cálculo de Erosión General en Lechos de Arena".
- STREETER, V. L. (1988). "Mecánica de los fluidos". Mc Graw-Hill, Octava edición.
- SUÁREZ DÍAZ, J. (2001). "Control de erosión en zonas tropicales". Buscaramanga. Colombia.
- TUCCI, C. (1993). "Hidrologia Ciência e Aplicaçào". Brasil: Editora da Universidade.
- TUCCI, C., PORTO, R., DE BARROS, M. (1995). "Drenagem urbana 5". Brasil: Editora da Universidade.

**Modelación hidráulica del puente situado sobre el riacho Cortapick en la traza de la Ruta Nacional N°11 de la Provincia de Formosa.**

---

UNC – FCEyN – Ingeniería Civil

- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2002): “HEC-RAS River analysis system. User Manual”. Version 3.1.