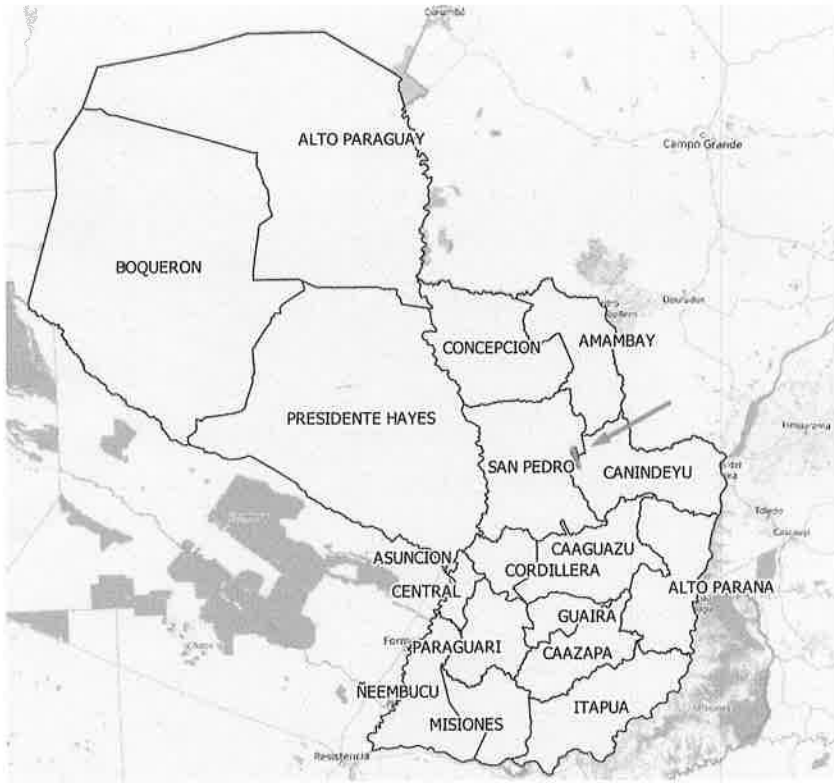
ANEXO 7

ESTUDIOS ESPECÍFICOS

ESTUDIO HIDROLOGICO

REVISIÓN DE LAS OBRAS DE ARTE PROPUESTAS PARA EL TRAMO VIAL SAN VICENTE - MARACANÁ

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA



Equipo de Trabajo

Ing. Benito Pereira, M.Sc.
Cesar Yaluk

Septiembre 2021

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M.Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC N° 1791
Reg. MADES N° I-1003

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO 4

1. INTRODUCCIÓN 6

2. CALCULO DE CAUDALES - HIDROLOGÍA 6

2.1 Delimitación de Cuencas 6

2.2 Precipitación 7

2.3 Métodos utilizados para el cálculo de Caudales de Diseño 9

2.3.1 Método Racional 9

2.3.2 Hidrograma Unitario Triangular 9

2.4 Estimación de Parámetros 10

2.4.1 Coeficiente de Escorrentía 10

2.4.2 Intensidad de precipitación 10

2.4.3 Numero de Curva y Factor Pico 12

2.4.4 Tiempo de Retardo 15

2.5 Resultados: Caudales de Diseño 16

3. HIDRÁULICA 17

3.1 Alcantarillas transversales 17

3.2 Puentes 20

3.2.1 Criterios de Diseño 20

3.2.2 Modelo hidráulico en HEC RAS 20

3.2.3 Geometría del Río 20

3.2.4 Coeficiente de Rugosidad 22

3.2.5 Condiciones de Borde 24

3.2.6 Resultados obtenidos 24

ANEXO – ESTUDIO SOBRE EL PUENTE SITUADO SOBRE EL RÍO JEJUÍ GUAZÚ 27

RESUMEN EJECUTIVO 27

1. Estudio de Hidrología: Estimación de Caudales de Diseño 29

3.3 Cálculo de caudal mediante simulación hidrológica 29

2.1.1 Métodos de Cálculo utilizados 32

2.1.2 Estimación de parámetros 32

2.1.3 Resultados obtenidos mediante simulación hidrológica 37

2 Estudio Hidráulico: Dimensionamiento del Puente y obras anexas 38

3.4 Criterios de Diseño 38

3.5 Modelo hidráulico en HEC RAS 39

3.2.1 Geometría del Río 39

3.2.2 Coeficiente de Rugosidad 41

3.2.3 Condiciones de Borde 42

3.6 Resultados obtenidos 43

3 Conclusiones y Recomendaciones Generales 45

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento consiste en una revisión de las obras de drenaje transversal del tramo vial "San Vicente – Maracana". Se tomo como información base las obras de arte propuestas en el proyecto vial. Se encontró la necesidad de agregar nuevas obras y ampliar otras. En total, el proyecto plantea 17 obras de arte, mientras que la presente revisión recomienda un total de 31. Esto se resume en la siguiente tabla:

TABLA 1 CRITERIOS DE DISEÑO UTILIZADOS PARA LA SELECCIÓN DEL TIEMPO DE RETORNO DEL MCP

Prog. Aprox.	Tramo	Obra PYTO.	Obra Recomendada por Revisión
0+010	**Principal - 1**	AC1 1,00 x 1,00	AC1 1,00 x 1,00
0+820	**Principal - 1**	AC2 1,00 x 1,00	AC1 1,50 x 1,50
1+001	**Principal - 1**	AC2 1,50 x 1,50	AC2 2,00 x 2,00
4+280	**Principal - 1**	-	Sitio potencial para realizar un cruce. En caso contrario, se recomienda utilizar una zanja a pie de talud para derivar el agua que llega al terraplén hasta la planicie de inundación del rio jejuí. Incluir disipadores de energía por la alta pendiente (enrocado).
4+320	**Principal - 1**	AC2 1,50 x 1,50	AC3 1,50 x 1,50
4+880	**Principal - 1**	-	AC2 1,50 x 1,50
7+040	**Principal - 1**	-	AC2 1,50 x 1,50
7+080	**Principal - 1**	AC2 1,50 x 1,50	AC3 1,50 x 1,50
7+460	**Principal - 1**	AC2 1,00 x 1,00	AC2 1,00 x 1,00
7+560	**Principal - 1**	AC1 1,50 x 1,50	AC1 1,50 x 1,50
2+820	**Principal - 2**	Puente 12m	Puente de 25m*
3+113	**Principal - 2**	Puente 100m	***
3+376	**Principal - 2**	Puente 20m	Puente 20m
3+944	**Principal - 2**	AC1 1,50 x 1,50	AC2 1,50 x 1,50
4+544	**Principal - 2**	AC1 1,50 x 1,50	-
4+774	**Principal - 2**	AC1 1,00 x 1,00	-
5+855	**Principal - 2**	Puente 15m	AC6 2.50 x 2.50**
6+745	**Principal - 2**	AC1 1,00 x 1,00	-
7+030	**Principal - 2**	-	AC2 1,50 x 1,50
7+045	**Principal - 2**	-	AC3 1,50 x 1,50
10+468	**Principal - 2**	-	AC3 1,50 x 1,50
11+106	**Principal - 2**	Puente 15m	Puente de 15m

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M.Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC N° 1791
Reg. MADES N° I-1003

Prog. Aprox.	Tramo	Obra PYTO.	Obra Recomendada por Revisión
11+777	Principal - 2	-	AC3 1,00 x 1,00
1+140	ramal	-	AC2 1,50 x 1,50
2+330	ramal	-	AC1 1,00 x 1,00
3+140	ramal	-	AC3 1,00 x 1,00
3+520	ramal	-	AC3 1,00 x 1,00
6+620	ramal	-	AC3 1,50 x 1,50
7+860	ramal	-	AC2 1,50 x 1,50

** El estudio de este puente en particular, que trabaja en conjunto con el puente situado sobre el Río Jejuí Guazú se presenta en Anexo. El estudio concluyó la necesidad de incorporar una importante cantidad de alcantarillas de alivio cada 250 metros, lo cual sería la solución más eficiente y permitiría cumplir con la norma de diseño vigente (MCP, 2019). La ampliación del aliviadero de 12 metros a 25 metros constituye una medida inicial, que, si bien no permite cumplir lo establecido por el MCP, duplica la capacidad de aliviadero previsto inicialmente. Es importante prever alguna medida de protección de márgenes en el puente de 25 metros con estructuras flexibles como gaviones. Se recomienda que eventualmente se incorpore la cantidad de alcantarillas sugeridas en el estudio del puente sobre el Jejuí Guazú.*

*** Esta alcantarilla séxtuple puede ser dividida en una alcantarilla simple, una cuádruple y una simple, a situarse en las progresivas 5+820, 5+883 y 5+928, respectivamente.*

**** Remitirse a estudio específico de socavación.*

Obs: las obras marcadas en marrón claro son aquellas obras más críticas a tener en cuenta.

Cabe resaltar que se identificaron varios tramos a media ladera que reciben una importante contribución de agua a las cunetas (lo cual motivó la incorporación de obras transversales adicionales), donde se requiere un adecuado dimensionamiento de estas. Si bien el alcance del presente trabajo se centró únicamente en la revisión de obras trasversales (exceptuando los puentes y sus aliviaderos), se considera importante la evaluación de las cunetas, así como de la altura de la rasante respecto al terreno natural, con el fin de evitar sobrepaso de agua sobre la pista.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M.Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC N° 1791
Reg. MADES N° I-1003

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como único objetivo la revisión de las obras de arte calculadas en el proyecto ejecutivo del tramo San Vicente – Maracana, y verificar que las mismas se adecuan a los requerimientos actuales del Manual de Carreteras del Paraguay (MCP, 2019). El requerimiento actual para el diseño de obras de arte (alcantarillas) es de TR = 50 años, tal como se muestra en la siguiente figura.

TABLA 2 CRITERIOS DE DISEÑO UTILIZADOS PARA LA SELECCIÓN DEL TIEMPO DE RETORNO DEL MCP

Tipo de obra	Tipo de Ruta	Período de Retorno (años)		Vida útil Supuesta (n: años)	Riesgo de Falla (%)	
		Diseño[4]	Verificación[5]		Diseño	Verificación
Estructuras Especiales [1]	RVP	200	300	50	22	15
Puentes[2]	α	200	300	50	22	15
	β	100	150	50	40	28
Alcantarillas (S>1.75 m^2) o H_{terrap} ≥ 10 m y Estructuras Enterradas[3]	α	100	150	50	40	28
	β	50	100	30	45	26
Alcantarillas (S<1,75 m^2)	α	50	100	50	64	40
	β	25	50	30	71	45
Defensas de Riberas	α	100	-	20	18	-
	β	100	-	20	18	-

Se delimita el alcance del estudio solamente a el cálculo de las obras de arte transversales no así a las obras longitudinales como cunetas y obras de cruce con caminos perpendiculares al tramo de estudio.

2. CALCULO DE CAUDALES - HIDROLOGÍA

En el presente apartado se estiman los caudales de diseño para el dimensionamiento de obras. Primeramente, se dividen las cuencas de aporte al tramo de estudio, y luego se estiman los caudales a través del método racional para aquellas cuencas inferiores a 300 ha, y mediante el método del hidrograma unitario triangular para aquellas cuencas superiores a dicha superficie. En los siguientes ítems se resumen los cálculos realizados.

2.1 Delimitación de Cuencas

La determinación de los caudales a cada una de las obras de drenaje del proyecto requiere la correcta delimitación de las cuencas de aporte. En el área de estudio se han delimitado cuencas en base a:

a. Modelo Digital de Elevación SRTM (resolución de 90 x 90 m).
b. Perfil Longitudinal del tramo.

Esta delimitación se puede ver en la siguiente figura:

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

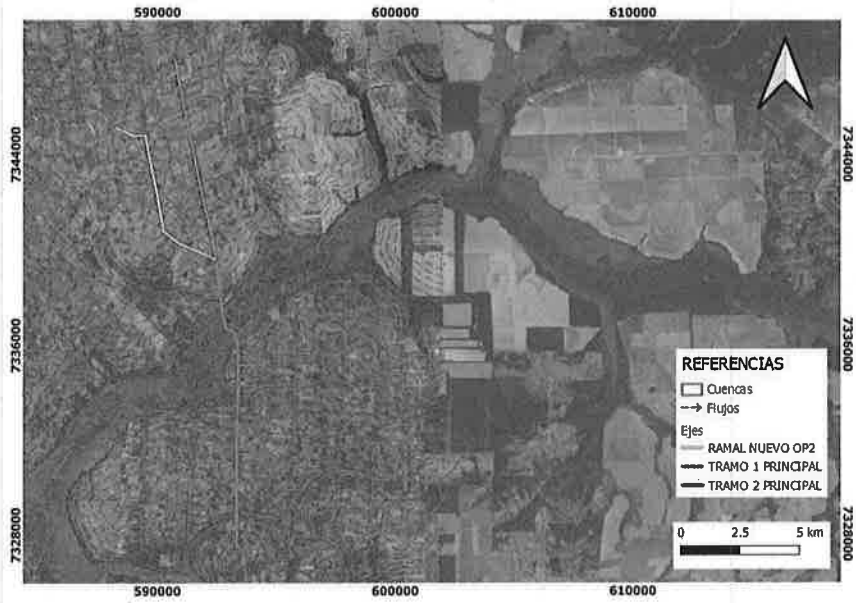


Figura 1 Cuencas de aporte al tramo

2.2 Precipitación

La Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH), dependiente de la Dirección de Aeronáutica Civil (DINAC), es la encargada de llevar registros históricos de precipitación a nivel nacional. Realizando un análisis espacial de Polígonos de Thiessen, se observa que la estación de Concepción representa casi en su totalidad al tramo de estudio.

FIGURA 2 POLÍGONOS DE THIESSEN PARA EL PARAGUAY

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGIA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº 1003

Para la generación de las tormentas sintéticas se utiliza como información base las Curvas IDF del Paraguay (Cuevas & Rolón, 2010), específicamente las generadas en la estación de Concepción, tal como se muestra en la **Figura 3**.

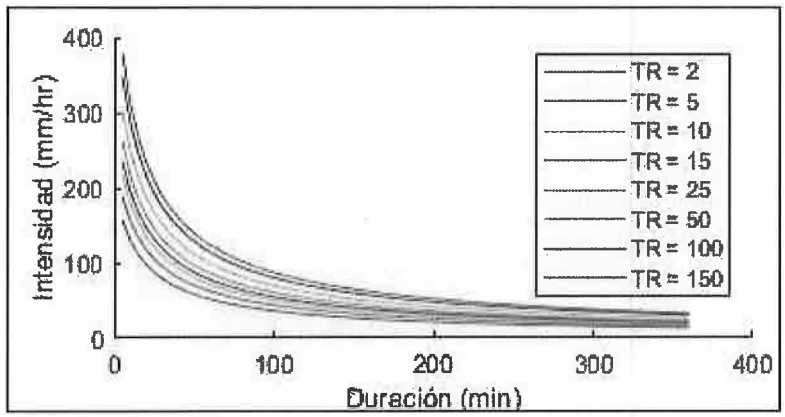


FIGURA 3 CURVAS IDF DE CONCEPCIÓN

Una limitación de estas curvas es que fueron diseñadas con lluvias de hasta 6 horas (360 min). Dado que entre las cuencas delimitadas para el tramo de estudio no se requieren trabajar con tormentas superiores a 6 horas, no se realizan estudios más profundos.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

2.3 Métodos utilizados para el cálculo de Caudales de Diseño

De manera general, para el cálculo de caudales de diseño se utilizan métodos que buscan representar las pérdidas iniciales o abstracciones de la precipitación total caída. Luego se utiliza algún método que permita transformar la lluvia efectiva en escorrentía directa y, por último, si corresponde, se utiliza algún método de propagación de caudal hasta el punto de descarga.

2.3.1 Método Racional

Es un método empírico, pero de amplio uso tanto en proyectos viales como de hidrología urbana. El mismo posee ciertas limitaciones, y por lo tanto se limita su aplicación a cuencas pequeñas, de áreas no mayores a 2 km². Mediante este método, se puede calcular el caudal "Q" de escurrimiento utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = 0{,}278\, x\, C.i.A \qquad (1)$$

Donde:

C = Coeficiente de Escurrimiento.
i = Intensidad de Precipitación, de la Curva IDF, donde D = Tc, F = 1/50 años.
A = Área de la cuenca (km2).

2.3.2 Hidrograma Unitario Triangular

Para cuencas de áreas mayores a 2 km² la estimación de los caudales de diseño se realiza mediante el método del Hidrograma Unitario Triangular. Los métodos utilizados en el presente trabajo se resumen en la **Tabla 3.**

Tabla 3 Métodos de cálculo utilizados

COMPONENTE	MÉTODO	PARÁMETROS
Precipitación	Tormenta de Frecuencia	Volumen de Precipitación (en mm) para 5min, 15min, 1hr, 3hr, 6hr, 12hr, 24 y 48 hr. Los volúmenes acumulados hasta 6 horas se obtienen de la curva IDF; el volumen para 24 horas se obtiene directamente de los datos de la DMH-DINAC por análisis estadísticos; el volumen para 12 horas se obtiene por interpolación.
Pérdidas o Abstracciones y Generación de Lluvia Efectiva	Método del SCS	Número de Curva (CN) y Factor de Pico
Transformación Lluvia - Caudal	Hidrograma Unitario del SCS	Tiempo de Retardo
Propagación	Muskingum Cunge 8 Puntos	Sección Transversal Tipo, Rugosidad (n manning), Pendiente

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

2.4 Estimación de Parámetros

2.4.1 Coeficiente de Escorrentía

En el Método Racional, el Coeficiente C representa la porción (o proporción) de la lluvia que escurre hasta el cauce, y como tal, su valor se encuentra entre 0 (infiltración completa, nada de escurrimiento) y 1 (escurrimiento completo, nada de infiltración). Este coeficiente se encuentra tabulado para áreas urbanas donde se conoce bien el estado de las superficies, tal como asfalto, veredas, techos, etc. Para el área rural, se recomienda utilizar la metodología propuesta por el Manual de Carreteras del Paraguay (MCP); esta metodología asigna pesos a factores que inciden en el escurrimiento, tal como el relieve, tipo de cobertura, infiltración, almacenamiento, etc.

Tabla 4 Criterios para el cálculo del Coeficiente de Escorrentía

Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28-0,35 Escarpado con pendientes mayores que 30%	0,20-0,28 Cerros con pendientes entre 10 y 30%	0,14-0,20 Con cerros y pendientes entre 5 y 10%	0,08-0,14 Relativamente plano con pendientes menores al 5%
Infiltración	0,12-0,16 Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08-0,12 Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04-0,06 Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura Vegetal	0,12-0,16 Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08-0,12 Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20% del área con buena cobertura	0,06-0,08 Regular a buena;50% del área con praderas o bosques, no más del 50% cultivado	0,04-0,06 Buena a excelente; 90% del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacenamiento Superficial	0,10-0,12 Despreciable, pocas depresiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08-0,10 Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas	0,06-0,08 Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04-0,06 Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos.
Si T > 10 años Amplificar Resultado por: T = 25 ; C x 1,10 T = 50 ; C x 1,20 T = 100 ; C x 1,25				

En base al criterio de la **Tabla 4**, se estiman los valores correspondientes a cada factor según las características del terreno a lo largo de la traza.

2.4.2 Intensidad de precipitación

- Método Racional

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº [illegible]

Las intensidades utilizadas en el Método Racional dependen de la Duración de Tormenta (asumida igual al Tc) y del Tiempo de Retorno adoptado.

- Hidrograma Unitario Triangular

Los datos solicitados por el método son las intensidades en milímetros asociadas a distintas duraciones y periodos de retorno. Las duraciones de tormenta a ser utilizadas dependen del Tiempo de Concentración (Tc) de cada cuenca, con lo cual, se asume una duración de tormenta igual o ligeramente superior al Tc. En la siguiente tabla se muestran los valores de intensidad (en mm) asociados a distintas duraciones de tormenta y distintos periodos de recurrencia.

TABLA 5 INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (MM) PARA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA (ESTACIÓN DE CONCEPCIÓN)

DURACIÓN	TR50	TR100	TR150	Fuente
0:05	25.22	29.03	31.52	IDF
0:15	53.47	61.55	66.82	
1:00	99.14	114.11	123.9	
2:00	121.79	140.18	152.2	
3:00	134.83	155.2	168.51	
6:00	157.34	181.1	196.64	
12:00	210.08	236.35	252.52	Interpolado (log)
24:00	262.82	291.62	308.41	Gumbel
48:00	316.61	351.54	371.9	

Con estos parámetros se crean los hietogramas de diseño que son utilizados en el proceso de transformación lluvia-caudal, luego de computar las abstracciones (pérdidas por infiltración). En la **Figura 4** se muestra como ejemplo un hietograma generado para una duración de tormenta de 3 horas, en intervalos de tiempo de 5 minutos, para un periodo de recurrencia de 50 años.

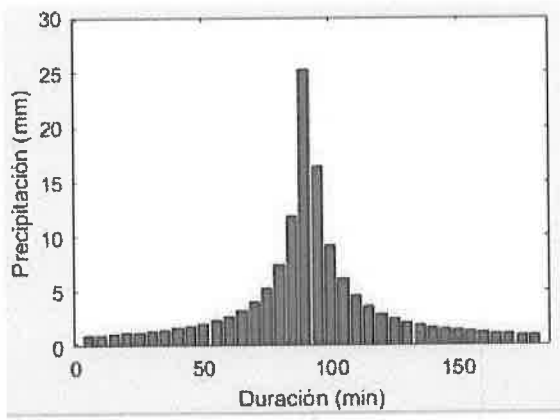


FIGURA 4 HIETOGRAMA DE DISEÑO PARA UNA DURACIÓN DE TORMENTA DE 3 HRS Y UN TR = 50 AÑOS

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

2.4.3 Numero de Curva y Factor Pico

La fuente de información de tipo de suelo en la Región Oriental del Paraguay proviene del "Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra" o PRUT (Banco Mundial & MAG-Paraguay, 1995). Allí, a partir de una serie de muestras relevadas, se clasificó taxonómicamente el suelo. Además, se definieron clases texturales, las cuales fueron utilizadas como base para elaborar un mapa de Grupos de Suelo de acuerdo con criterio mencionado en el Capítulo 7 del "National Engineering Handbook" (USDA - NRCS, 2009) tal como se muestra en las siguientes Figuras.

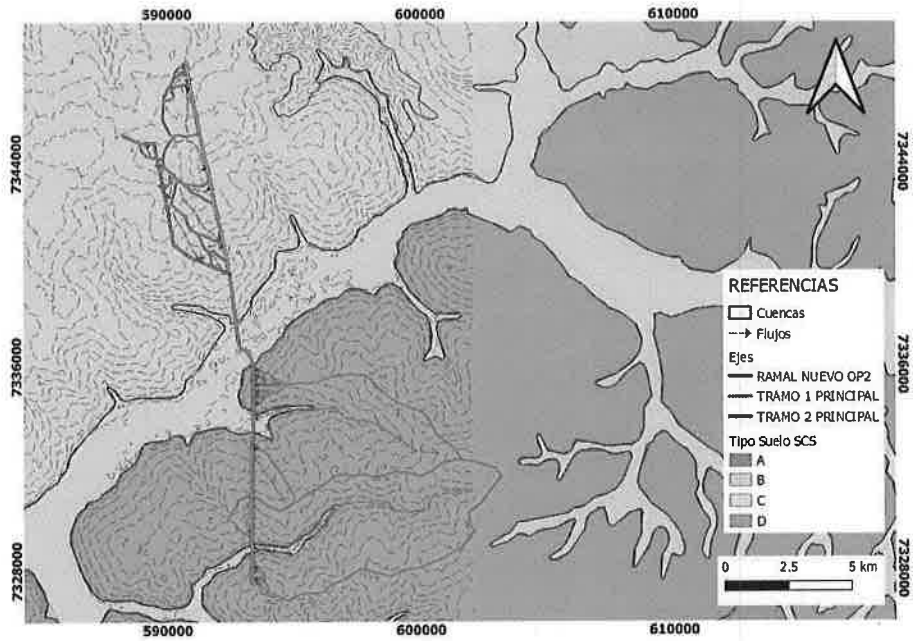


FIGURA 5 TIPO DE SUELO. FUENTE: PRUT.

Otro producto generado en el PRUT fue un mapa de uso posible de la tierra en base a las características del suelo. A partir de este mapa e imágenes satelitales se generó un mapa de uso de suelo (en las siguientes Figuras), que fue reclasificado en base al criterio de Tucci (1993), tal como se muestra en la **Tabla 6**.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

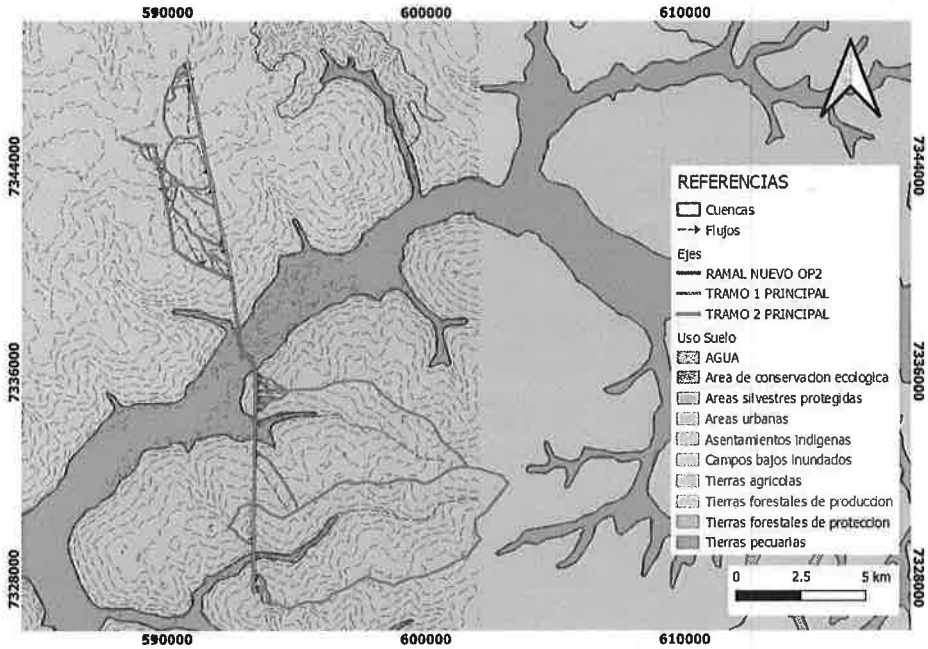


FIGURA 6 USO DE SUELO. FUENTE: PRUT.

TABLA 6 NÚMERO DE CURVA SEGÚN EL CRUCE DE TIPO Y USO DE SUELO

USO ESTIMADO SEGÚN PRUT (Banco Mundial & MAG-Paraguay, 1995)	**RECLASIFICACIÓN** (Tucci, 1993)				
		A	B	C	D
Tierras Agrícolas	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Pecuarias	Chácaras Normais	56	75	86	91
Tierras Forestales de Producción	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Forestales de Protección	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Silvestres Protegidas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas de Conservación Ecológica Especial	Humedales	80	85	90	95
Campos Bajos Inundados	Humedales	80	85	90	95
Asentamientos Indígenas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Urbanas	Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Agua	Agua	100	100	100	100

A continuación, se muestra el mapa de Número de Curva (CN) obtenido del cruce del Tipo y Uso de Suelo.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGIA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº 1003

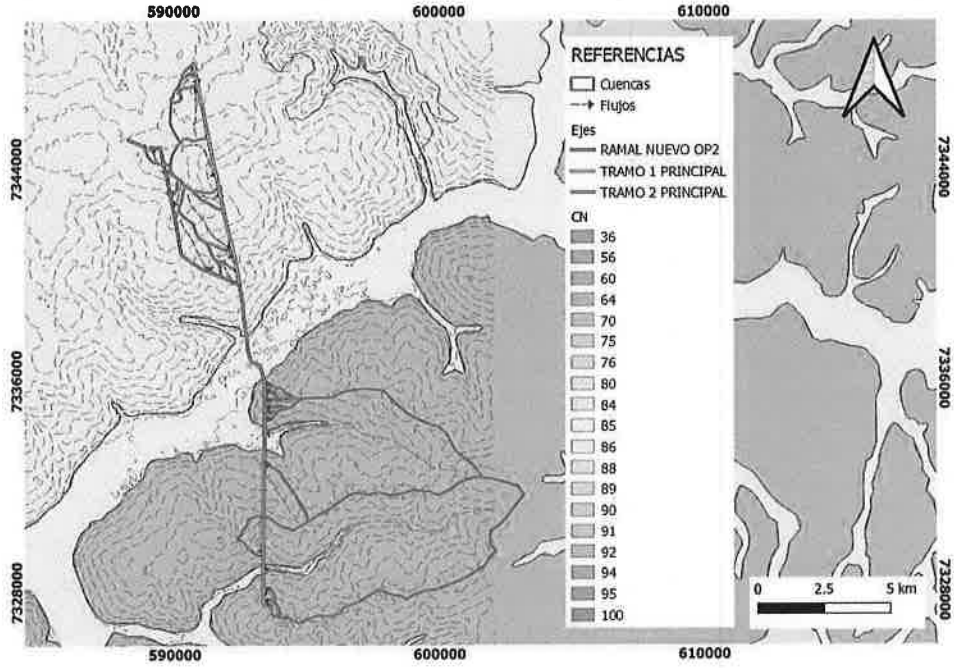


FIGURA 7 NÚMERO DE CURVA.

Además del Número de Curva, otro parámetro de gran importancia para estimar hidrogramas de diseño que representen correctamente los efectos de atenuación que se pueden dar en terrenos con ciertas características de terreno como la pendiente y el grado de impermeabilización es el ***Factor de Pico***. En la siguiente tabla se muestran valores típicos asociados a cuencas con distintas características.

TABLA 7 CRITERIO PARA SELECCIÓN DEL FACTOR DE PICO

DESCRIPCIÓN GENERAL	FACTOR DE PICO
Áreas Urbanas; Pendientes Pronunciadas	575
Valor Típico del SCS	484
Urbano/Rural Mixto	400
Rural, Colinas	300
Rural, Pendientes Leves	200
Rural, Muy Plano	100

Obs: la selección de este factor fue realizado en cada cuenca de acuerdo a una inspección visual de imágenes satelitales, pendiente de las mismas y uso de suelo.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC N° 1791
Reg. MADES N° 1603

2.4.4 Tiempo de Retardo

Para el cálculo del Tiempo de Retardo, primero se calcula el Tiempo de Concentración de la Cuenca con alguna fórmula empírica (en este caso Kirpich Modificada) y luego se utiliza la siguiente relación para calcular el Tiempo de Retardo.

$$Tiempo\ de\ Retardo = 0{,}6\ Tc \qquad (2)$$

El tiempo de concentración de una cuenca es un parámetro necesario para la determinación del caudal, siendo utilizado en la selección de la intensidad máxima de precipitación. El mismo se encuentra en función de la pendiente media, la longitud del cauce, la forma de la cuenca, la cobertura del suelo y en menor escala de otros parámetros fisiográficos.

Existen diversas ecuaciones o metodologías para la determinación del Tc, la mayoría de los cuales fueron desarrolladas de manera empírica para cuencas específicas; por esto se recomienda tomar esta variable con cuidado, y en caso de existir información adicional, ajustar los Tc de forma a obtener caudales que coincidan con la realidad.

Siguiendo las recomendaciones establecidas en el Manual de Carreteras del Paraguay, se toma como mínimo un tiempo de concentración de 10 minutos.

Para este estudio se utiliza la ecuación de KIRPICH MODIFICADA, recomendada en el manual del DNIT (Manual de Hidrología Básica para Estructuras de Drenaje, del Ministerio de Infraestructura y Transportes, Brasil), utilizando la siguiente fórmula:

$$T_c = 1{,}42 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Donde:

TC = tiempo de concentración, en horas.
L= longitud del curso de agua, en km.
H= desnivel máximo, en m.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

2.5 Resultados: Caudales de Diseño

Aplicando los métodos de cálculo expuestos en los apartados anteriores, se generan caudales de diseño para distintos periodos de recurrencia, tal como se muestran en las siguientes Tablas.

Tabla 8 Caudales de diseño estimados por método racional

Cuenca	Long (m)	Área (ha)	Coeficiente C	Tc (hr)	TR diseño	I25 (mm/hr)	I50 (mm/hr)	Q diseño
C10	534	13.7	0.29	0.31	25	168	193	1.9
C20	1349	42.4	0.29	0.67	50	112	129	4.4
C30	1785	214.4	0.29	0.83	50	97	112	19.3
C40	1975	275.0	0.29	0.84	50	97	111	24.7
C50	884	45.8	0.31	0.35	50	158	182	7.2
C60	2736	250.9	0.30	0.92	50	91	105	22.0
C70	687	52.3	0.31	0.30	50	171	196	8.8
C80	1189	30.1	0.33	0.41	50	148	170	4.7
C90	555	14.5	0.34	0.21	50	198	228	3.1
C100	1165	34.6	0.30	0.49	50	134	154	4.4
C110	686	15.8	0.31	0.30	25	171	197	2.3
C120	478	10.9	0.33	0.20	25	204	235	2.0
C140	2621	260.6	0.29	0.98	50	87	101	21.1
C150	1289	97.2	0.31	0.48	50	135	156	13.0
C170	541	19.0	0.33	0.22	50	196	226	3.9
C180	861	21.3	0.30	0.38	50	153	176	3.1
C190	577	28.4	0.38	0.18	50	213	245	7.4
C200	452	7.9	0.35	0.17	25	216	249	1.6
C210	845	26.1	0.31	0.34	50	162	187	4.2
C220	936	36.8	0.29	0.43	50	143	164	4.9
C230	2249	182.2	0.28	1.18	50	77	88	12.5
C240	1052	38.2	0.37	0.29	50	174	201	7.9

Tabla 9 Caudales de diseño estimados por método del hidrograma unitario triangular

Cuenca	Duración Tormenta (hrs)	TR (años)	Área (km2)	Tc (hr)	CN	PRF	Q diseño (m^3/s)
C130	3	100	24.62	2.69	66	200	76
C160	6	100	33.39	3.78	66	150	81

Ing. Jorge Réguelro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

3. HIDRÁULICA

3.1 Alcantarillas transversales

En base a los caudales calculados en el apartado anterior, se estiman las obras de arte (transversales) más adecuadas para los requerimientos actuales del manual de carretera (TR = 50 años para el diseño). Para la readecuación, se optó por evaluar la capacidad de las obras de arte asumiendo que trabajan como canal al 80 % de su capacidad. Esta metodología fue adoptada a modo de brindar un margen de seguridad teniendo en cuenta que no se efectuó un relevamiento de campo y el estudio se limitó exclusivamente a la readecuación de capacidades, salvo en casos puntuales en donde se tornaba evidente la necesidad de agregar nuevas obras.

A continuación, se muestran las capacidades aproximadas para distintas obras de arte trabajando de la forma indicada en el párrafo anterior.

Tabla 10 Obras de arte y capacidades asociadas

Obra	Capacidad (m3/s)
AC3 3,00 x 3,00	79.7
AC2 3,00 x 3,00	56.2
AC2 2,50 x 2,50	33.7
AC3 2,00 x 2,00	28.9
AC1 3,00 x 3,00	26.6
AC2 2,00 x 2,00	18.8
AC3 1,50 x 1,50	14.1
AC2 1,50 x 1,50	9.4
AT3 1,20	7.3
AC3 1,00 x 1,00	5.1
AT2 1,20	4.8
AC1 1,50 x 1,50	4.7
AC2 1,00 x 1,00	3.4
AT2 1,00	3.1
AT1 1,20	2.4
AC1 1,00 x 1,00	1.7
AT1 1,00	1.5
AT1 0,80	0.9

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Herrera, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

Tabla 11 Obras de arte propuestas, adecuadas a requerimientos actuales

		PROYECTO SUJETO DE REVISIÓN			RESULTADOS DE REVISIÓN					
Prog. Aprox.	Tramo	Obra	Q Individual (m3/s)	Q Conjunto (m3/s)	ID de Cuenca	Q Cuenca (m3/s)	Obra Recomendada por Revisión	Capacidad (m3/s)	Recomendación	OBS
0+010	Principal - 1	AC1 1,00 x 1,00	1.7	1.7	10	1.9	AC1 1,00 x 1,00	1.71	Mantener	
0+820	Principal - 1	AC2 1,00 x 1,00	3.4	3.4	20	4.4	AC1 1,50 x 1,50	4.7	Reemplazar	
1+001	Principal - 1	AC2 1,50 x 1,50	9.4	9.4	30	19.3	AC2 2,00 x 2,00	18.8	Reemplazar	
4+320	Principal - 1	AC2 1,50 x 1,50	9.4	9.4			AC3 1,50 x 1,50	14.1	Aumentar celda	
4+880	Principal - 1	-	-	0.0	50	7.2	AC2 1,50 x 1,50	9.4	Agregar	1
7+040	Principal - 1	-	-	9.4	60	22.0	AC2 1,50 x 1,50	9.4	Agregar	
7+080	Principal - 1	AC2 1,50 x 1,50	9.4	9.4	60	22.0	AC3 1,50 x 1,50	14.1	Aumentar celda	
7+460	Principal - 1	AC2 1,00 x 1,00	3.4	8.1	70	8.8	AC2 1,00 x 1,00	3.42	Mantener	
7+560	Principal - 1	AC1 1,50 x 1,50	4.7	8.1	70	8.8	AC1 1,50 x 1,50	4.7	Mantener	
3+944	Principal - 2	AC1 1,50 x 1,50	4.7	4.7	80	10	AC2 1,50 x 1,50	10	Aumentar celda	
4+544	Principal - 2	AC1 1,50 x 1,50	4.7	4.7	100	4.4	AC1 1,50 x 1,50	4.7	Eliminar	2
4+774	Principal - 2	AC1 1,00 x 1,00	1.7	0.0		-	-	-	Eliminar	3
6+745	Principal - 2	AC1 1,00 x 1,00	1.7	0.0	-	-	-	-	Eliminar	4
7+030	Principal - 2	-	-	0.0	140	21.1	AC2 1,50 x 1,50	9.4	Agregar	
7+045	Principal - 2	-	-	0.0	140	21.1	AC3 1,50 x 1,50	14.1	Agregar	
10+468	Principal - 2	-	-	0.0	150	13.0	AC3 1,50 x 1,50	14.1	Agregar	5
11+777	Principal - 2	-	-	0.0	170	3.9	AC3 1,00 x 1,00	5.13	Agregar	6
1+140	ramal	-	-	0.0	190	7.4	AC2 1,50 x 1,50	9.4	Agregar	
2+330	ramal	-	-	0.0	200	1.6	AC1 1,00 x 1,00	1.71	Agregar	
3+140	ramal	-	-	0.0	210	4.2	AC3 1,00 x 1,00	5.13	Agregar	
3+520	ramal	-	-	0.0	220	4.9	AC3 1,00 x 1,00	5.13	Agregar	
6+620	ramal	-	-	0.0	230	12.5	AC3 1,50 x 1,50	14.1	Agregar	
7+860	ramal	-	-	0.0	240	7.9	AC2 1,50 x 1,50	9.4	Agregar	

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tambey

Ing. Benito Pereira, M.Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC N° 1791
Reg. MADES N° I-1003

Observaciones de la tabla

1	*con esta obra se evita llevar por cuneta hasta la prog. 4+300*
2	*derivar por cuneta a la 3+944 (Dimensión: b = 0.8; h = 0.8 m; talud 1:1)*
3	*derivar por cuneta a la 3+944 (Dimensión: b = 0.8; h = 0.8 m; talud 1:1)*
4	*se podría anular, ya que parece más conveniente poner el cruce en la 7+045*
5	*con esta obra se evita llevar por cuneta hasta la prog. 11+000*

Observaciones generales

Como recomendación general para el tramo que se encuentra en media ladera, se sugiere incorporar cunetas no revestidas para pendientes de hasta 3 %, incluyendo disipadores en el caso de pendientes entre 2 y 3 %. Para aquellas pendientes superiores a 3 % se recomienda utilizar cunetas revestidas de hormigón. En tramos muy extenso sin obras de arte, como es el caso desde la 5+000 hasta 3+944, se recomienda utilizar una sección de cuneta b = 0.8; h = 0.8 m; talud 1:1. Se recomienda la misma sección de cuneta para el tramo de la 5+040 hasta la AC6 1,50 x 1,50 m situada en la prog. 5+823 aproximadamente (ver en apartado de puentes cálculos de la alcantarilla séxtuple).

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGIA E HIDRAULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADER Nº 1003

3.2 Puentes

3.2.1 Criterios de Diseño

El diseño del puente desde el punto de vista hidráulico consiste en determinar la longitud y el nivel mínimos que permitirán el correcto escurrimiento del agua durante un evento de precipitación dado. Se presta especial atención a:

- Que no exista interrupción a la vía para el evento de precipitación seleccionado.
- Que el caudal o velocidad del agua no presente efectos adversos sobre la estructura del puente o terraplén de acceso.
- Que el puente o terraplén no presenten efectos adversos sobre el medio ambiente.

Manteniendo presente lo anterior, se procede a simular el efecto de un puente y terraplén en el sitio de emplazamiento, bajo el escenario de un caudal asociado a la precipitación de diseño, el cual fue calculado en el apartado anterior. La simulación del sistema *terraplén + puente* se lleva a cabo con el software de simulación hidráulica HEC RAS, del Cuerpo de Ingenieros de la Ejército de los EEUU (HEC, USACE). Se siguen los procedimientos recomendados en el Manual de Referencia Hidráulica del HEC-RAS para el diseño, así como también del Manual de Carreteras del Paraguay (MCP), el Manual de Puentes, y el documento Bridge Analysis Using HEC-RAS (TP-151).

3.2.2 Modelo hidráulico en HEC RAS

El HEC RAS calcula el N.A. para cada caudal ingresado mediante las ecuaciones de hidráulica que se describen extensa y detalladamente en el Manual de Referencia Hidráulica del programa. Para llevar a cabo estos cálculos el programa requiere:

a. Geometría del Río: longitud, pendiente, forma de la sección transversal
b. Coeficiente de rugosidad: de la Ecuación de Manning, parámetro que representa la capacidad de escurrimiento del agua en el canal.
c. Condición de borde: en los límites del tramo de estudio, como se encuentra el río. En este punto es donde se simulan los dos escenarios para este caso particular: N.A. elevado y N.A. bajas.

Se describen a continuación cada uno de estos elementos.

3.2.3 Geometría del Río

La geometría del río se describe principalmente con datos de relevamiento topográfico. Para el diseño de puentes, entre los principales efectos a estudiar se tiene la angostura del cauce y/o la planicie de inundación por efecto del terraplén del puente, además de otros elementos como las pilas y estribos. Para determinar adecuadamente este efecto, el documento técnico TP-151 citado más arriba describe la forma y lo sitios en los que se debe llevar a cabo el relevamiento topográfico.

En la siguiente figura se muestra un esquema de la disposición de secciones transversales, así como, un esquema en planta del flujo a través del área libre del puente. La primera ST (Sección Transversal) de la izquierda, denominada ST 4 y marcada en círculo por HEC RAS, corresponde a un sitio donde el flujo es aún paralelo a los bordes y no se encuentra alterado por el efecto del terraplén. Las ST 3 y 2 corresponden al flujo totalmente contraído y alterado por el terraplén, mientras que la ST 1 (última de la derecha) corresponde al sitio donde el flujo se ha expandido completamente, abarcando todo el ancho de la ST.

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

Nótese que en todos estos casos la ST abarca todo el ancho del cauce y de la planicie de inundación, la cual en ríos de llanura puede ser de hasta 2,000 metros o más. En la siguiente figura, Lc significa Longitud de Contracción del flujo, y Le Longitud de Expansión. El documento TP-151 contiene criterios para determinar las longitudes Lc y Le; estas en general son del mismo orden que la longitud de la planicie de inundación obstruida por el terraplén. Por ejemplo, para una planicie de inundación de 1,000 m en la cual se plantea un puente de 100 m, la longitud obstruida es de 900 m. En este caso Lc = 900 m, y Le = 1,4 * 900 = 1,320 m.

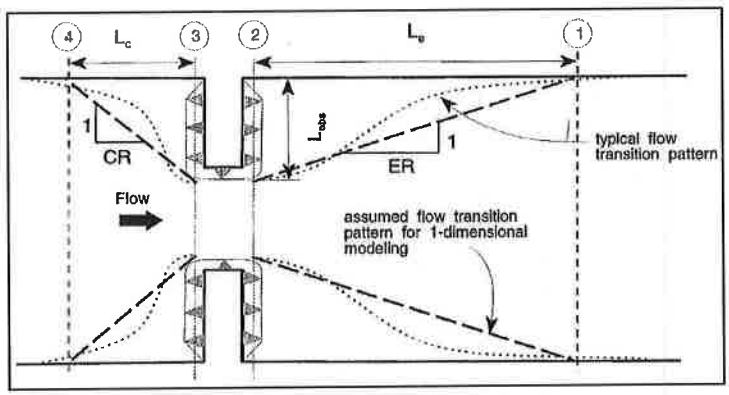


FIGURA 8 CRITERIO PARA UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO DE UN PUENTE. FUENTE: DOCUMENTO TP-151 (HEC-RAS)

El equipo de topografía obtuvo secciones transversales para cada una de las obras, las cuales se muestran en las siguientes figuras.

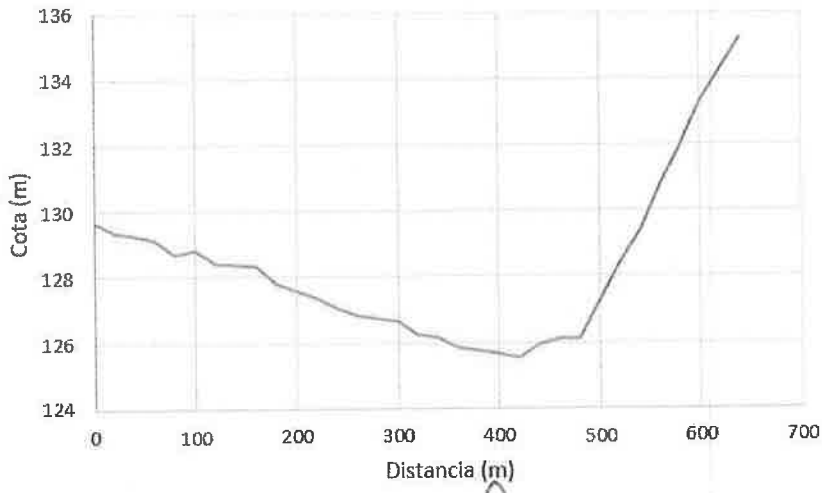


FIGURA 9 SECCIÓN TRANSVERSAL PARA LA OBRA SITUADA EN LA PROG. 5+823

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº L-1003

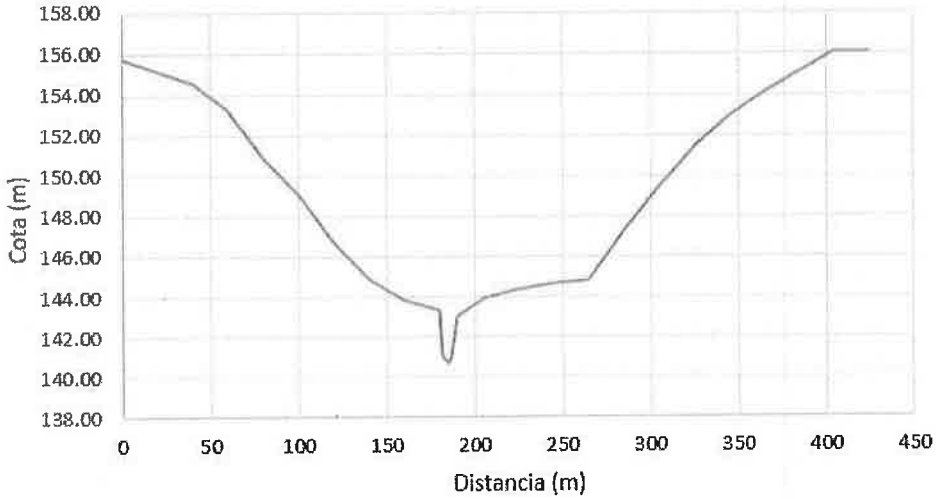


FIGURA 10 SECCIÓN TRANSVERSAL PARA LA OBRA SITUADA EN LA PROG. 11+072

3.2.4 Coeficiente de Rugosidad

Se utiliza el método propuesto por Cowan (1956). Este método considera una serie de factores que representan la rugosidad de un canal y sus planicies de inundación:

$$n = (nb + n1 + n2 + n3 + n4)\, m \qquad (3)$$

Donde:
nb: valor base de *n* para un canal recto, uniforme y de un material determinado.
n1: valor que se adiciona por efectos de irregularidades en el suelo.
n2: valor que se adiciona por la variación de la sección transversal a lo largo del canal.
n3: valor que se adiciona teniendo en cuenta obstrucciones.
n4: valor que se adiciona teniendo en cuenta la vegetación.
m: factor de corrección que tiene en cuenta los meandros existentes.

En las siguientes Tablas se muestran distintos valores de Manning asociados a distintas características de canales y planicies de inundación.

TABLA 12 VALORES DE MANNING PARA CANALES (VEN TE CHOW, 1959)

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Tierra	nb	0.02
	Corte en roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
	Gradual	n2	0

Ing. Jorge Reguero
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

Condiciones del Canal		Valores	
Variaciones de la Sección Transversal	Ocasionalmente Alternante		0.005
	Frecuentemente Alternante		0.01 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n3	0
	Menor		0.01 - 0.015
	Apreciable		0.02 - 0.03
	Severo		0.04 - 0.06
Vegetación	Baja	n4	0.005 - 0.01
	Media		0.01 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.05
	Muy Alta		0.05 - 0.1
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

TABLA 13 VALORES DE MANNING PARA PLANICIES DE INUNDACIÓN (VEN TE CHOW, 1959)

PLANICIES DE INUNDACIÓN	Mínimo	Normal	Máximo
a. Pastizales, sin matorrales			
Pasto Corto	0.025	0.03	0.035
Pasto Alto	0.03	0.035	0.05
b. Áreas Cultivadas			
Sin Cultivo	0.02	0.03	0.04
Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
Campos de cultivo maduros	0.03	0.04	0.05
c. Matorrales			
Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.05	0.07
Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
Pocos matorrales y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.07	0.11
Matorrales medios a densos, en verano	0.07	0.1	0.16
d. Árboles			
Sauces densos, rectos y en verano	0.11	0.15	0.2
Terreno Limpio, con troncos sin retoños	0.03	0.04	0.05
Terreno Limpio, con troncos con retoños	0.05	0.06	0.08
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

PLANICIES DE INUNDACIÓN	Mínimo	Normal	Máximo
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por encima de las ramas	0.1	0.12	0.16

Con base en los criterios expuestos en las tablas anteriores, se aplica el método de Cowan y se estiman valores de Manning que serán utilizados en la modelación de los puentes

TABLA 14 ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD PARA LOS ARROYOS EN ESTUDIO POR EL MÉTODO DE COWAN

Sección Transversal	*nb*	*n1*	*n2*	*n3*	*n4*	*m*	n calculado
Cauce	0.02	0.005	0.005	0	0.005	1	0.035
Planicie	-	-	-	-	-	-	0.1

3.2.5 Condiciones de Borde

Se trata del comportamiento del modelo en sus extremos de aguas arriba y aguas abajo. El programa HEC RAS requiere condiciones de borde en los extremos del sistema estudiado, aguas arriba y aguas abajo. Para aguas arriba se ingresa el caudal calculado en el apartado de hidrología considerando un régimen permanente, y para aguas abajo se utiliza como condición de borde la altura normal.

3.2.6 Resultados obtenidos

Una vez implementado el modelo con la geometría y parámetros mencionados más arriba, se analiza la incorporación de distintos tipos de obras de arte. Para la progresiva 5+823 se analiza una AC6 2.50 x 2.50 m, teniendo en cuenta que no existe un cauce propiamente dicho pero el caudal de diseño calculado requiere una obra de paso generosa. Por otro lado, para la progresiva 11+072 se plantea la incorporación de un puente de 12 metros de longitud.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para dos escenarios simulados. En el caso de la alcantarilla, el Manual de Carreteras del Paraguay (MCP) permite que la misma trabaje ahogada hasta 30 cm en la entrada. Por otra parte, en el caso de los puentes, la normativa española para carreteras permite que la sobre-elevación del nivel de agua causada por la obstrucción de un puente con respecto a una condición natural (sin puente) debe ser inferior a 50 cm para zonas rurales. Puede verse en la siguiente tabla que esta sobre-elevación es relativamente baja (36 cm aprox.), con lo cual se considera adecuada la dimensión del puente.

TABLA 15 RESULTADOS PARA LAS PROGRESIVAS ANALIZADAS

Progresiva	Obra	Q Tr 100 años (m^3/s)	N.A. Aguas Arriba	Sobre-Elevación
5+823	AC6 2.50 x 2.50 m	87	128.13	-
11+072	Puente de 12 m	97	144.60	0.36

Ing. Jorge Regueira
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003

Teniendo en cuenta los resultados del presente estudio, se considera adecuada una longitud de 12 metros para el caso del puente a situarse en la progresiva 11+072. En las siguientes figuras se pueden observar la sección transversal y longitudinal del primer escenario simulado.

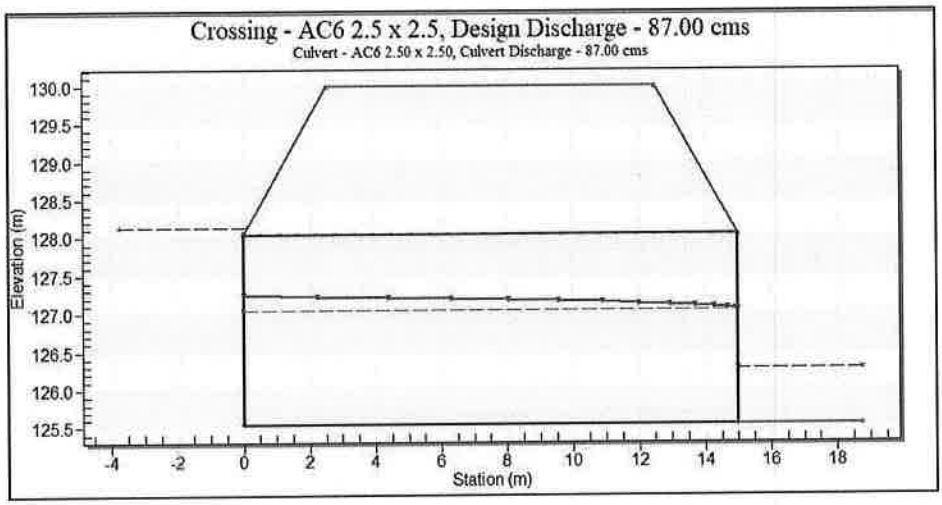


FIGURA 11 AC6 2.50 X 2.50 M EN LA PROGRESIVA 5+823

En caso de necesidad, esta alcantarilla séxtuple puede ser redistribuida en grupos, siempre y cuando las celdas totalicen 6.

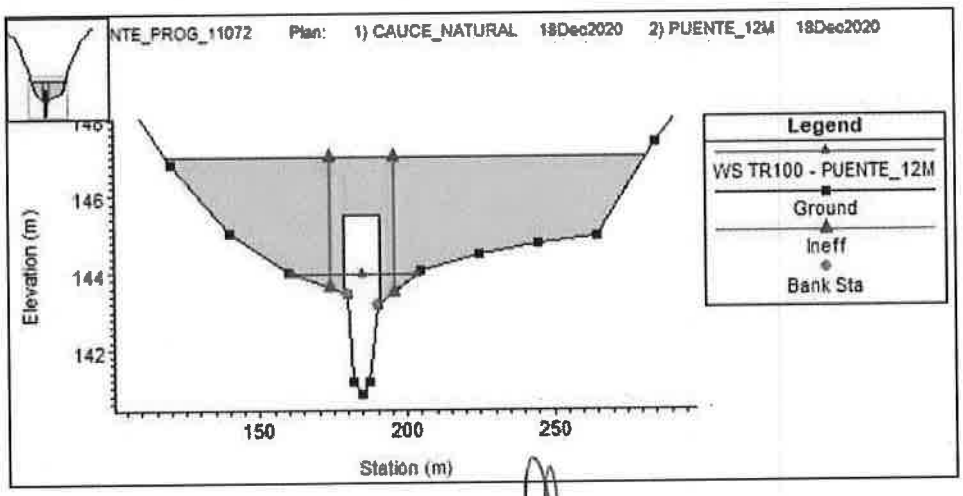


FIGURA 12 SECCIÓN TRANSVERSAL PARA UN PUENTE DE 12 METROS EN LA PROG. 11+072

Ing. Jorge Regueiro
CONSORCIO
Río Tembey

Ing. Benito Pereira, M. Sc.
ESPECIALISTA EN HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
Reg. MOPC Nº 1791
Reg. MADES Nº I-1003