



# PROYECTO BRASPINE

## INFORME DE ESTUDIO DE INUNDABILIDAD

**Julio 2024**

Revisión	Fecha	Responsables elaboración	Responsable de aprobación	Comentarios
0	12/07/2024	AR	VR	Emisión Inicial
1				
2				
3				

# Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. ESTUDIO HIDROLÓGICO .....	4
2.1. Cuencas de aporte.....	4
2.2. Tiempo de concentración.....	5
2.3. Tormenta de diseño .....	5
2.4. Calculo de los caudales.....	8
2.4.1. Método Racional .....	9
2.4.2. Método NRCS.....	9
2.5. Resultados .....	13
3. ESTUDIO HIDRÁULICO .....	14
3.1. Descripción del sistema de modelación HEC-RAS.....	14
3.2. Esquematización del modelo .....	14
3.2.1. Geometría .....	14
3.2.2. Condiciones de borde .....	17
3.3. Resultados de la simulación .....	18
3.3.1. Escenario actual .....	18
4. CONCLUSIONES .....	20



## 1. INTRODUCCIÓN

En este estudio se evalúa la inundabilidad del padrón N° 7.940 y parte del padrón N° 15.817 del departamento de Tacuarembó (ubicado próximo a la Ruta Nacional N° 5 y al norte de la localidad de Echeverry) con miras a su reclasificación como predio suburbano.

El predio presenta cobertura de suelo natural y dos cursos de agua, cañada Sin Nombre Oeste y cañada Sin Nombre Este, que atraviesan su extensión. En la figura a continuación se presenta la ubicación de los padrones.

**Figura 1-1 Ubicación del padrón N° 7.940 y N°15.817**



El estudio comprende la modelación hidrológica e hidráulica de las cañadas involucradas, en la situación actual como predio rural.

Este informe se divide en 4 capítulos, incluyendo esta introducción. El capítulo 2 incluye el estudio hidrológico del predio y las cañadas. El capítulo 3 incluye los estudios hidráulicos para la situación actual, y en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del estudio.

## 2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

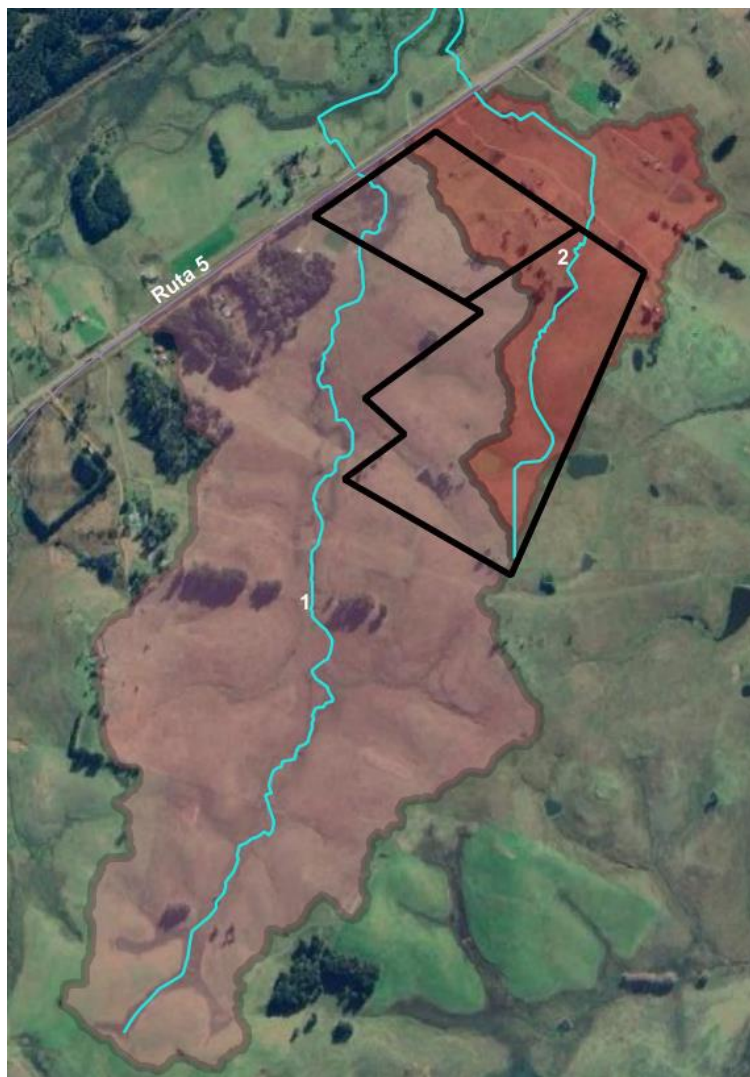
### 2.1. Cuencas de aporte

Se definieron dos cuencas de aporte al predio de estudio:

- Cuenca 1: cuenca externa de aporte a la Cañada Sin Nombre Oeste
- Cuenca 2: cuenca externa de aporte a la Cañada Sin Nombre Este

Las cuencas fueron delimitadas utilizando el modelo digital de terreno rural de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDEuy). En la figura y tabla a continuación se presentan las cuencas consideradas.

**Figura 2-1 Cuencas de aporte**



**Tabla 2-1 - Características físicas de las cuencas de aporte**

Cuenca	Área (ha)	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)
1	160	2753	29.28	0.00106
2	40	1552	27.7	0.00178

## 2.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es por definición el tiempo que demora en llegar el agua desde el punto más lejano de la cuenca a su punto de cierre. Es de especial importancia para el diseño de una tormenta sintética de evento extremo por dos motivos: por un lado, determina la duración de la tormenta asociada al evento, y por otro, determina la forma del hidrograma sintético.

Para la determinación del tiempo de concentración se utiliza la fórmula de Kirpich.

$$t_c = 0,4 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$$

Siendo:

- $t_c$  = tiempo de concentración (horas)
- $L$  = largo del cauce (km).
- $S$  = pendiente del cauce en (%)

**Tabla 2-2 Tiempo de concentración**

Cuenca	Tiempo de concentración (hs)
1	0.85
2	0.45

## 2.3. Tormenta de diseño

Las tormentas de diseño fueron construidas mediante el Método de Bloque Alterno, recomendado en el manual “Diseño de Aguas Pluviales Urbanas” de la Dirección Nacional de Agua y Saneamiento (en adelante, DINASA)<sup>1</sup>.

Este método supone que la tormenta se divide en intervalos de tiempo donde la intensidad de la lluvia se asume constante. En este caso se considera una tormenta de duración igual a 2 veces el tiempo de concentración, la cual se discretiza en doce bloques, de duración aproximadamente un séptimo del tiempo de concentración de la cuenca, donde la máxima

<sup>1</sup> Esta Dirección Nacional actualmente lleva el nombre de Dirección Nacional de Agua (en adelante, DINAGUA)

intensidad de precipitación se ubica en el centro y las restantes en orden decreciente se van alternando a cada lado.

La tormenta utilizada para el estudio corresponde a la tormenta de diseño de 100 años de período de retorno (en adelante,  $Tr$ ).

Para el armado de las tormentas se empleó la información disponible de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (en adelante, curvas IDF), realizadas por Rodríguez Fontal. Las mismas permiten conocer la precipitación máxima esperada  $P(3,10,p)$ , para un evento de 3 horas de duración y  $Tr$  igual a 10 años. Para obtener la precipitación máxima para otros periodos de retorno, duraciones de tormentas y áreas de cuencas se deben aplicar las siguientes correcciones, según IMFIA, 2012:

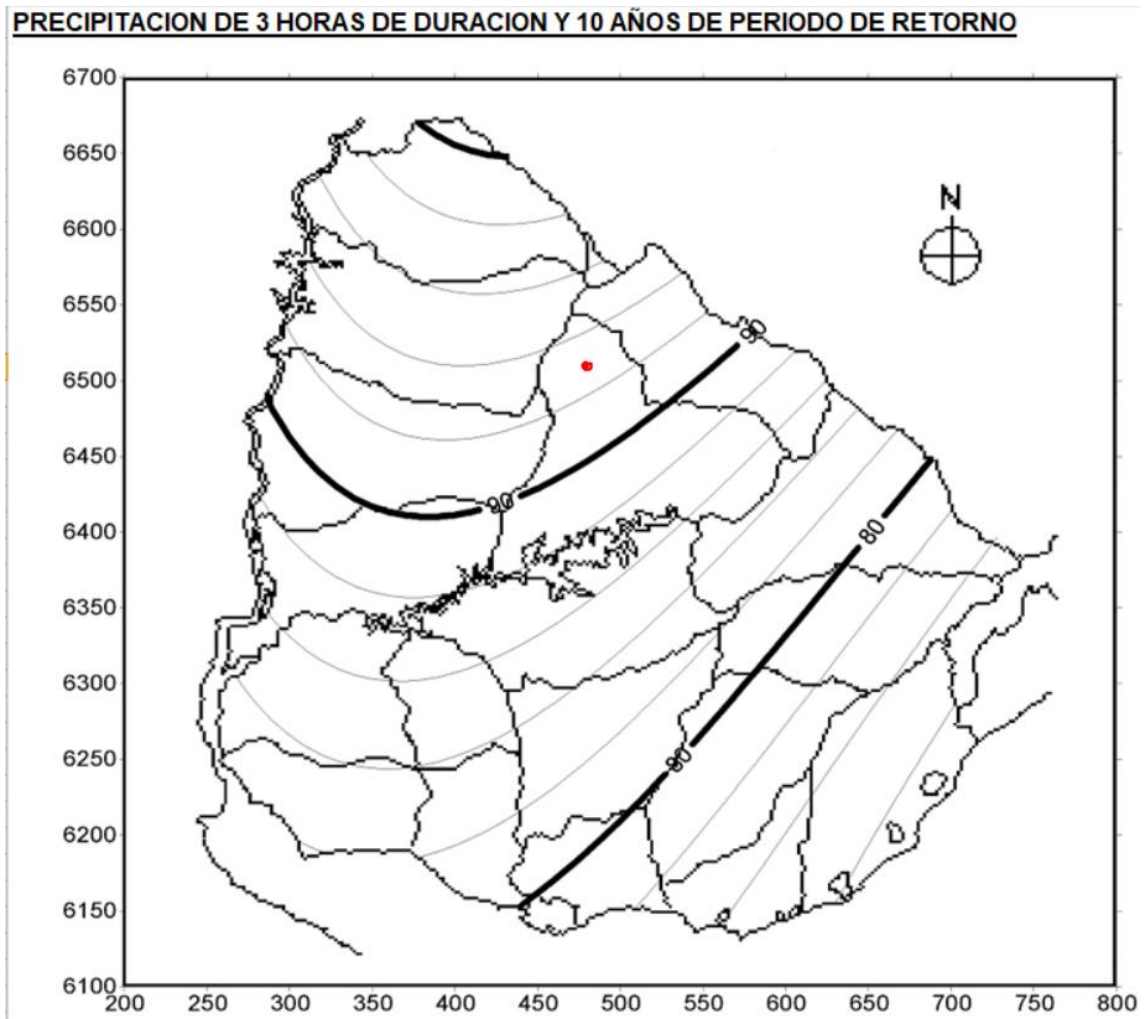
$$P(d, Tr, p) = P(3,10, p) \cdot CT(Tr) \cdot CD(d) \cdot CA(Ac, d)$$

Siendo:

- $P(3,10,p)$  = precipitación máxima esperada para un evento de 3 horas de duración y  $Tr$  10 años
- $Tr$  = período de retorno (años)
- $d$  = duración (h)
- $Ac$  = área de la cuenca ( $Km^2$ )
- $CT(Tr) = 0.5786 - 0.4312 \log \left[ \ln \left( \frac{Tr}{Tr-1} \right) \right]$
- $CD(d) = \frac{0.6208 \cdot d}{(d+0.0137)^{0.5639}}$  , para  $d < 3hs$
- $CD(d) = \frac{1.0287 \cdot d}{(d+1.0293)^{0.8083}}$  , para  $d > 3hs$
- $CA(Ac, d) = 1 - (0.3549 \cdot d^{-0.4272}) \cdot (1 - e^{(-0.005792 Ac)})$

Para la ubicación de las cañadas en la zona de estudio se consideró una  $P(3,10,p)$  igual a 93 mm, según se puede ver en la siguiente figura.

Figura 2-2 Isoyetas precipitación máxima en 3 horas y 10 años de periodo de retorno para la zona de estudio



En las siguientes figuras se muestran las tormentas de diseño para las dos cañadas.



Figura 2-3 Tormentas de diseño TR 100 - Cañada Oeste

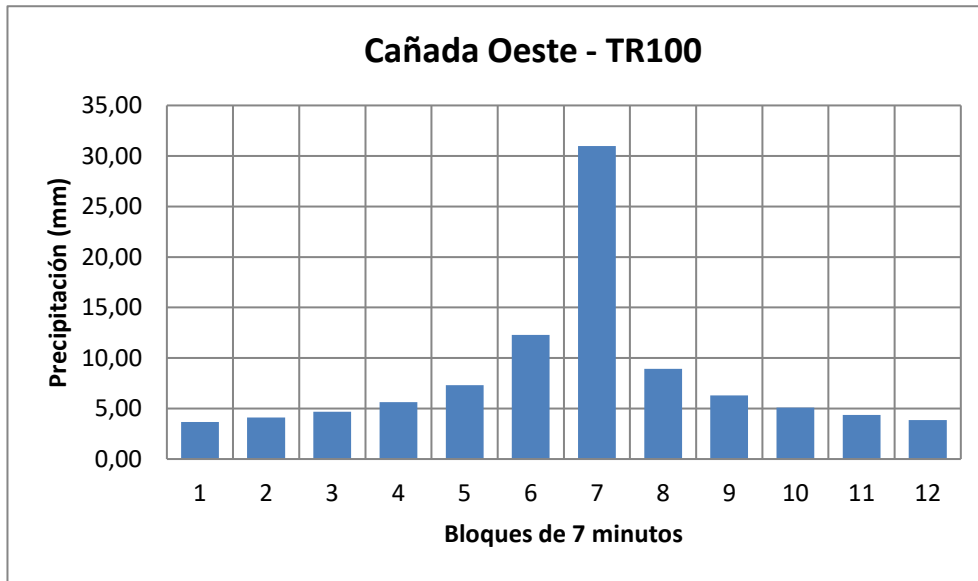
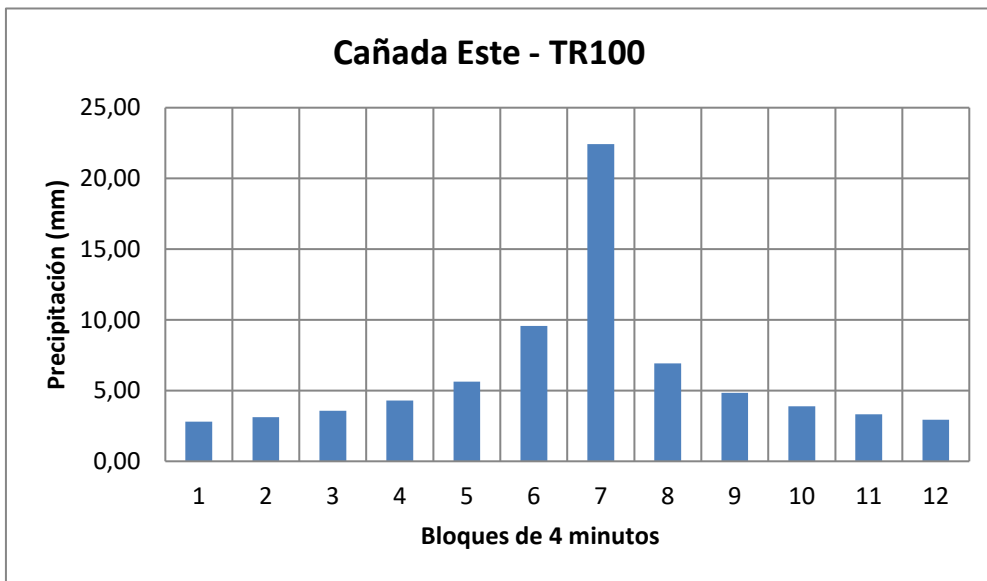


Figura 2-4 Tormentas de diseño TR 100 - Cañada Este



## 2.4. Cálculo de los caudales

La metodología utilizada para la transformación de la precipitación en caudal depende de las características de las cuencas de estudio. En este caso se consideró para el cálculo del hidrograma asociado a las Cuencas 1 y 2 el método del NRCS (ex. SCS) que considera como parámetro el número de curva (NC) y el método Racional que posee como parámetro el coeficiente de escorrentía (C). De entre ellos se tomó el que dé el mayor caudal para el posterior estudio hidráulico.

### 2.4.1. Método Racional

El producto de la intensidad de lluvia  $i$  y el área de la cuenca  $A$  es el caudal de entrada al sistema,  $iA$ , y la relación entre este caudal y el caudal pico  $Q_{max}$  se conoce como el coeficiente de escorrentía  $C$  ( $0 \leq C \leq 1$ ).

$$Q_{max} = C * I * A / 360$$

dónde:

- $Q_{max}$  = caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)
- $C$  = coeficiente de escorrentía
- $i$  = intensidad uniforme en toda la cuenca para una duración igual al tiempo de concentración (mm/h)
- $A$  = área de la cuenca (Ha)

#### 2.4.1.1. Cálculo del coeficiente de escorrentía

Para el cálculo del  $C$  del Método Racional se tomó como referencia los valores presentes en la tablas 15.1.1, Hidrología Aplicada, Chow, 1994. Se consideró  $C = 0.49$  para superficie de pastizales con pendientes 2 – 7 % y  $C = 0.95$  para superficies impermeables, siendo ambos para un periodo de retorno TR100.

Como ambas cuencas son en su totalidad pastizales, el  $C$  de ambas cuencas para el método racional es  $C = 0.49$ .

### 2.4.2. Método NRCS

#### 2.4.2.1. Cálculos de los números de curva

##### a) Unidad de suelo

Para el cálculo del Número de Curva lo primero que se estudió fue en que Unidad del Suelo se ubican las cuencas de estudio. Se obtuvo que la cuenca 1 es predominantemente tipo C mientras que la cuenca 2 es predominantemente tipo D.

En las tablas a continuación se presentan las distintas unidades de suelo y su grupo hidrológico asociado y porcentaje de ocupación, para las diferentes cuencas.

**Tabla 2-3 Unidades de suelo, GH y porcentaje de ocupación en cuenca Cañada Oeste (1)**

UNIDAD	GH	Porcentaje de área ocupado en la cuenca (%)
Tacuarembó	C	95.85%
Rio Tacuarembó	D	4.15%

**Tabla 2-4 Unidades de suelo, GH y porcentaje de ocupación en cuenca Cañada Este (2)**

UNIDAD	GH	Porcentaje de área ocupado en la cuenca (%)
Tacuarembó	C	7.92%
Rio Tacuarembó	D	92.08%

**b) Categorización del suelo**

El uso de suelo fue obtenido del Mapa de Cobertura de Suelos del Uruguay del MGAP, los cuales fueron asociados con las categorías de uso de suelo presentadas en el manual de la DINASA, con el fin de determinar el parámetro de número de curva para cada cuenca de aporte.

En las tablas a continuación se presentan las distintas unidades de suelo y su grupo hidrológico asociado y porcentaje de ocupación, para las diferentes cuencas.

**Tabla 2-5 NC asociado a cada cobertura/uso del suelo para la cuenca 1**

GH	B		D		C	
	% área ocupada	NC	% área ocupada	NC	% área ocupada	NC
Aguas Artificiales	0%	100	0%	100	0%	100
Arbustos	0%	58	0%	78	0%	71
Área Urbana	0%	92	0%	95	0%	94
Áreas Desnudas	0%	86	0%	94	0%	91
Áreas Urbanas Dispersas	0%	70	0%	85	0%	80
Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	0%	86	0%	94	0%	91
Cultivos > 4-5 ha	0%	75	0%	87	0%	83
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 ha	0%	78	4.16%	89	93.23%	85
Equipamiento Urbano	0%	85	0%	92	0%	90
Frutales	0%	78	0%	89	0%	85
Herbáceo Natural	0%	69	0%	84	0%	79
Monte Nativo	0%	60	0%	79	0%	73
Plantación Forestal	0%	60	0%	79	2.61%	73

**Tabla 2-1 NC asociado a cada cobertura/uso del suelo para la cuenca 2**

GH	B		D		C	
	% área ocupada	NC	% área ocupada	NC	% área ocupada	NC
Aguas Artificiales	0%	100	0%	100	0%	100
Arbustos	0%	58	0%	78	0%	71
Área Urbana	0%	92	0%	95	0%	94
Áreas Desnudas	0%	86	0%	94	0%	91
Áreas Urbanas Dispersas	0%	70	0%	85	0%	80
Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	0%	86	0%	94	0%	91
Cultivos > 4-5 ha	0%	75	0%	87	0%	83
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 ha	0%	78	92.08%	89	7.92%	85
Equipamiento Urbano	0%	85	0%	92	0%	90
Frutales	0%	78	0%	89	0%	85
Herbáceo Natural	0%	69	0%	84	0%	79
Monte Nativo	0%	60	0%	79	0%	73
Plantación Forestal	0%	60	0%	79	0%	73

A partir de los datos anteriores se determina para cada cuenca de aporte un NC global ponderando según el uso de suelo. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos.

**Tabla 2-7 Número de curva**

Cuenca	NC
1	84.9
2	88.7

#### 2.4.2.2. Hidrogramas de diseño

Para cada cuenca fue construido un Hidrograma Unitario de acuerdo con sus características de tiempo de concentración y área según la metodología del NRCS presentada en el manual de DINASA.

En base a esta metodología, se calculó el hidrograma unitario de duración igual al tiempo de concentración, el cual consiste en un hidrograma triangular con las siguientes características:

$$t_p = \frac{D}{2} + 0,6 \times t_c$$

$$t_b = 2,667 \times t_p$$

$$q_p = \frac{0,208 \times A}{t_p}$$

Donde:

- $t_p$  es el tiempo del pico del hidrograma (horas)
- $D$  es la duración del bloque de precipitación (horas)
- $t_c$  es el tiempo de concentración (horas)
- $t_b$  es el tiempo base (horas)
- $q_p$  es el caudal pico del hidrograma ( $m^3/s$ )
- $A$  es el área de la cuenca ( $km^2$ )

Posteriormente, aplicando las propiedades de linealidad y superposición, se multiplica el hidrograma unitario obtenido por cada incremento de escurrimiento y se suman los hidrogramas desfasándolos en el tiempo.

De esta manera se obtiene un Hidrograma correspondiente a la tormenta de diseño cuya integral en el tiempo es igual al volumen escurrido en dicha tormenta proveniente de la cuenca.

Las siguientes figuras muestran los hidrogramas de salida para ambas cuencas con un periodo de retorno de 100 años

**Figura 2-3 Hidrograma cuenca 1.**

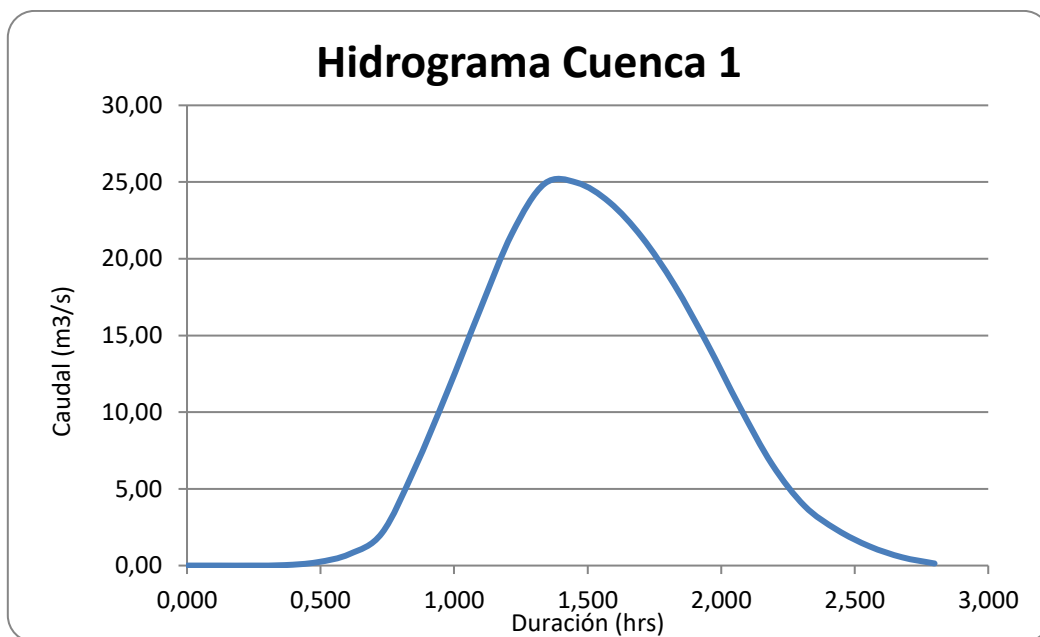
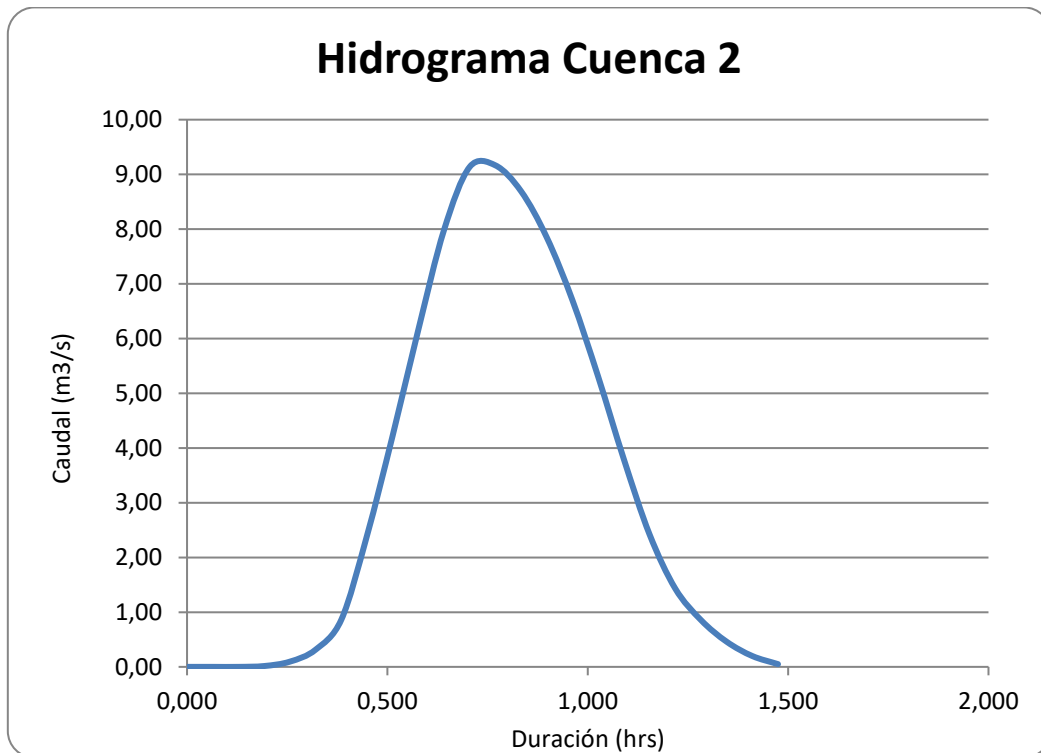


Figura 2-4 Hidrograma cuenca 2.



## 2.5. Resultados

De la aplicación de ambos métodos se obtuvieron los caudales asociados a la cuenca de vertido para ambas cañadas. El caudal tomado para el posterior estudio hidráulico es el mayor de entre los dos métodos para cada cuenca.

En la siguiente tabla se presentan los valores de los caudales obtenidos por cada método y por cuenca.

Tabla 2-8 Caudales por cuenca y método

Cuenca	Q M.Racional (m3/s)	Q NRCS (m3/s)
1	19.64	24.96
2	7.03	9.17

### 3. ESTUDIO HIDRÁULICO

#### 3.1. Descripción del sistema de modelación HEC-RAS

A los efectos de simular el comportamiento hidrodinámico, se realizó una modelación unidimensional del cuerpo de agua, la cual se realizó utilizando el programa HEC-RAS 6.5 desarrollado por el US Army Corps of Engineers, y distribuido en forma libre.

El HEC-RAS es un sistema de modelación hidrodinámica diseñado para simular el flujo unidimensional en redes de canales naturales y artificiales a superficie libre, y ha sido extensamente testado. El sistema contiene cuatro componentes principales para el análisis hidráulico de las conducciones:

- Cálculo del perfil de la superficie libre para flujo estacionario.
- Simulación de flujo no estacionario.
- Cálculo de transporte de sedimentos con lecho móvil.
- Análisis de calidad de agua.

El elemento clave del sistema de modelación es que los cuatro componentes utilizan el mismo modelo físico y las mismas rutinas para el cálculo hidráulico y geométrico. Además, el sistema contiene varias utilidades para diseño de estructuras hidráulicas, que pueden ser invocadas una vez que los perfiles básicos de la superficie libre hayan sido calculados.

#### 3.2. Esquematización del modelo

##### 3.2.1. Geometría

###### a) Dominio del modelo

Se arma un modelo unidimensional compuesto aproximadamente por un tramo de 1.18km de longitud de la Cañada Oeste y un tramo de aproximadamente 1.26 km de longitud para la Cañada Este.

El límite aguas arriba se escogió lo suficientemente alejado de la ubicación de la ruta 5 para que los efectos de borde de las alcantarillas no afecten los resultados, procurando abarcar completamente la zona de implementación de forma de poder evaluar la afectación de la obra sobre el mismo. Como límite aguas abajo se consideró un punto suficientemente alejado para no afectar numéricamente los resultados.

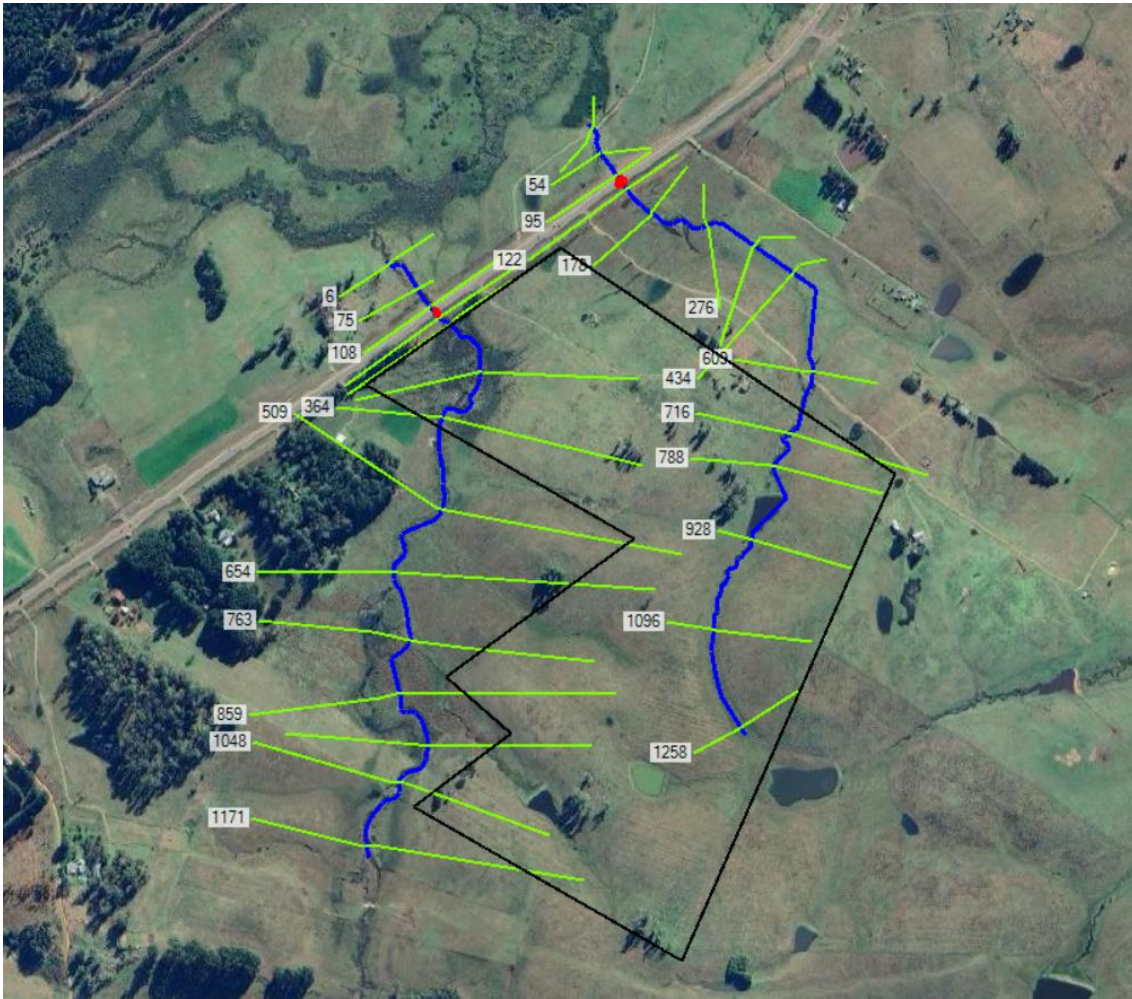
###### b) Secciones transversales

Se consideró el relevamiento topográfico realizado en el marco del presente proyecto, a partir del cual se generó un modelo de elevación del terreno (MDT) que fue introducido en el HEC-RAS para el diseño de las secciones transversales.

Todos los niveles del presente documento están referidos al cero oficial.

En la figura a continuación se presenta la ubicación de los puntos relevados en el marco del proyecto y secciones transversales consideradas.

Figura 3-1 Secciones transversales y puntos relevados



c) **Alcantarilla Cauce Oeste**

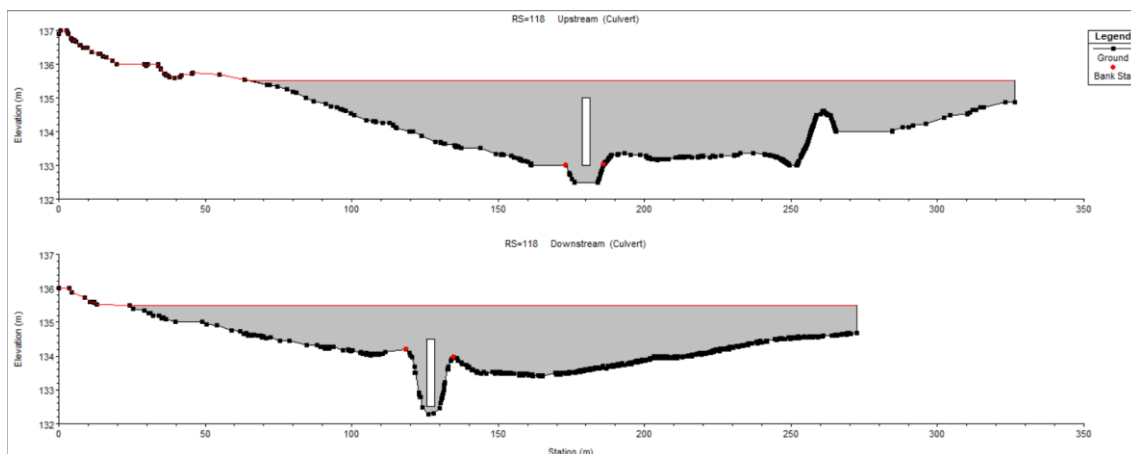
Las características generales de la alcantarilla son las siguientes:

- Longitud total: 15.5 m
- Número de bocas: 1
- Tipo de geometría: Rectangular
- Dimensiones: 2.8 m de ancho y 2m de altura.

La siguiente figura muestra la esquematización del puente nuevo en el modelo HEC-RAS:



**Figura 3-2 Esquematzación del puente actual en el modelo HEC-RAS**



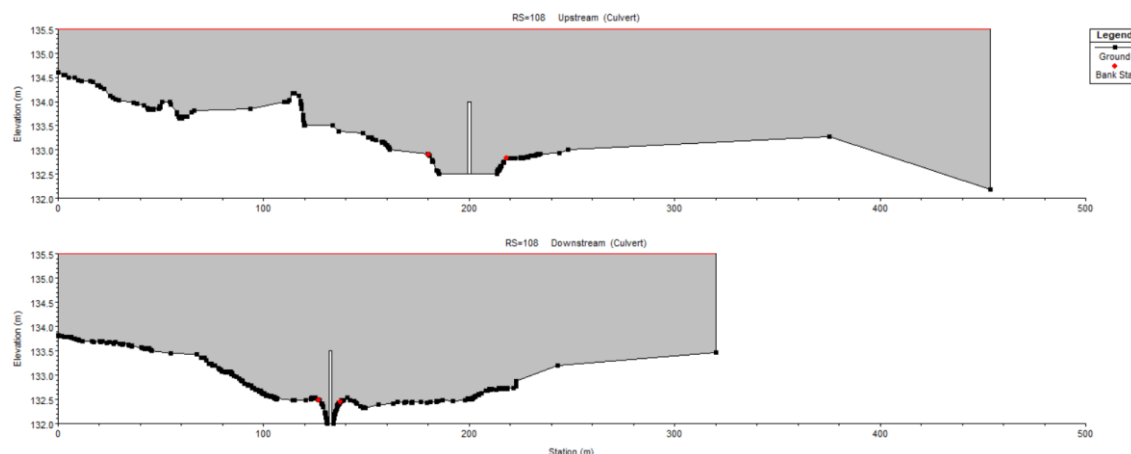
**d) Alcantarilla Cauce Este**

Las características generales de la alcantarilla son las siguientes:

- Longitud total: 15.5 m
- Número de bocas: 1
- Tipo de geometría: Rectangular
- Dimensiones: 1.5m de ancho y 1.5 de altura.

La siguiente figura muestra la esquematización del puente nuevo en el modelo HEC-RAS

**Figura 3-3 Esquematzación del puente actual en el modelo HEC-RAS**



**e) Rugosidades**

Ante la imposibilidad de calibrar el modelo, dada la falta de datos de nivel observados, se utilizaron rugosidades de bibliografía (n de Manning), según recomendaciones del “Open-Channel Hydraulics” (Chow, 1959), en base a fotografías del sitio e imágenes aéreas, tanto para el cauce principal como para la planicie de inundación.

Tanto en planicie como en cauces se adoptó un valor uniforme de  $n = 0.1$ .

Este criterio asumido es conservativo por lo que los resultados obtenidos se encontrarán del lado de la seguridad.

### **3.2.2. Condiciones de borde**

Las condiciones de borde impuestas al modelo son:

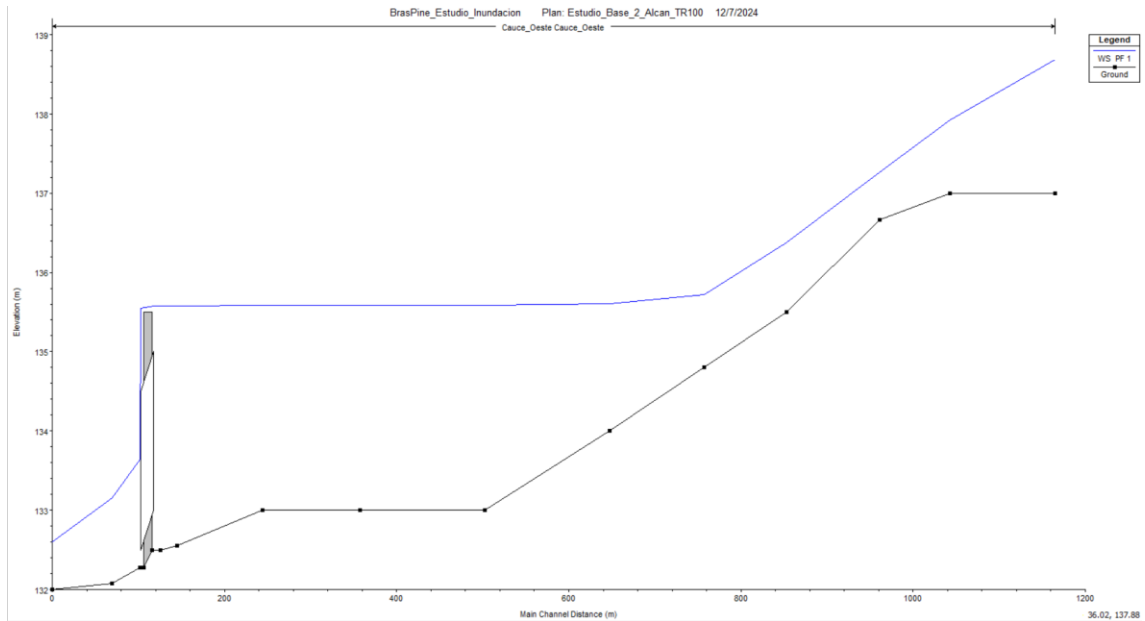
- Aguas arriba: se consideran los hidrogramas de TR100.
- Aguas abajo: se asume la condición de tirante normal posterior al cruce de las alcantarillas.

### 3.3. Resultados de la simulación

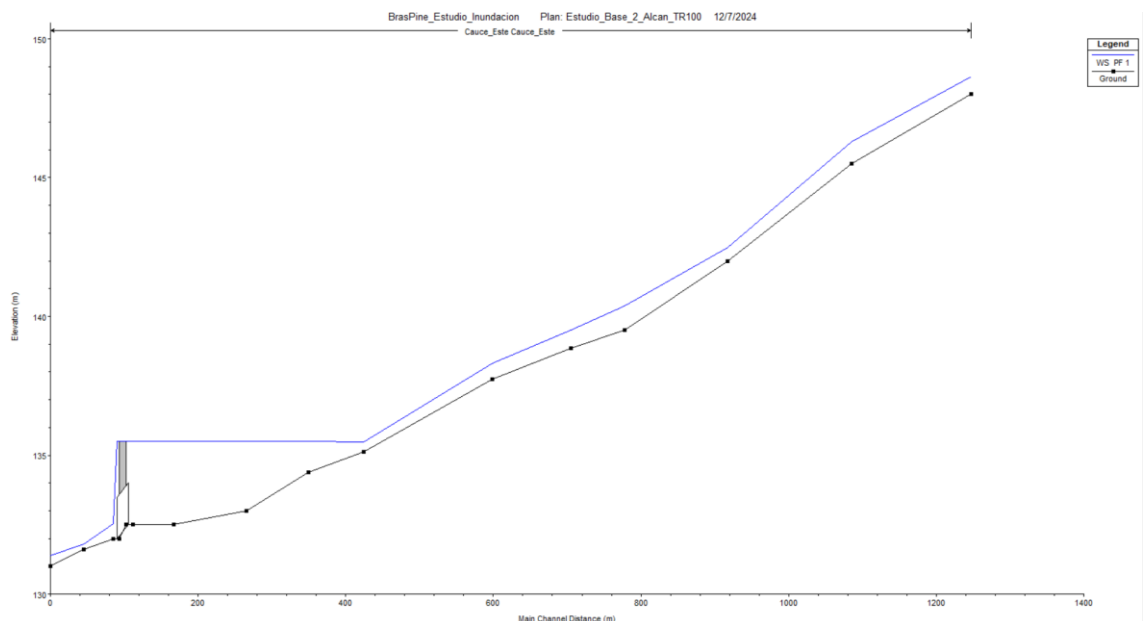
#### 3.3.1. Escenario actual

Las siguientes figuras muestran los perfiles longitudinales de los cauces, los resultados de la simulación corresponden a los niveles máximos, para Tr 100 años.

**Figura 3-4 Resultado de la simulación situación actual  
Perfil longitudinal de niveles máximo para Tr 100 años Cañada Oeste**



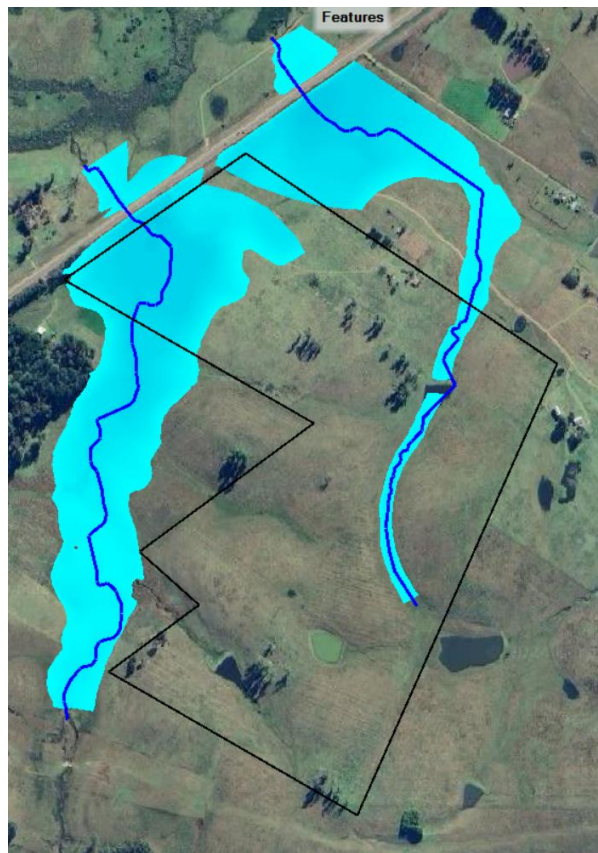
**Figura 3-5 Resultado de la simulación situación actual  
Perfil longitudinal de niveles máximo para Tr 100 años Cañada Este**



A partir de la simulación realizada, se obtiene como resultado que las cotas de inundación máxima alcanzan 135.6m y 135.5 m para las cañadas Oeste y Este respectivamente. Estos niveles son, principalmente consecuencia de la restricción al flujo impuesta por las alcantarillas bajo la Ruta 5, provocando un represamiento aguas arriba de las mismas, tal cual se ve en el perfil longitudinal. Adicionalmente, la topografía plana próxima a la ruta, contribuye a que la extensión de la mancha sea mayor en dicha zona.

En la siguiente figura se muestra la mancha de inundación asociados a un evento Tr 100 para ambos cauces.

**Figura 3-6 Resultado de la simulación situación actual  
Mancha de inundación para ambos cauces**



#### 4. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio hidrológico de las cuencas asociadas a las cañadas Este y Oeste, y el estudio hidráulico de las mismas en la situación actual sometidas a un evento de Tr 100, con el objetivo de analizar las cotas de inundabilidad del predio.

Los resultados obtenidos para la situación actual dan que la zona más afectada por las crecidas de las cañadas se encuentra sobre el Padrón N° 7.940. En esta zona la cota de inundación máxima es de **135.6m**.