UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Caracterización Hidrológica del Arroyo Picún Leufú para el diseño de un puente de uso civil para la localidad de la Villa Puente Picún Leufú

Proyector Integrador Profesional

Alumnos:

Losso, Federico Javier – N° Leg: 104.229

Storani, Elena Mariel – N° Leg: 102.876

ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
para acceder al título de

INGENIERO CIVIL e INGENIERA CIVIL

Dirección de tesis:

Prof. Mg. Ing. Rapacioli, Raúl Ángel

Co Dirección de tesis:

Ing. Losso, Rodolfo

Neuquén, Agosto 2020

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia por el apoyo incondicional y contención durante esta etapa de aprendizaje y superación para obtener el título de Ingeniera que tanto anhelo. En especial quiero agradecer a mi mamá Elida por incentivarme, enseñarme a siempre superarme y derribar mis límites. A mi papá Sergio, por aconsejarme e interesarse siempre en mi progreso. A mi hermana Mariana y mi hermano German, por su aliento y confianza incondicional.

Agradezco a mi profesor, director y amigo Mg. Ing. Raúl Rapacioli por confiar siempre en mí, enseñarme, inspirarme y haberme impulsado a seguir por este camino, representando un pilar importante en el desarrollo de este proyecto y en mi formación como profesional.

Agradezco a mi compañero de estudio, de proyecto y amigo Federico por hacer posible este proyecto, por su dedicación, compromiso y apoyo.

Agradezco a la Universidad Nacional del Comahue, a la Educación Pública que tanto valoro por hacer posible que hoy pueda concretar mis estudios en la carrera de grado. Y a cada uno de los docentes que he tenido durante este recorrido por su enseñanza y dedicación.

Agradezco a mis amigas y amigos que esta etapa me regalo y me acompañaron e hicieron este recorrido fantástico.

Agradezco a la Dr. Marta Marizza por su dedicación, enseñanza y brindarme oportunidades que me permitieron aprender y siempre inspirarme.

Y finalmente agradezco a aquellos que de alguna manera hicieron posible la realización de este proyecto.

Elena M. Storani

Quiero agradecer desde lo más profundo de mi persona a mi familia, por sostener y mantener activa la llama de mi ilusión de poder ser ingeniero. A mi abuela Eve, que siempre mantuvo intacto el sueño de ver recibido a su nieto.

A mi amiga y compañera Ele, por ser mi guía y compañía en mi carrera y en este proceso final tan importante.

A todos mis amigos y compañeros que me acompañaron, ayudaron, bancaron y me enseñaron durante toda mi etapa de estudiante.

A mis ex compañeros y ex jefes de Conagro, por facilitarme mis primeros pasos laborales, pero siempre incentivando la conclusión de mis estudios.

A nuestro tutor, Mg. Ing. Raúl Rapacioli, por ser más que un maestro y profesor, un amigo.

Agradezco a la Universidad Nacional del Comahue, a la Educación Pública que tanto valoro por hacer posible que hoy pueda concretar mis estudios en la carrera de grado. Y a cada uno de los docentes que he tenido durante este recorrido por su enseñanza y dedicación.

Y sobre todas las cosas, a todas las personas que en todo este proceso me ayudaron no solo a mantener y alcanzar mis sueños e ilusiones, sino que me enseñaron a ser, antes que todo, una mejor persona y un mejor ser humano.

Federico Losso

Agradecemos por su predisposición y colaboración a la Comisión de Fomento de Villa Puente Picún Leufú, a la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén (DPVN), a la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC), a la Subsecretaria de Recursos Hídricos de Neuquén, a la empresa Beehive y a la Dr. Marta Marizza; quienes nos aportaron la información y lo avales necesarios para la realización de este proyecto.

Elena y Fede

RESUMEN

El objetivo principal del Proyecto Integrador Profesional es realizar un estudio de caracterización de la dinámica hídrica del A° Picún Leufú y la evaluación de los fenómenos hidráulicos e hidrológicos que se producen en la misma, con el objetivo de generar los insumos necesarios para el diseño de un puente para uso civil de la comisión de fomento de la Villa Puente Picún Leufú, de la provincia del Neuquén, Patagonia Argentina. La finalidad es la de mejorar la calidad de vida de los habitantes de la zona, favoreciendo la comunicación entre las márgenes del Arroyo Picún Leufú.

Se desarrolló una metodología que integra la información de los procesos involucrados en el fenómeno torrencial que se produce en la zona mencionada, se realizó una predicción de escorrentía y con la base de datos obtenida mediante modelos integrados con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Esta metodología está basada en los siguientes ítems: obtención de un Modelo Digital de Terreno, elaboración de cartografía temática en ambiente SIG, procesamiento de datos georreferenciados con el SIG y simulación de la escorrentía adoptando tormentas de proyecto, además, se generó un modelo hidráulico bidimensional a partir del procesamiento de un MDT de alta resolución.

Los resultados obtenidos evidencian que deben desarrollarse proyectos que involucren la rectificación de la rasante del camino rural debido a que las cotas de inundación sobrepasan estos niveles relevados en el terreno, como paso previo al desarrollo de un proyecto de puente.

Palabras claves: arroyo Picún Leufú, Sistema de Información Geográfica (SIG), escorrentía, modelación hidrológica.

ABSTRACT

The main objective of the Professional Integrator Project is to carry out a characterization study of the hydric dynamics of the Picún Leufú stream and the evaluation of the hydraulic and hydrological phenomena that occur in it, with the aim of generating the necessary inputs for the design of a bridge for civil use by the commission of promotion of Villa Puente Picún Leufú, in the Neuquén province, Argentine Patagonia. The purpose is to improve the quality of life of the inhabitants of the area, promoting communication between the banks of the Arroyo Picún Leufú.

A methodology was developed that integrates the information of the processes involved in the torrential phenomenon that occurs in the mentioned area, a prediction of runoff was made and with the database obtained through models integrated with a Geographic Information System (GIS).

This methodology is based on the following items: obtaining a Digital Terrain Model, elaboration of thematic cartography in the GIS environment, processing of georeferenced data with the GIS and simulation of runoff adopting project storms, in addition, a two-dimensional hydraulic model was generated from the processing of a high resolution MDT.

The results obtained show that projects must be developed that involve the rectification of the grade of the rural road because the flood levels exceed these levels surveyed on the ground, as a previous step to the development of a bridge project.

Key words: Picún Leufú stream, Geographic Information System (GIS), runoff, hydrological modeling.

INDICES GENERAL

1 INTRODUCCION 13

2 OBJETIVOS DE ESTUDIO 14

3 CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO 15

3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 23

3.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO 26

4 ESTUDIO HIDROLÓGICO 31

4.1 Delimitación de cuencas 31

4.2 Caracterización de las cuencas aluvionales 34

4.2.1 Parámetros Morfométricos 35

4.2.2 Parámetros Físicos de Forma 35

4.2.3 Parámetros Físicos de Relieve 37

4.2.4 Parámetros Relativos a La Red Hidrológica 42

4.2.5 Determinación Del Potencial De Escorrentía. Método del Numero de Curva del SCS 43

4.2.6 Clasificación Digital de Imágenes. Mapa de Coberturas y usos del Suelo 51

4.2.7 Mapa De Grupos Hidrológicos De Suelos 55

4.2.8 Mapa De Pendientes 58

4.2.9 Algebra De Mapas. Potencial De Escorrentía 61

4.2.10 Precipitaciones Intensas-Tormentas De Proyecto (ver anexo RRHH) 63

4.2.11 Duraciones de tormentas 67

4.2.12 Tormentas de proyecto 68

4.2.13 Tormentas de Proyecto Adoptadas 72

4.2.14 Modelación Hidrológica – Modelo HEC-HMS 76

5 MODELACION HIDRAULICA HEC-RAS 94

5.1 Metodología de modelación en HEC-RAS 97

6 ANALISIS DE RESULTADOS 110

7 CONCLUSIONES 113

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 117

9 ANEXOS 120

9.1.1 Normativa de Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén. 120

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Ubicación del área de estudio 16
Figura 2: Áreas Ecológicas de Neuquén (Fuente: Bran, Ayesa y López, 2002. Extraído del EAB, 2011) 17
Figura 3: Alumnos de la escuela N° 293 cruzando el cauce del arroyo en época torrencial. 18
Figura 4: Pasarela sobre el arroyo Picún Leufú en época de estiaje. 19
Figura 5: Cuadro estratigráfico de la Cuenca Neuquina tomado de Howell et al. (2005), el cuadro fucsia muestra los afloramientos de interés para el presente estudio. 20
Figura 6: Cuenca del Arroyo Picún Leufú 23
Figura 7: Mapa de ubicación de la zona de estudio. 25
Figura 8: Vista del cauce del arroyo Picún Leufú, en zona de propuesta de ubicación 26
Figura 9: Vista del camino rural desde cauce del arroyo Picún Leufú. 27
Figura 10: Relevamiento topográfico con estación total. 27
Figura 11: Vista del cauce del arroyo Picún Leufú desde margen izquierda. 28
Figura 12: Vista del cauce del arroyo Picún Leufú desde margen derecha. 28
Figura 13: Mapa de altitudes, cuencas y red de drenaje del área de estudio 33
Figura 14: Curvas hipsométricas guías. 38
Figura 15: Curvas Hipsométricas Cuencas y Subcuencas 38
Figura 16: Variables que intervienen en el método del SCS para abstracciones (Fuente: Chow V. T., et.al.1994, "Hidrología aplicada") 44
Figura 17: Cubierta vegetal característica de la zona de estudio 46
Figura 18: Cubierta vegetal característica de la zona de estudio 46
Figura 19: Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en SIG. Cálculo del índice CN distribuido. Elaborado sobre la base del método propuesto por el USSCS (1975) 51
Figura 20: Mapa de Imagen Landsat8 (B543) 53
Figura 21: Mapa de Coberturas 54
Figura 22: Mapa de suelos y texturas 56
Figura 23: Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos 57
Figura 24: Mapa de pendientes 60
Figura 25: Mapa de potencial de escorrentía 62
Figura 26: Mapa de estaciones meteorológicas 63
Figura 27: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 3 hs. 70
Figura 28: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 3,5 hs. 70

Figura 29: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 5 hs. 71
Figura 30: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 5 hs 71
Figura 31: Hietograma Porcentual Tormenta de 3 horas. 74
Figura 32: Hietograma Porcentual Tormenta de 3,5 horas. 74
Figura 33: Hietograma Porcentual Tormenta de 5 horas. 75
Figura 34: Hietograma Porcentual Tormenta de 5 horas. 75
Figura 35: (a) Hidrograma Unitario de Snyder. **(b)** Hidrograma Unitario Requerido 76
Figura 36: Esquema topológico en HEC HMS para la simulación de la escorrentía en las cuencas 79
Figura 37: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 5, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas. 81
Figura 38: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 4, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 5 horas. 82
Figura 39: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 3, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas. 83
Figura 40: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 2, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 3,5 horas. 84
Figura 41: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 1, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 3 horas. 85
Figura 42: Hidrograma de Crecida, Cuenca Total – TR 50 años. 86
Figura 43: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 5, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas. 87
Figura 44: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 4, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 5 horas. 88
Figura 45: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 3, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas. 89
Figura 46: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 2, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 3,5 horas. 90
Figura 47: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 1, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 3 horas. 91
Figura 48: Hidrograma de Crecida, Cuenca Total – TR 100 años. 92
Figura 49: Ortomosaico obtenido a partir de modelo de dron. 95
Figura 50: Mapa de altitudes – MDT obtenido con vuelo de dron. 96
Figura 51: Modelo Digital en entorno HEC-RAS. 97

Figura 52: Características del mallado. 98
Figura 53: Determinación de tamaño de celdas 99
Figura 54: Geometría del mallado y condiciones de contorno 100
Figura 55: Hidrograma TR 50 años HEC-RAS. 102
Figura 56: Hidrograma TR 100 años HEC-RAS. 102
Figura 57: Ventana de análisis de flujo en condición no permanente. 104
Figura 58: Crecida máxima del cauce para TR 50 años en ortomosaico a las 8:50 del hidrograma de crecidas. 105
Figura 59: Crecida máxima del cauce para TR 50 años en MDT a las 8:50 del hidrograma de crecidas. 105
Figura 60: Flujo de velocidades en cauce para TR 50 años a las 8:50 del hidrograma de crecidas. 106
Figura 61: Crecida máxima del cauce para TR 100 años en ortomosaico. 107
Figura 62: Crecida máxima del cauce para TR 100 años en MDT. 107
Figura 63: Flujo de velocidades en cauce para TR 100 años. 108
Figura 64: Curvas típicas de igual velocidad en un canal natural irregular (Hidráulica de los canales abiertos. Ven Te Chow) 109
Figura 65: Camino rural de acceso 111
Figura 66: Perfil de propuesta de ubicación del puente – Tormenta de diseño TR 50 años. 112
Figura 67: Perfil de propuesta de ubicación del puente – Tormenta de diseño TR 100 años. 112

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Subcuencas y sus respectivas áreas. 24
Tabla 2: Coordenadas cierres cuencas y subcuencas aluvionales 32
Tabla 3: Parámetros morfométricos 35
Tabla 4: Parámetros de forma 37
Tabla 5: Valores de la Integral Hipsométrica 39
Tabla 6: Parámetros de relieve 41
Tabla 7: Parámetros de red de drenaje. 43
Tabla 8: Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas (INCYTH, 1980). 47
Tabla 9: Grupos Hidrológicos de Suelos. (Bradbury, K.R.; Dripps, W.; Hankley, C; Anderson, M.; Potter, K., 2000) 50
Tabla 10: Valores del índice CN 61
Tabla 11: Coordenadas de las Estaciones Meteorológicas 63
Tabla 12: Registros de precipitaciones máximas diarias anuales por estación. 65
Tabla 13: Parámetros Estadísticos – Función de distribución de Gumbel. 66
Tabla 14: Precipitación Máxima de 24 horas e intensidad media máxima de lluvia de 24 hs. 67
Tabla 15: Coeficientes relación P1 hora / P24 horas 69
Tabla 16: Precipitaciones Totales (mm) para las duraciones de tormentas adoptadas. 72
Tabla 17: Valores de tiempo de retardo T_L. 78
Tabla 18: Valores de caudales máximos y volúmenes de escorrentías. 80
Tabla 19: Resultados de mallado para el tamaño de celda determinado 99
Tabla 20: Resultados de modelación 110
Tabla 21: Valores de caudales máximos y volúmenes de escorrentías para condición de humedad seca (AMCI). 114

1 INTRODUCCION

La hidrología es una ciencia que cubre todas las fases del agua en la tierra las cuales están relacionadas con el ciclo hidrológico, es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente. El diseño hidrológico interpreta y cuantifica los fenómenos relacionados con el agua, proporcionando un sustento a estudios, proyectos y obras de ingeniería hidráulica.

Con el avance de la tecnología digital, la hidrología logró alcanzar altos niveles de confiabilidad, y a partir de su estudio, permite labores tales como diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimientos de agua, tratamiento y disposiciones de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones y el manejo de los recursos hidráulicos.

La provincia del Neuquén se caracteriza por tener precipitaciones intensas de origen conectivo, las que, al ser de corta duración, gran intensidad y concentradas arealmente, desencadenan violentas crecidas torrenciales o aluvionales, que movilizan gran cantidad de agua y sedimentos. Ante esta realidad, se hace imprescindible estudiar las cuencas con el fin de obtener información de su comportamiento y poder realizar la infraestructura necesaria. Esto conlleva a la necesidad de llevar a cabo un proyecto de ingeniería civil, en particular un puente vehicular de uso civil, cuya finalidad es la de mejorar la calidad de vida de los habitantes de la Villa Puente Picún Leufú, localidad argentina ubicada en los departamentos Catán Lil y Zapala,en la provincia del Neuquén.

Para materializar dicho proyecto -que permitiría mejorar la comunicación entre las márgenes del Arroyo Picún Leufú- se realizó un estudio hidrológico caracterizando las cuencas aluvionales, analizando el comportamiento de la cuenca para recurrencias de 50 y 100 años. Se estudió la zona propuesta por la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén (D.P.V.N.), en conjunto con personal de la Comisión de Fomento de Villa Puente Picún Leufú, para la ubicación de un puente de uso civil.

2 OBJETIVOS DE ESTUDIO

El objetivo principal del Proyecto Integrador Profesional es realizar un estudio de caracterización de la dinámica hídrica del Aº Picún Leufú mediante la determinación de los parámetros morfométricos de su cuenca hidrográfica y la evaluación de los fenómenos hidráulicos e hidrológicos que se producen en la misma, con el objetivo de generar los insumos necesarios para el diseño de un puente para uso civil de la comisión de fomento de la Villa Puente Picún Leufú, de la provincia del Neuquén, Patagonia Argentina.

Con el fin de cumplir con el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Elaborar mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) una base de datos georreferenciados que permita identificar y caracterizar las cuencas aluvionales.
- Realizar una caracterización morfométrica e hidrológica de las cuencas analizadas.
- Elaborar un modelo de precipitaciones a partir de datos pluviométricos proporcionados por estaciones pluviométricas pertenecientes a la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC)
- Confeccionar las tormentas de proyecto.
- Implementar un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía, que permita calcular los caudales que se originan en las cuencas y obtener los hidrogramas unitarios asociados a ellos.
- A partir de la caracterización realizada y de los escurrimientos generados desde las tormentas de proyecto, generar un modelo de comportamiento hidráulico del arroyo mediante una simulación con el Software HEC-RAS 5.0.

3 CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

El arroyo Picún Leufú recorre parte del sector este de la provincia de Neuquén, Argentina. El nombre proviene de la lengua mapudungun y significa: Picún = Norte, Leufú = Arroyo = Arroyo del Norte. Nace en la sierra del Chachil en el centro de la provincia de Neuquén. Luego de un recorrido de aproximadamente 150 km, durante el cual forma un fértil valle, desemboca en el lago artificial "Exequiel Ramos Mexía", producto del embalse de las aguas del río Limay.

Villa del Puente Picún Leufú es una localidad ubicada en los departamentos Catán Lil y Zapala, en la provincia del Neuquén, República Argentina (***Figura 1***). Se ubica a 34.8 kilómetros al sur de la localidad de Zapala por la Ruta Nacional N°40 y se accede desde ésta a la altura del kilómetro 2394.

El área de localización del puente fue una propuesta técnica de ingenieros de la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén (D.P.V.N.), en conjunto con personal de la Comisión de Fomento de Villa Puente Picún Leufú. Para la definición del área de localización, se consideraron las opciones técnicas y sociales más viables para los habitantes de dicho paraje.

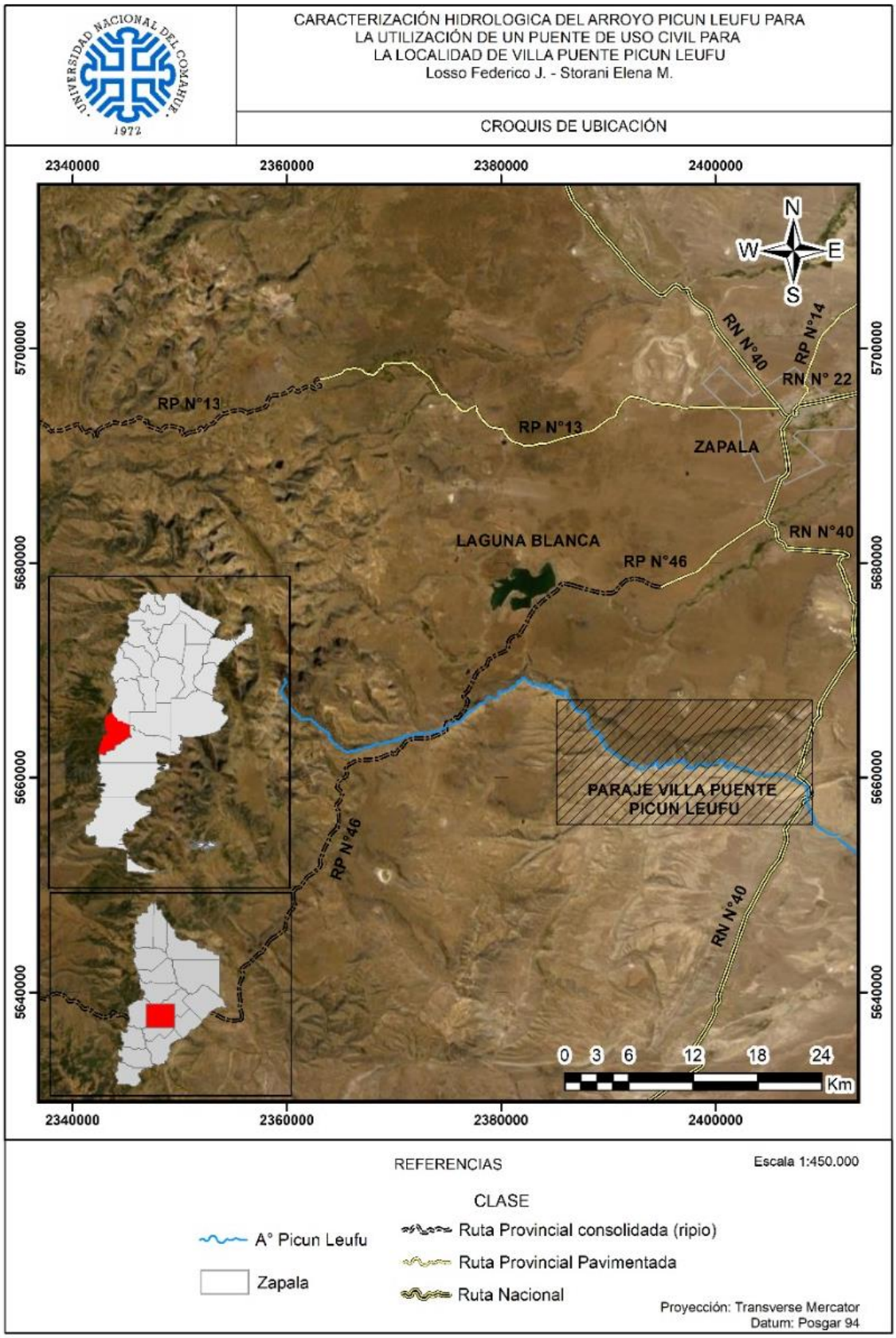

Figura 1: *Ubicación del área de estudio*

El clima de la zona es de tipo árido, con vientos intensos y secos, determinando el ambiente típico de la estepa patagónica con vegetación xerofita (sierra y meseta sur) (***Figura 2***).

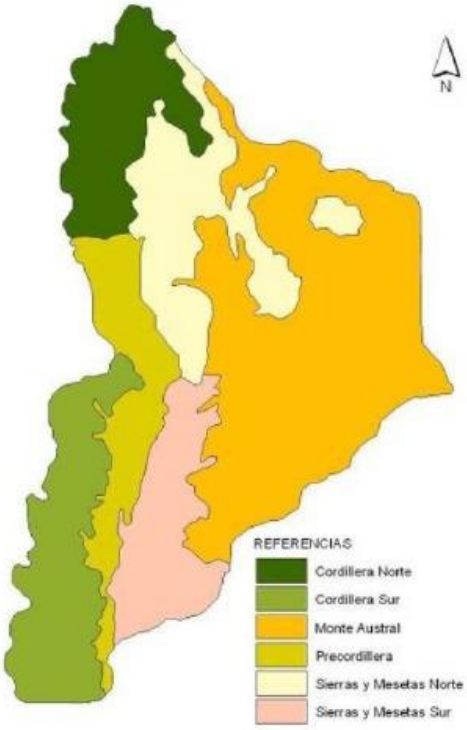

Figura 2: *Áreas Ecológicas de Neuquén (Fuente: Bran, Ayesa y López, 2002. Extraído del EAB, 2011)*

El cauce del arroyo Picún Leufú presenta características de tipo torrencial. Ante esta realidad de situaciones de riesgo por precipitaciones intensas, se hace imprescindible estudiar las mismas para poder llevar adelante el proyecto de un puente para la comunicación de la población y de la escuela ubicada en la margen sur. En la ***Figura*** *3*, se observa como los alumnos de la escuela primaria N° 293 de este paraje cruzan el cauce en época de crecida en una pasarela de madera precaria, mientras que la ***Figura 4*** refleja el mismo sector en época de bajante.

Figura 3: *Alumnos de la escuela N° 293 cruzando el cauce del arroyo en época torrencial.*

Figura 4: *Pasarela sobre el arroyo Picún Leufú en época de estiaje.*

Predominan los suelos de texturas francos arenosos y arcillosos con moderada o escasa materia orgánica de pH neutro y de un moderado déficit hídrico anual.

La vegetación corresponde al Distrito Occidental de la Provincia Patagónica (León et al., 1988), caracterizado por el predominio de estepas arbustivo-graminosas. Los principales elementos florísticos son: el mamuel choique (Adesmia campestris), el neneo (Mulinum spinosum), el charcao gris (Senecio filaginoides) y el calafate (Berberis heterophylla), entre los arbustos; y el coirón amargo, el coirón llama (Stipa humilis), el coirón huecú (Festuca argentina) y el coirón poa (Poa ligularis), entre los pastos.

La geología regional (Leanza y Hugo, 1997) se inicia con un basamento granítico perteneciente al Complejo plutónico del Chachil (Leanza, 1990) por encima se depositan las rocas volcaniclásticas del Precuyano (Triásico- Superior) seguido de las ingresiones marinas que depositaron los Grupo de Cuyo, Lotena, Mendoza y Rayoso (Jurásico-Cretácico inferior) (Howel, et al. 2005). Estos afloramientos ocupan el sector occidental de la Cuenca constituyendo el anticlinal de Picún Leufú, estructura asociada al Sistema de la Dorsal de Huincul (Franzese et. al. 2011) y hacia la parte

media y baja de la cuenca predominan los depósitos continentales del Cretácico superior asignados al Grupo Neuquén (Garrido, 2010) también denominados "Estratos Rojos con Dinosaurios" (***Figura 5)***.

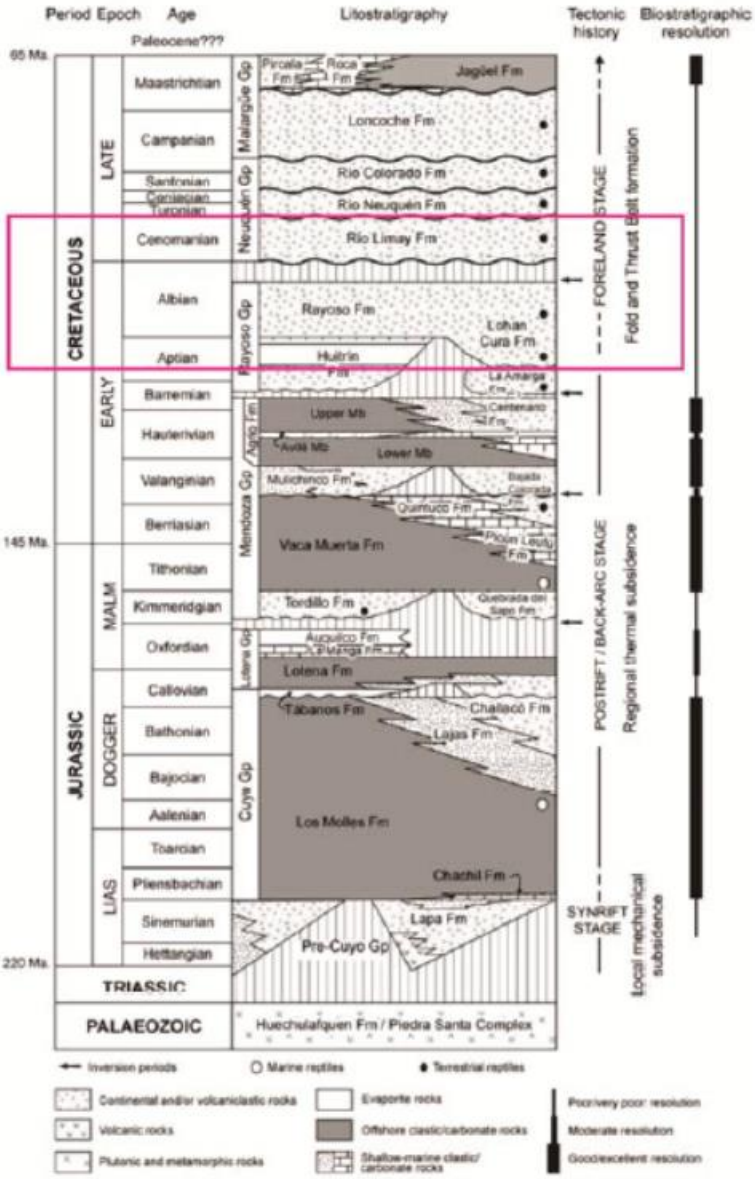

Figura 5: *Cuadro estratigráfico de la Cuenca Neuquina tomado de Howell et al. (2005), el cuadro fucsia muestra los afloramientos de interés para el presente estudio.*

El clima predominante al norte de la Patagonia es semiárido, moderado por océanos: Pacífico y Atlántico. Las precipitaciones son escasas en la zona de los valles y mesetas. Predominan los vientos del sudoeste. En la zona cordillerana las precipitaciones son relativamente regulares y caen

en forma de lluvia provenientes del Pacífico y descargan la humedad en la cordillera de los Andes y llegan como vientos secos a la meseta y valles patagónicos.

En la provincia de Neuquén el clima es de tipo continental, templado y árido, presenta una gran amplitud térmica diaria, con medias que van desde los 22°C en verano (con máximas superiores a los 30°C) y los 5°C en invierno (con mínimas de hasta -20°C). Las precipitaciones anuales oscilan entre 150 a 200 mm, con nevadas de consideración durante los meses más fríos.

Las lluvias características de la región norpatagonica son provocadas por sistemas frontales desde el océano Pacifico durante los meses de invierno con dirección Sudoeste – Noreste, o por avances de masas de aire cálido desde el norte o noreste del país y tormentas convectivas durante el verano. Durante la primavera, verano y comienzos del otoño, aumenta estacionalmente en los valles y mesetas la probabilidad de ingreso de aire húmedo desde el océano Atlántico. Esto aumenta la probabilidad de formación de tormentas con lluvias y chaparrones de variada intensidad.

Estas precipitaciones originadas en los sistemas de baja presión que ingresan desde el océano Pacifico son las responsables de las lluvias y nevadas en cordillera. Cuando el frente es importante, el área de influencia de las precipitaciones afecta a la región de interés con fuertes vientos y lluvias persistentes e incluso nieve en cotas altas. Estas situaciones pueden tener varios días de desarrollo. Tienen un alto grado de previsibilidad y cubren importantes áreas. Estas masas de aire que ingresan desde el océano Pacifico al sur del paralelo 35°, donde la cordillera es más baja, pueden eventualmente alcanzar los valles y mesetas patagónicas. Dejan la mayor parte de la humedad en la región cordillerana de las cuencas de los ríos Limay y Neuquén, de modo que el aire sobre los valles y mesetas llega con bajo contenido de humedad.

Por otro lado, las masas de aire húmedo también ingresan al continente o bien desde la selva amazónica o bien desde el océano Atlántico. En niveles bajos al este de la cordillera de los Andes y al norte del paralelo 40° sur, denominado el Anticiclón del Atlántico.

En un frente cálido, el aire caliente se desliza sobre la cuña fría, formando un amplio sistema de nubes, provocando lluvias continuas o intermitentes, pero no violentas. Si en cambio el aire cálido es inestable, su ascenso por la rampa de aire frio dispara la inestabilidad y aparecen nubes

cumulonimbos, que se entremezclan con los altostratus y los nimbostratus. De esta manera se producen fuertes tormentas de corta duración y con actividad eléctrica.

Las tormentas eléctricas, con sus chaparrones y fuertes vientos, no siempre vienen asociadas a frentes y a líneas de estabilidad. En verano pueden formarse por la sola presencia de aire inestable, con elevadas marcas de temperatura y de punto de rocío. Las nubes de tormenta (cumulonimbus), se forman asociadas a los frentes fríos, a los frentes cálidos, a las líneas de estabilidad o sencillamente pueden generarse en forma independiente. En este último caso son denominadas tormentas de masa de aire, ya que se forman dentro de aire caliente y húmedo, sin que exista ningún frente o cambio de masa de aire en la zona. Las tormentas de masa de aire, o tormentas de verano, consisten en varias nubes cumulonimbus acompañadas de cúmulus potentes o altos cúmulus, y provocan actividad eléctrica, con chaparrones que cambian bruscamente de intensidad y ocasionalmente granizo. Durante estas tormentas tienen lugar chaparrones intensos, con ráfagas de viento y descenso temporal de temperatura.

Además, en esta región, predominan las precipitaciones intensas de origen convectivo, mediante el cual el aire se arrastra hacia arriba. Las celdas convectivas se originan por calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostienen por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa. Este tipo de evento se caracteriza por ser de gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal, concentrándose entre los meses de octubre a marzo en los cuales se desencadenan violentas crecidas torrenciales o aluvionales que movilizan gran cantidad de agua y sedimentos.

3.1 Ubicación del área de estudio

La cuenca del arroyo Picún Leufú desemboca en el embalse Ezequiel Ramos Mexía, obra realizada sobre el río Limay (**Figura 6**).

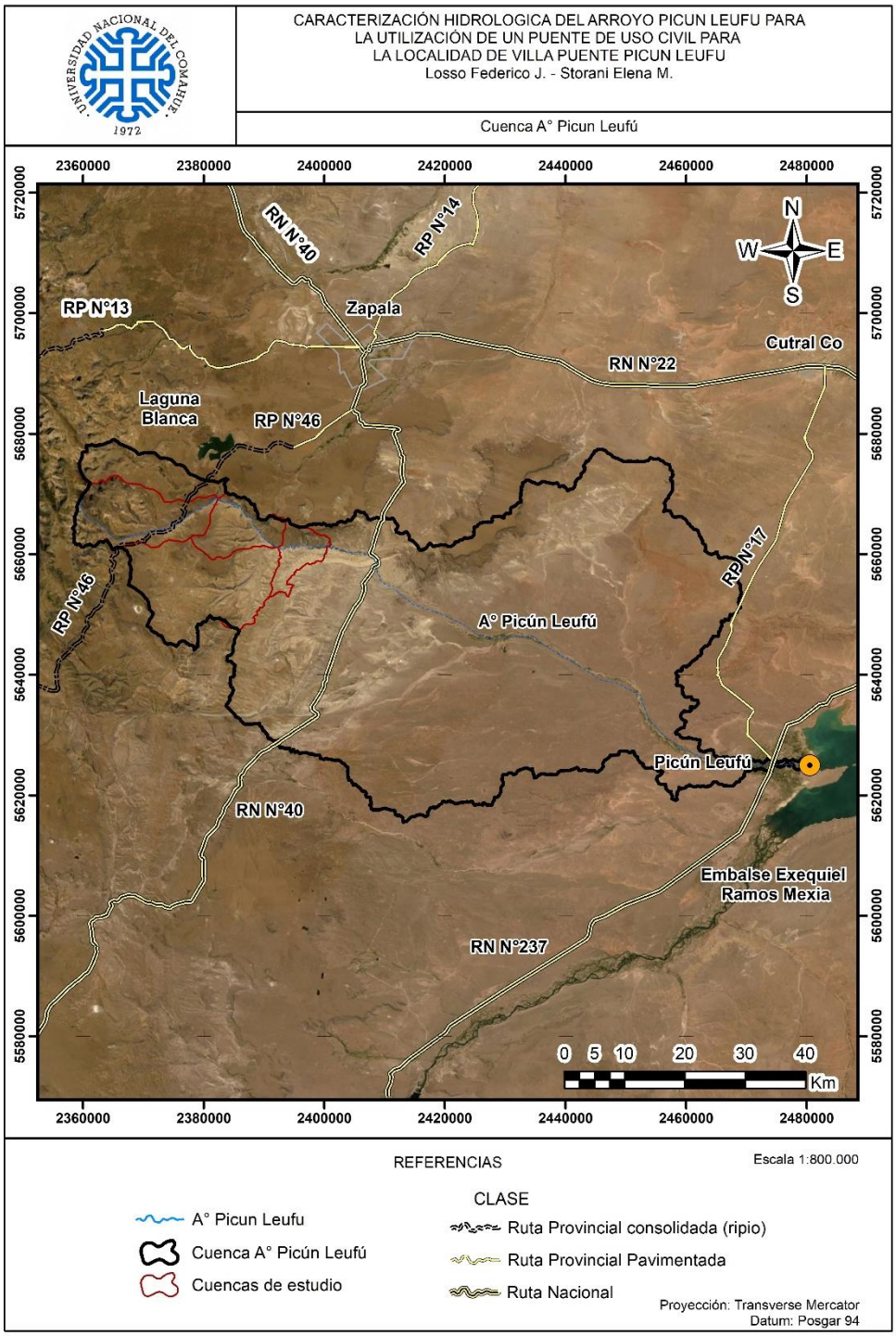

Figura 6: *Cuenca del Arroyo Picún Leufú*

Se definió el área de estudio (superficie de 5880 km^2), que se encuentra comprendida entre las siguientes coordenadas planas:

- X1: 5.695.597 Y1: 2.344.841
- X2: 5.695.597 Y2: 2.428.780
- X3: 5.625.548 Y3: 2.428.780
- X4: 5.625.548 Y4: 2.344.841

En esta área, se delimitó la cuenca de aporte del arroyo Picún Leufú junto con la red de drenaje hasta el punto de cierre fijado para el análisis de este proyecto, el cual fue establecido a partir de lineamientos técnicos para la futura colocación del puente de uso civil de la comunidad de la Villa Puente Picún Leufú.. Para una mejora del estudio y análisis, se subdividió la cuenca total en 5 (cinco) subcuencas (***Figura 7)***, en la ***Tabla 1*** se detalla la superficie de cada una :

Cuenca	A (km^2)
1	59.44
2	98.83
3	301.17
4	195.14
5	124.34

Tabla 1*: Subcuencas y sus respectivas áreas.*

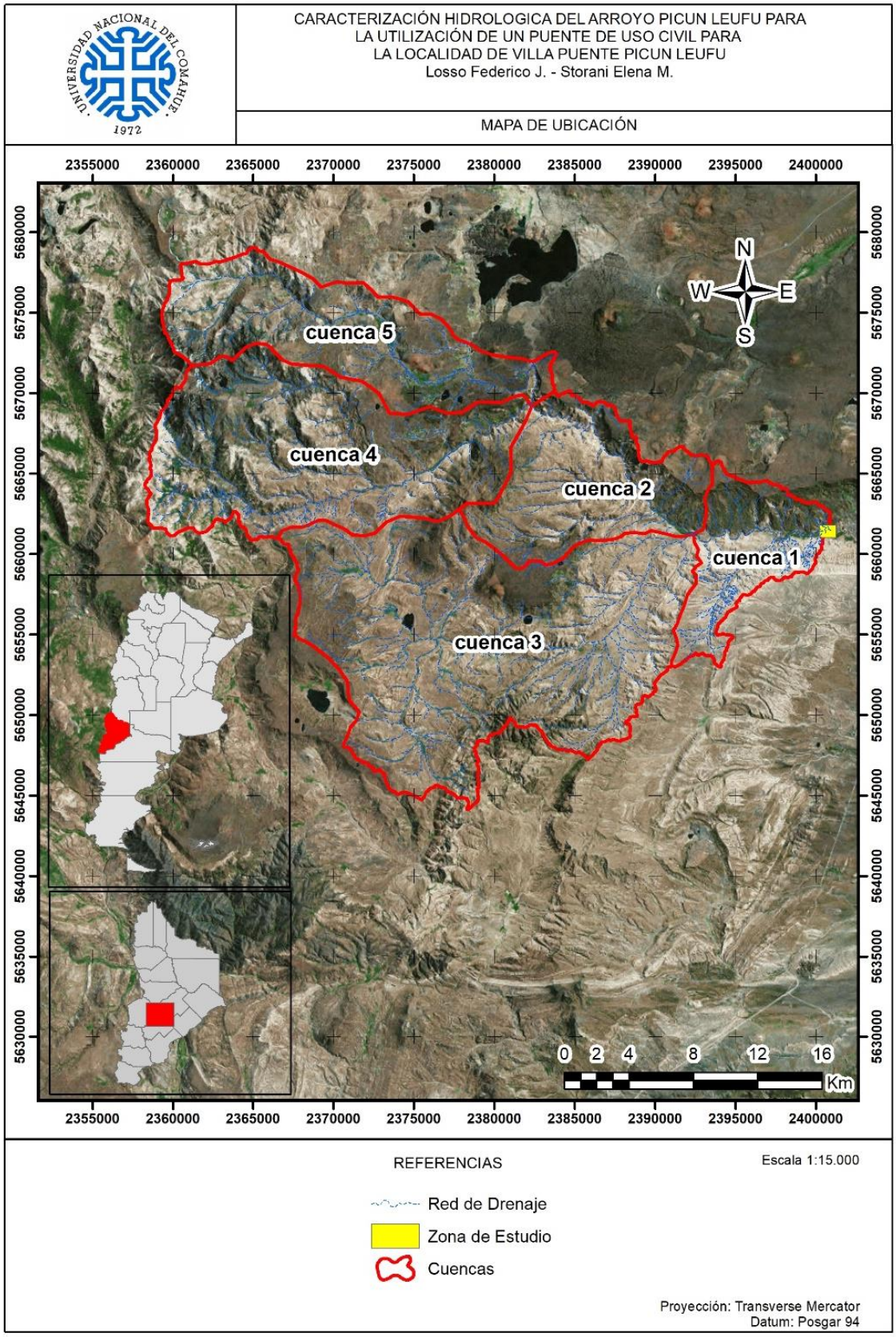

Figura 7: *Mapa de ubicación de la zona de estudio.*

3.2 Metodología de trabajo

A partir de reuniones con el presidente de la comisión de fomento del paraje Villa Puente Picún Leufú, se escucharon las solicitudes respectivas realizadas al Gobierno de la Provincia del Neuquén y a la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén (D.P.V.N) para la construcción de un puente de uso civil, cercano a la escuela rural, para poder facilitar el acceso de los habitantes de dicho paraje, en épocas de crecidas del arroyo. Se realizaron visitas de campo para relevar y conocer la zona propuesta por Vialidad Provincial del Neuquén para la colocación de dicho puente. En la ***Figura 8*** puede observarse el cauce del arroyo en la zona de ubicación propuesta por agentes de la D.P.V.N. En la ***Figura 9*** se observa el camino rural, visto desde el centro del cauce del arroyo, el cual permite la conexión de la comunidad con la Ruta Nacional N° 40.

Figura 8: *Vista del cauce del arroyo Picún Leufú, en zona de propuesta de ubicación.*

Figura 9: *Vista del camino rural desde cauce del arroyo Picún Leufú.*

En las ***Figuras 10, 11 y 12*** se puede ver la ubicación de la Estación Total con la que se realizó el relevamiento topográfico de la zona en estudio.

Figura 10: *Relevamiento topográfico con estación total.*

Figura 11: *Vista del cauce del arroyo Picún Leufú desde margen izquierda.*

Figura 12: *Vista del cauce del arroyo Picún Leufú desde margen derecha.*

La metodología que se propuso en el presente proyecto para la evaluación del impacto que generan las cuencas aluvionales con su dinámica hídrica en la zona de análisis (zona de proyección del futuro puente), se basó en el procesamiento de imágenes mediante el uso de SIG para delimitar las cuencas a partir de un Modelo Digital de Terreno, realizando los procesamientos dentro del software ArcGIS. Luego, se realizó una caracterización física de la cuenca, dependiente de la morfología, los tipos de suelo, la cubierta vegetal, la geología, los usos del suelo, etc. Estas características influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Los datos pluviométricos de las estaciones ubicadas en el área de estudio fueron provistos por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC):

- Estación: Picún Leufú Painemilla
  - Latitud: 39° 11’ 40.18” S
  - Longitud: 70° 10’ 48.69” O
  - Altura: 852 msnm
- Estación: Picún Leufú Arriba
  - Latitud: 39° 9’ 57.15” S
  - Longitud: 70° 28’ 37.61” O
  - Altura: 1241 msnm

A partir de los datos mencionados y la generación de un modelo hidrológico con el software HEC-HMS (USACE, 2018) para la determinación de la escorrentía, se obtuvieron las tormentas de diseño, referidas a los tiempos de recurrencia TR 50 y 100 años. Una vez obtenidas dichas tormentas, se realizó una modelación hidráulica utilizando el software HEC-RAS (USACE, 2016).

La secuencia metodológica consiste en:

- Adoptar un Modelo Digital del Terreno (MDT), compatible con la resolución espacial de imágenes satelitales Landsat 8.
- Analizar con el SIG de datos espacialmente referenciados. Determinación de sectores con características aluvionales. Identificación de cuencas aluvionales, obtención de parámetros morfométricos, de forma, de relieve y de la red hidrográfica.
- Determinar la cobertura y uso del suelo a partir del procesamiento de imágenes satelitales. Elaborar la cartografía temática en ambiente SIG.
- Evaluar el potencial de escorrentía, mediante el Método del Número de Curva. Modelo cartográfico para la determinación de un mapa del índice CN, que se basa en la aplicación de álgebra de mapas y reclasificaciones en el SIG.
- Adoptar la tormenta de proyecto y simular utilizando modelos hidrológicos para obtener la escorrentía, siguiendo los lineamientos establecidos por Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén.
- Simular las crecidas mediante el uso del software HEC-RAS, a través de la utilización de un MDT obtenido por vuelos de dron, proporcionado por Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén.

4 ESTUDIO HIDROLÓGICO

4.1 Delimitación de cuencas

Con el objetivo de determinar las características aluvionales de las cuencas que afectan la zona de estudio, se adaptó un Modelo Digital de Terreno (MDT - ALOS PALSAR[1]) obtenido del portal del UAF Alaska Satellite Facility. Este MDT fue retro proyectado al sistema Posgar94-Faja 2, optimizado a una grilla de 12.5 metros (MDT12.5) y procesado con el software ArcGIS[2].

A partir de la aplicación de las herramientas de ArcToolbox (ArcGIS) y en particular la extensión Spatial Analyst, se delimitaron e identificaron cuencas aluvionales y sus respectivas redes de drenaje, desarrollando en el proceso las siguientes acciones:

- Relleno de las celdas del MDT12.5 que presenten incompatibilidades para con el proceso de escorrentía.
- Determinación de la Dirección de Flujo, identificando hacia donde fluye cada celda.
- Cálculo de la Acumulación del Flujo, evaluando el área de drenaje en áreas de celda.
- Identificación de las celdas de las corrientes, señalando aquellas celdas con un valor de acumulación de flujo superior a un cierto umbral definido.
- Identificación de los vínculos (o puntos de salida), asignando un número a cada tramo o segmento de la red de drenaje.
- Delineación de las subcuencas para cada vínculo, determinando el área incremental asociada a cada uno.

En la ***Figura 13*** se muestra la cuenca aluvional determinada que incide con su dinámica hídrica en el área de estudio. Para profundizar el análisis, se subdividió la cuenca en 5 subcuencas. En la ***Tabla 2*** se dan las coordenadas planas del cierre de la cuenca total y el cierre de cada subcuenca.

[1] ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*).
[2]Copyright © 1999-2008 ESRI

Cierre de cuenca	X	Y	Nota
1	5.661.454	2.400.937	CUENTA TOTAL
1 A	5.661.259	2.392.359	SUBCUENCAS 2 Y 3
1 B	5.669.204	2.382.325	SUBCUENAS 4 Y 5

Tabla 2: *Coordenadas cierres cuencas y subcuencas aluvionales*

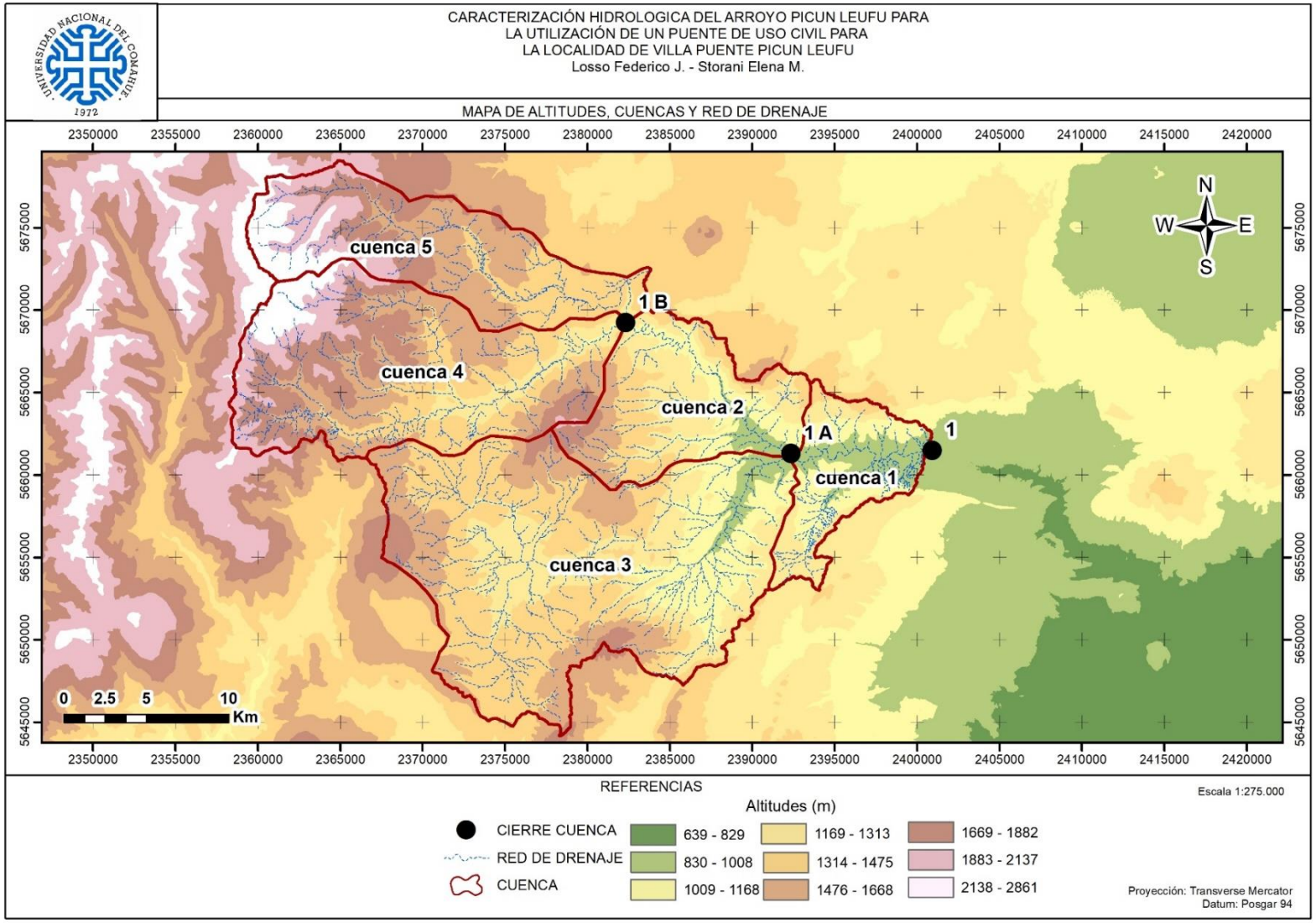

Figura 13: *Mapa de altitudes, cuencas y red de drenaje del área de estudio*

4.2 Caracterización de las cuencas aluvionales

A partir del MDT y aplicando la extensión Spatial Analyst de las herramientas Arc Tool Box del software ARC-GIS, se efectuaron las delimitaciones e identificaciones de las cuencas y las respectivas redes de drenaje, desarrollando las siguientes acciones:

- Relleno de las celdas bajas del MDT, aumentando la elevación de puntos ficticios (herramienta Fill).
- Determinación de la dirección de flujo, identificando hacia donde fluye cada celda (herramienta Flow direction).
- Cálculo de la acumulación del flujo, evaluando el área de drenaje en áreas de celda (herramienta Flow accumulation).
- Identificación de las celdas de las corrientes, señalando aquellas celdas con un valor de acumulación de flujo superior a cierto umbral definido, el cual depende de la resolución del MDT.
- Identificación de los vínculos o puntos de salida.
- Delimitación de las subcuencas para cada vínculo, determinando el área incremental asociada a cada uno.

Realizada esta primera estimación de la red de drenaje y la cuenca del arroyo con el uso del software, se efectuó un reajuste manual basado en un análisis visual de imágenes satelitales de la zona de estudio. Se realizó un trazado de la red de drenaje más suave y detallado, debido a que el uso del software para la determinación de esta puede resultar errónea a causa de la precisión de modelo digital de elevación utilizado. Esto permitió un mayor ajuste del trazado de la cuenca y de las subcuencas. Estas últimas fueron delimitadas para facilitar el estudio y análisis de las tormentas y proporcionar mayor precisión en los resultados. El criterio de delimitación de las subcuencas fue establecido a partir de un análisis de la red drenaje obtenida.

4.2.1 Parámetros Morfométricos

Los parámetros morfométricos principales que se obtuvieron de las cuencas se muestran en la ***Tabla 3***. Estos son: Superficie (S), Perímetro (P), Altura Máxima (Hmáx.), Altura Mínima (Hmín.) y Desnivel (DH).

Otras características que interesan obtener de las cuencas son las relativas a los Parámetros Físicos de Forma y de Relieve, y a los de la Red Hidrográfica. Estos se determinaron a partir del procesamiento del MDT y de la red de drenaje de cada cuenca.

Cuenca	A (km2)	P (km)	Hmín. (m)	Hmáx. (m)	DH (m)
1	59.44	44.66	849	1410	561
2	98.83	47.94	921	2003	1082
3	301.17	91.07	922	1898	976
4	195.14	68.44	1090	2861	1771
5	124.34	63.53	1089	2796	1707

Tabla 3*: Parámetros morfométricos*

4.2.2 Parámetros Físicos de Forma

a)- Forma de la cuenca (Rf): Horton (1932), sugirió un factor adimensional de forma, como índice de la forma de una cuenca:

$$Rf = \frac{S}{{L_b}^2} \qquad (1)$$

Donde:

S: Superficie de la cuenca, en km^2 y

L_b: Longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite de la cuenca, cerca de la cabecera del cauce más largo siguiendo una línea recta, en km.

Un valor de Rf superior a la unidad indicará el grado de achatamiento del área o un curso principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando grandes crecidas. Una cuenca estrecha y larga, con Rf bajo, presenta menor posibilidad de ocurrencia de lluvias intensas cubriendo simultáneamente toda su extensión y por consiguiente menor posibilidad de que se generen grandes crecidas. De acuerdo con la magnitud del factor de forma, las cuencas se clasifican en tres grupos: baja, media y alta susceptibilidad a las inundaciones con factor de forma bajo, medio y alto respectivamente.

La ecuación no implica una suposición especial de la forma de la cuenca. Para un círculo: Rf = 0.79; para un cuadrado, con la salida en el punto medio: Rf = 1; y para el cuadrado con la salida en una esquina: Rf = 0.5.

b)- Coeficiente de Gravelius (Cg): Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra teórica circular de la misma superficie.

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \qquad (2)$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca, en km y

S: Superficie de la cuenca, en km^2.

En cualquier caso, el coeficiente será mayor que 1, tendiendo a la unidad cuando la cuenca se aproxima a la forma circular, y alcanzando valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas. Este valor que crece con la irregularidad de la forma de la cuenca permite clasificar a una cuenca como:

- Cg = 1.00 – 1.25 Casi redonda a oval redonda (compacta)

- Cg = 1.25 - 1.50 Oval oblonga
- Cg = 1.50 - 1.75 Rectangular oblonga
- Cg = 1.75 - 3.00 Casi rectangular (alargada)

Los parámetros de forma de las cuencas de estudio se muestran en la ***Tabla 4***.

Cuenca	RF	Forma de la Cuenca	Cg	Clase de forma
1	0.42	Ni alargada ni ensanchada	1.63	Rectangular oblonga
2	0.29	Alargada	1.36	Oval oblonga
3	0.22	Muy alargada	1.48	Oval oblonga
4	0.17	Muy alargada	1.38	Oval oblonga
5	0.10	Muy alargada	1.61	Rectangular oblonga

Tabla 4: *Parámetros de forma*

4.2.3 Parámetros Físicos de Relieve

La topografía o relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma. Numerosos parámetros para describir el relieve de una cuenca han sido desarrollados, siendo los más representativos los que a continuación se desarrollan:

a)- Curva hipsométrica: representa gráficamente las cotas de terreno en función de las superficies que éstas encierran. La curva hipsométrica muestra la potencialidad erosiva debido a la forma de distribución de sus pendientes que comparada con curvas patrones indica la presencia de una cuenca joven, madura o vieja.

En la ***Figura 14***, la curva superior (curva A) muestra una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria.

En la ***Figura 15*** se muestran las curvas hipsométricas de las cuencas y subcuencas. La subcuenca 1 es del tipo A, las subcuencas 2, 3 y 5 son del tipo B, mientras que la subcuenca 4 es del tipo C.

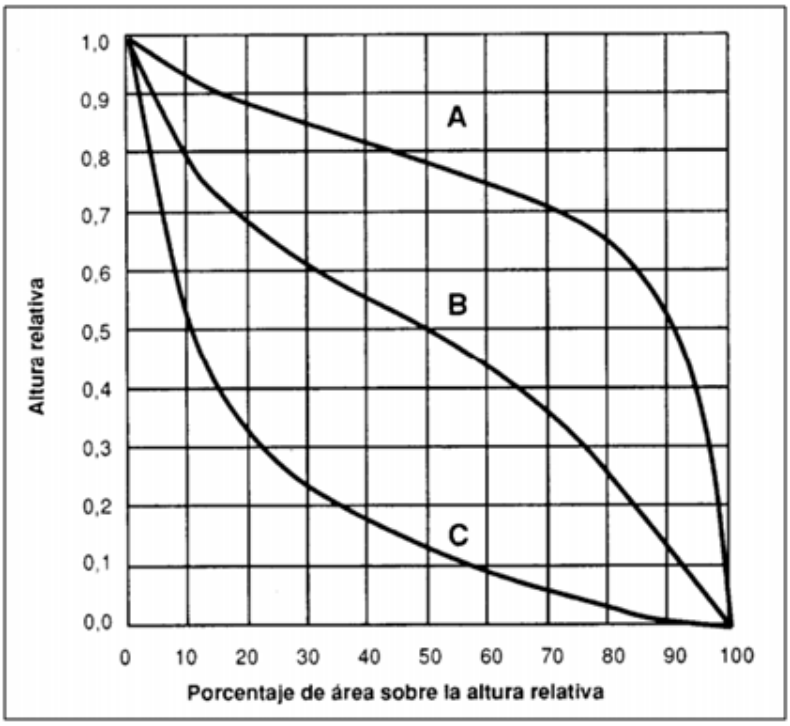

Figura 14*: Curvas hipsométricas guías.*

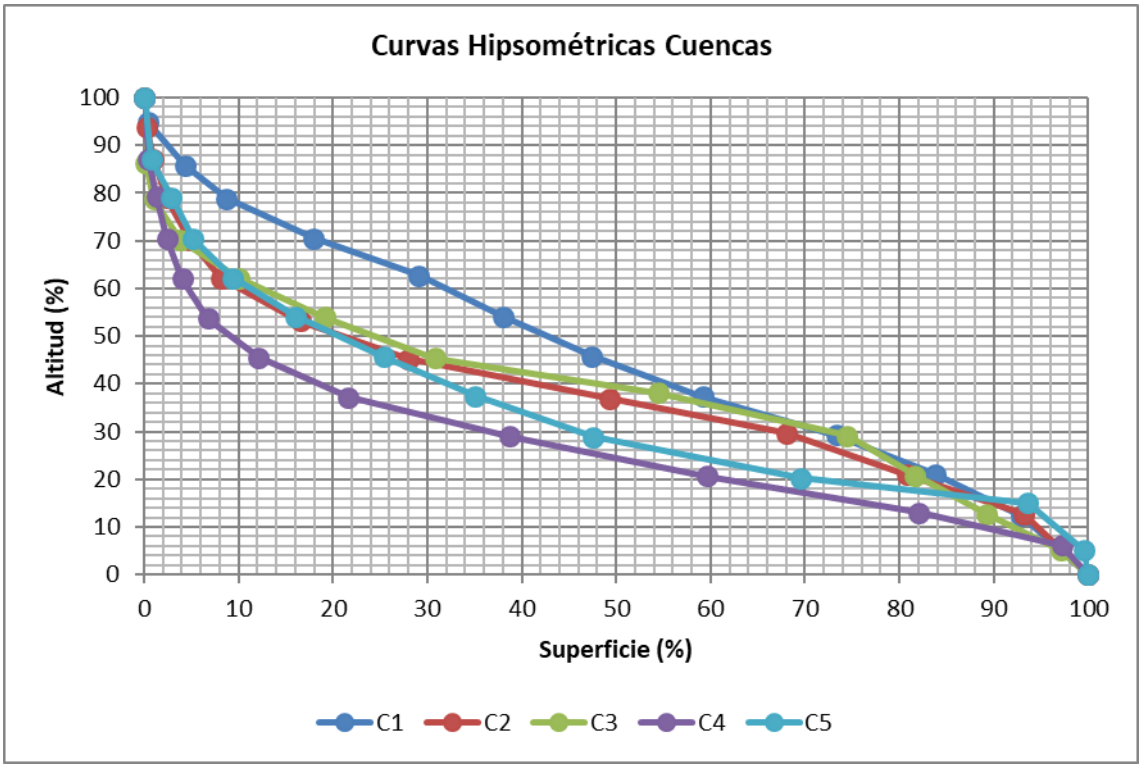

Figura 15*: Curvas Hipsométricas Cuencas y Subcuencas*

El área bajo la curva hipsométrica constituye la **Integral Hipsométrica (IH),** que se utiliza como un indicador del "ciclo de erosión" (Strahler, 1952). El ciclo de erosión puede dividirse en tres etapas: **vejez (IH<0,35),** en el cual la cuenca está completamente estabilizada, etapa de **madurez o equilibrio (IH entre 0,35 a 0,6)** y etapa **juventud o desequilibrio (IH>0.6**), donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión.

La ***Tabla 5*** muestra los valores de la integral Hipsométrica.

Cuenca	IH	Etapa
1	0.460	Madurez
2	0.373	Madurez
3	0.386	Madurez
4	0.274	Vejez
5	0.339	Vejez

Tabla 5: *Valores de la Integral Hipsométrica*

b)- Altura media (Hm): se calcula como el cociente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie.

$$Hm = \frac{Vg}{S}; \qquad Vg = \sum hi\, Si \qquad (3)$$

Donde:

Hm: altura media (m);

Vg: volumen de relieve que da la superficie del gráfico (m^3);

S: superficie de la cuenca (m^2);

hi: altitud media de cada área parcial comprendida entre dos curvas de nivel y

S*i*: área parcial entre curvas de nivel.

c)- Pendiente media de la cuenca (Im): se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante.

$$Im = \frac{h\left(\frac{lo}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} li + \frac{ln}{2}\right)}{S} \qquad (4)$$

Donde:

h: diferencia de alturas entre curvas de nivel (m);

lo: longitud de la curva de nivel de menor cota (m);

∑*li*: suma de las longitudes de las curvas de nivel intermedias (m);

ln: longitud de la curva de nivel de mayor cota (m) y

S: superficie de la cuenca (m^2).

d)- Coeficiente de masividad o de Martonne (Cm)*:* Se representa por "*tag α"* y fue establecido por Marmol (2008), su expresión es la siguiente:

$$Cm = taga = \frac{Hm}{S} \qquad (5)$$

Donde:

Hm: altura media de la cuenca (m) y

S: superficie de la cuenca (km^2).

Este coeficiente permite diferenciar netamente cuencas de igual altura media y relieve distintos, aun cuando no es suficiente para caracterizar la proclividad a la erosión de una cuenca, pues da valores iguales en el caso de cuencas diferenciadas, como es el caso en que la altura media y superficie aumenten proporcionalmente.

e)- Coeficiente Orográfico (CO): Este parámetro combina los dos parámetros del relieve actuantes en los procesos erosivos: la altura media, sobre la energía potencial del agua; y la inclinación característica de las laderas de la cuenca, sobre la energía cinética del flujo de la escorrentía superficial.

$$CO = Hm.tg\alpha \qquad (6)$$

Donde:

Hm: altura media de la cuenca (m) y

tag α: coeficiente de masividad.

Valores de:

- CO < 6 Relieve poco acentuado
- CO > 6 Relieve acentuado.
- CO > 25 indica cuencas de edad geológica reciente.

La ***Tabla 6*** muestra los valores de los Parámetros de relieve.

Cuenca	Hm (m)	Im (%)	Cm	CO
1	1084.9	18.5	18.25	0.020
2	1282.4	23.2	12.98	0.017
3	1338.0	16.1	4.44	0.006
4	1644.5	28.4	8.43	0.014
5	1734.0	23.4	13.95	0.024

Tabla 6: *Parámetros de relieve*

4.2.4 Parámetros Relativos a La Red Hidrológica

a)- Pendiente media del cauce principal (Jc): se calcula mediante la expresión de Taylor y Schwarz (1952):

$$Jc = \frac{Lc}{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{Lci}{\sqrt{Jci}}\right)} \qquad (7)$$

Donde:

Jc: pendiente media del cauce principal (m/m);

Lc: longitud total del cauce principal (m)

m: número de tramos a lo largo del cauce principal

Lc1; Lc2; ..., Lcm: longitud de cada tramo del cauce principal (m) y

Jc1; Jc2, ...; Jcm: pendiente de cada tramo del cauce principal (m/m)

b)- Tiempo de concentración (Tc*):* es el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca.

La pendiente media del cauce principal de la cuenca se obtuvo procesando el MDT sobre la traza del cauce mediante empleo del software ArcGIS.

El Tiempo de concentración es el tiempo que tarda toda la cuenca en contribuir a la escorrentía. Se calculó empleando tres ecuaciones diferentes y promediando luego entre estos para obtener el valor a utilizar en los cálculos de escorrentía.

Témez (1978)

$$T_c\,(hs) = 0.3 * \left(\frac{L}{i^{0.25}}\right)^{0.76} \qquad (8)$$

Siendo, L longitud del cauce principal (Km) e i pendiente del cauce principal (m/m)

Kirpich (1940)

$$T_c(hs) = 0.066 * \frac{L^{0.77}}{i^{0.385}} \quad (9)$$

Siendo, L longitud del cauce principal (Km) e i pendiente del cauce principal (m/m)

SCS (1973)

$$T_c\,(hs) = \frac{L^{0.8}\left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{441 * i^{0.5}} \quad (10)$$

Siendo, L longitud del cauce principal (m), i pendiente del cauce principal (%) y CN valor del Número de Curva de la cuenca

Los parámetros de la red de drenaje se muestran en la ***Tabla 7.***

Cuenca	Lc (km)	Jc (%)	Tc (h) Témez	Tc (h) Kirpich	Tc (h) SCS	Tc (h) Promedio
1	11.95	11.09	3.00	1.0	3.6	2.6
2	18.47	15.07	3.94	1.3	4.7	3.3
3	37.04	7.63	7.61	2.9	11.2	7.2
4	33.89	14.62	6.29	2.1	6.4	4.9
5	35.78	8.74	7.23	2.7	8.4	6.1

Tabla 7: *Parámetros de red de drenaje.*

4.2.5 Determinación Del Potencial De Escorrentía. Método del Numero de Curva del SCS

Este método ha sido desarrollado por el SCS (Soil Conservation Service, 1972). Es utilizado para el cálculo de precipitaciones efectivas o escurrimiento directo. El mismo consiste en considerar que la precipitación efectiva, Pe, es menor o igual que la precipitación total, P, que la retención acumulada, Fa, es siempre menor o igual que la retención potencial máxima, S, y que la escorrentía

potencial, es decir, el máximo volumen de agua que puede convertirse en escorrentía es P – Ia, siendo esta la abstracción inicial, el volumen de agua que se infiltra antes de que comience la escorrentía directa.

La hipótesis fundamental del método es la validez de la siguiente relación entre los parámetros descritos:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \tag{11}$$

Por continuidad se sabe que P = Pe + Ia + Fa, como se observa en ***Figura 16***.

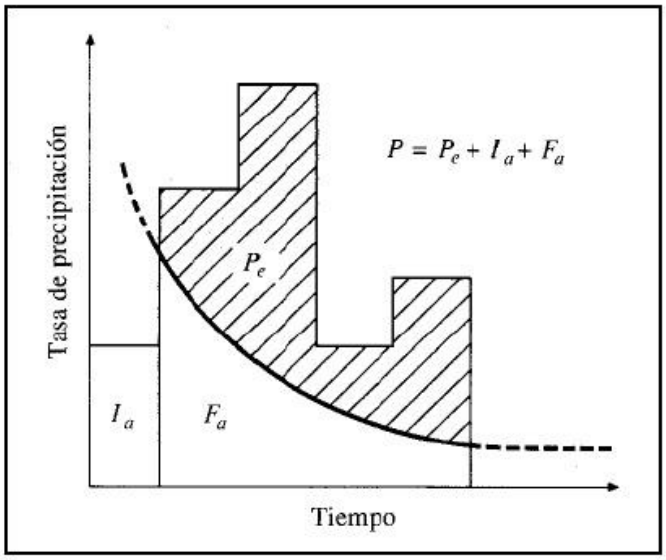

Figura 16: *Variables que intervienen en el método del SCS para abstracciones (Fuente: Chow V. T., et.al.1994, "Hidrología aplicada")*

Para el cálculo de la precipitación efectiva o escurrimiento directo, se utiliza el Método del Número de Curva (CN) del U.S. Soil Conservation Service, que es un modelo semi empírico que se basa en las siguientes relaciones funcionales:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S}; \qquad P > Ia \tag{12}$$

$$Pe = 0; \qquad P \leq Ia;$$

$$I = P - Pe \qquad (13)$$

Siendo:

Pe: escurrimiento (mm);

P: precipitación (mm);

S: retención potencial máxima (mm);

Ia: abstracción inicial (mm);

I: infiltración (mm).

La abstracción inicial incluye todas las pérdidas que se producen antes que se inicie el escurrimiento, retención en depresiones superficiales, intercepción por vegetación, evaporación e infiltración. La *Ia* es muy variable, pero es posible correlacionarla con parámetros del suelo y con la cobertura vegetal. Por estudios realizados en cuencas rurales se ha correlacionado *Ia* y *S* a través de la siguiente relación empírica:

$$Ia = S^{0.55} \qquad (14)$$

El valor de S está relacionado con el suelo y la cobertura vegetal a través del índice CN (Curva Número) mediante la siguiente expresión en milímetros:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \qquad (15)$$

El **índice CN expresa el potencial de escorrentía** de un terreno en función de la humedad antecedente del suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y uso del mismo. El valor máximo que puede alcanzar este índice es CN = 100, que indica que el terreno que se analiza es completamente impermeable, es decir, todo lo que llueve escurre en superficie.

La ***Tabla 8*** permite obtener un valor del índice CN para distintas coberturas y usos del suelo, para una condición humedad antecedente media (Antecedent Moisture Condition: AMCII). Para la obtención del CN a partir del tipo hidrológico del suelo, se asumió una cubierta con características de estepa arbustiva de clase **a** (Con menos del 5% de cobertura herbácea). Dentro de esta clasificación, se consideraron dos rangos de cobertura (***Figura 17*** y ***Figura 18***): 20 – 30 % y 30 – 40 % como se indica en el recuadro marcado en dicha tabla.

Figura 17: *Cubierta vegetal característica de la zona de estudio*

Figura 18*: Cubierta vegetal característica de la zona de estudio*

DESCRIPCION DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLOGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
- Suelo descubierto	77	86	91	94
- Estepa Arbustiva:				
a) Con menos del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	72	81	88	91
Cobertura entre el 20 - 30%	70	80	87	90
Cobertura entre el 30 - 40%	68	79	86	89
Cobertura mayor del 40%	51	70	80	84
b) Con más del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 - 20%	71	80	87	90
Cobertura entre el 20 - 30%	68	78	85	88
Cobertura entre el 30 - 40%	66	77	84	87
Cobertura mayor del 40%	49	68	78	82
- Estepa halófita	70	80	87	89
- Estepa halófita - higrófita	51	70	80	84

***Tabla 8**: Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas (INCYTH, 1980).*

El complejo hidrológico suelo-cobertura es muy importante para el cálculo de la precipitación efectiva o escorrentía directa. Los grupos de suelos hidrológicos identificados en la referida tabla son:

- Suelos Grupo A: Tienen alta velocidad de infiltración, aun cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta velocidad de transmisión.

- Suelos Grupo B: Tienen moderadas velocidades de infiltración cuando están bien húmedos. Consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Con moderada velocidad de transmisión.

- Suelos Grupo C: Tienen infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el descenso del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Tienen lenta transmisión de agua.

- Suelos Grupo D: Tienen infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos de arcilla con alto potencial de expansión. Tienen lenta transmisión de agua.

Los valores del índice CN de las tablas, como se expresó, se refieren a la condición media de humedad en el suelo (AMCII). El SCS define tres condiciones de humedad, estos son:

AMCI. Seca: suelo que permite una capacidad de infiltración alta, asociada con intensidades desde 0 a 635 mm/año.

AMCII. Media: suelo que permite una capacidad de infiltración normal, asociada con intensidades desde 635 a 1270 mm/año.

AMCIII. Húmeda: suelo que permite una capacidad de infiltración baja, con intensidades mayores de 1270 mm/año.

Para la obtención del índice CN para las condiciones seca (AMCI) o húmeda (AMCIII) se utilizan las ecuaciones (16) y (17), respectivamente:

$$CN(AMCI) = \frac{4.2\ CN(AMCII)}{10-0.058\ CN(AMCII)} \tag{16}$$

$$CN(AMCIII) = \frac{23\ CN(AMCII)}{10+0.13\ CN(AMCII)} \tag{17}$$

Dónde: CN (*AMCII*): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente II o media, este valor es el obtenido de tablas. CN (*AMCI*): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente I o seca. CN (*AMCIII*): valor de número de curva para la condición de humedad antecedente III o húmeda.

El mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos se confeccionó a partir de la reclasificación del mapa de Tipo de Suelos según Textura de acuerdo con la ***Tabla 9***.

GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO	TIPO DE SUELO SEGÚN TEXTURA
A	Arenoso Arenoso franca Areno-limoso
B	Franco-arenoso Franco Franco-limoso
C	Franco-arcilloso-arenoso Franco-arcilloso Franco-arcillo-limoso Arcillo-arenoso Arcillo limoso
D	Arcilloso

Tabla 9: *Grupos Hidrológicos de Suelos. (Bradbury, K.R.; Dripps, W.; Hankley, C; Anderson, M.; Potter, K., 2000)*

La determinación del índice CN se realiza de manera distribuida mediante álgebra de mapas y reclasificaciones digitales de los mapas de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo, Grupos Hidrológicos de Suelos y Pendientes. Las operaciones para la determinación del índice CN se representan en el siguiente diagrama de flujo (***Figura 19***):

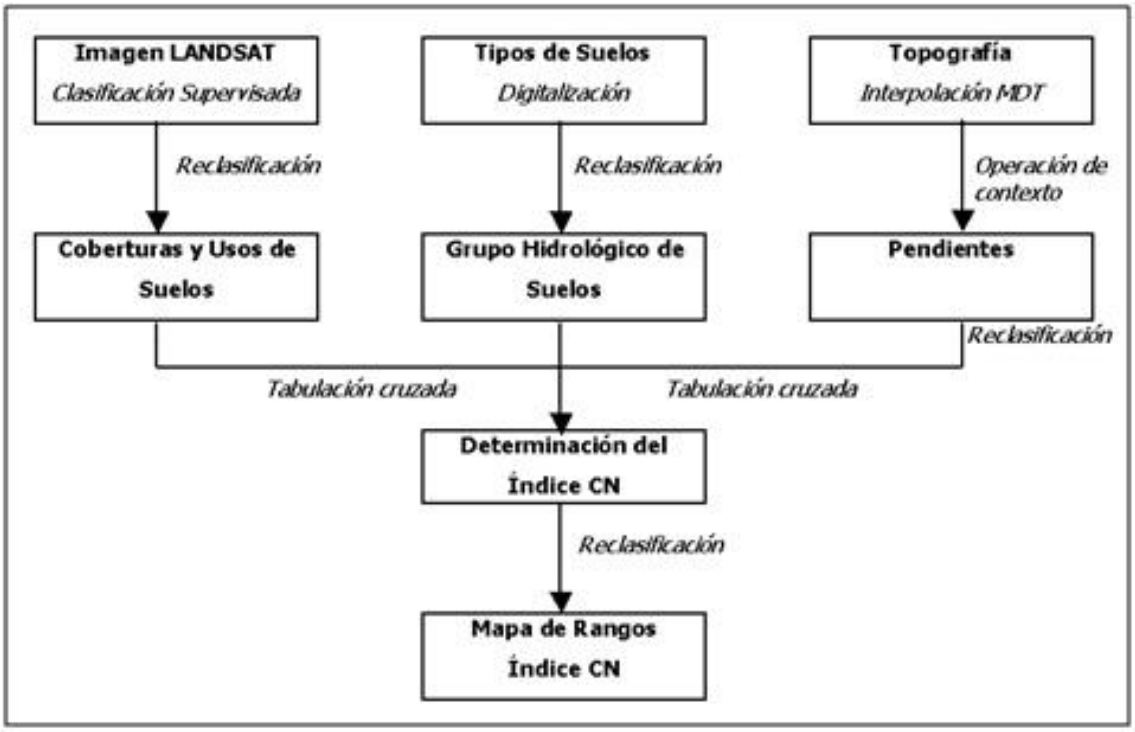

Figura 19**:** *Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en SIG. Cálculo del índice CN distribuido. Elaborado sobre la base del método propuesto por el USSCS (1975)*

4.2.6 Clasificación Digital de Imágenes. Mapa de Coberturas y usos del Suelo

De una imagen Landsat8 OLI (P2312R087) obtenida del portal USGS Global Visualization Viewer (http://glovis.usgs.gov/), previo procesamiento, retroproyección a Posgar94-Faja2 y circunscripción al sistema de cuencas (***Figura 20***), se efectuó una clasificación supervisada con el software Erdas Imagine obteniéndose el mapa de coberturas que se muestra en la ***Figura 21***.

En dicha clasificación es necesario un previo conocimiento de la zona de estudio mediante trabajo de campo u otro tipo de información. Este proceso consiste en una asignación de pixeles de identidad conocida, ubicados dentro del área de entrenamiento, que luego se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida.

En la etapa de entrenamiento, se seleccionaron áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés (cultivos, forestaciones, suelos, etc.) delineándolas sobre la imagen digital bajo formas de polígonos (muestras) cuyos datos numéricos quedan archivados en la computadora como regiones de interés, constituyendo los “datos de entrenamiento”. Luego, se crearon las firmas

espectrales de esas muestras, que son utilizadas en la clasificación. Realizadas estas firmas, se procedió a la fase de asignación, en la cual a cada píxel de la imagen se le asignó una categoría, definidas en la fase de entrenamiento.

Para este proyecto, se utilizó el siguiente criterio, correspondiente a la ***Tabla 8***:

a) Estepa arbustiva con menos del 5% de cobertura herbácea, y se asume como parámetro el siguiente concepto:

Estepa 1: cobertura > 30% (A: 68; B: 79; C: 86; D: 89)

Estepa 2: cobertura < 30% (A: 70; B: 80; C: 87; D: 90). En la ***Figura 20*** se observa el mapa de imagen Landsat 8, con la delimitación de la cuenca y la red de drenaje.

Una vez procesados los datos con el soft, se obtiene el mapa de coberturas del suelo (***Figura 21***).

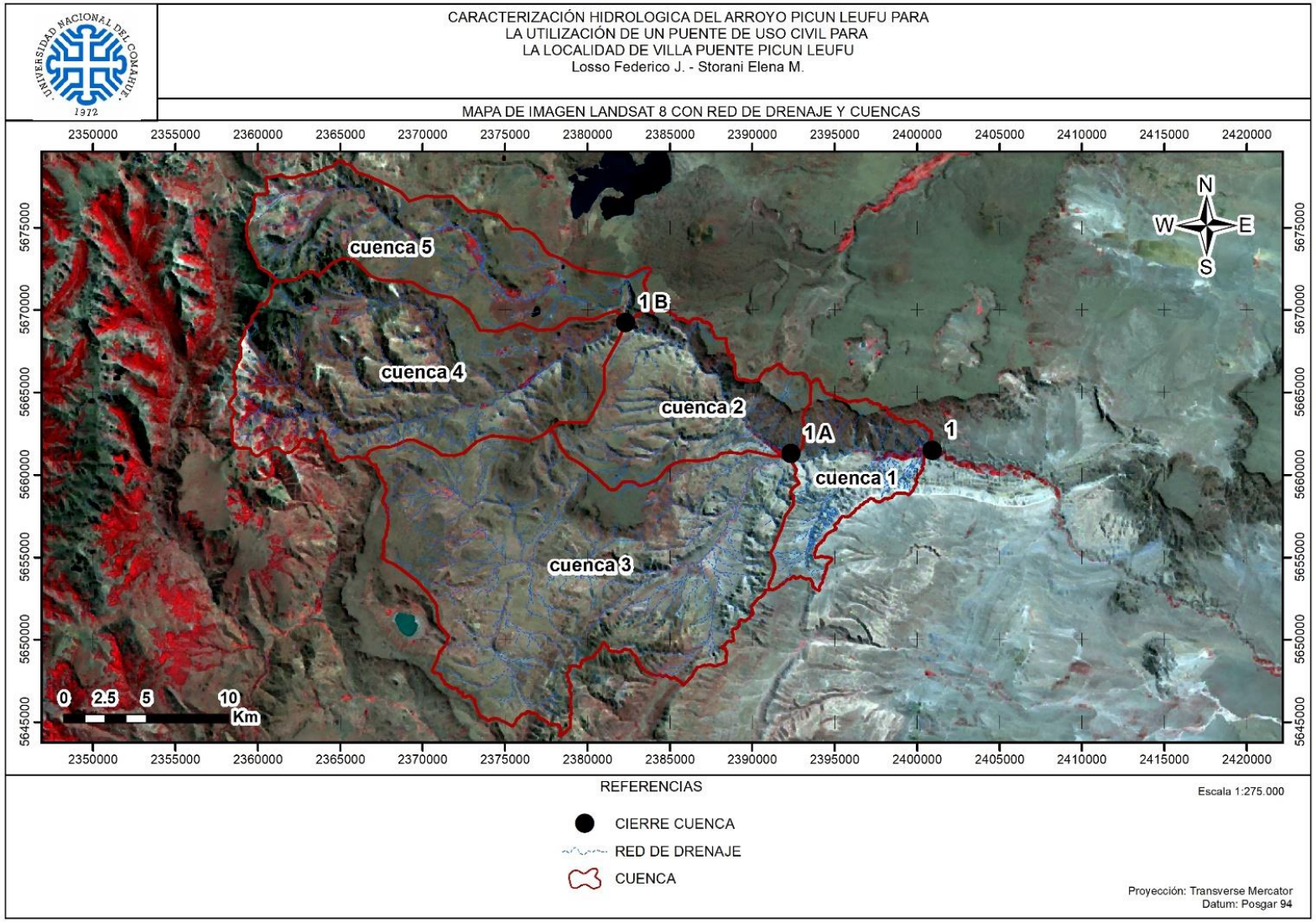

***Figura 20**: Mapa de Imagen Landsat8 (B543)*

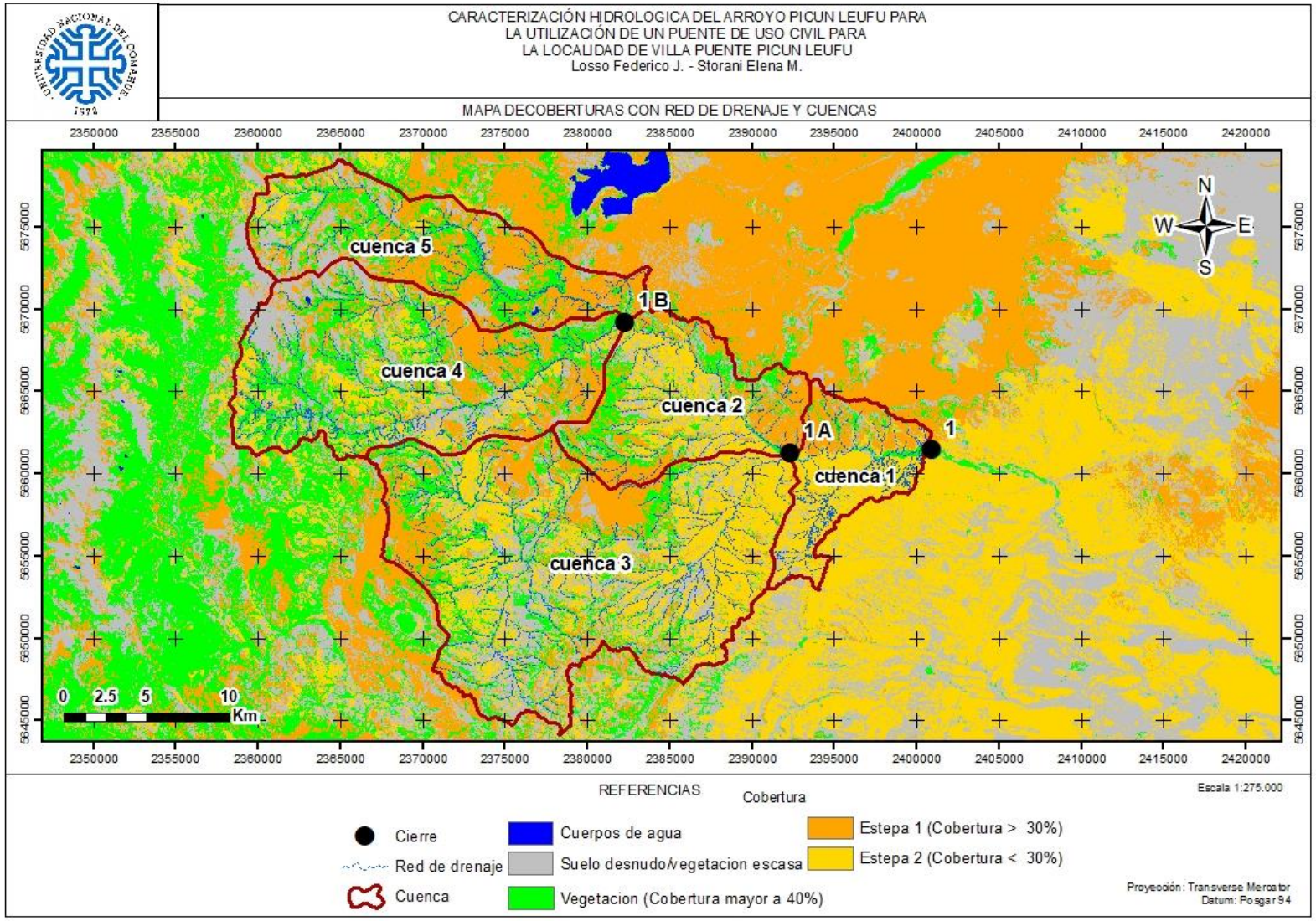

Figura 21: *Mapa de Coberturas*

4.2.7 Mapa De Grupos Hidrológicos De Suelos

Del Atlas Digital de Suelos de la República Argentina elaborado por el INTA, se obtuvieron las características de los distintos tipos de suelos que se encuentran en las cuencas. Los suelos predominantes son los del orden Aridisol. Éstos se caracterizan por un horizonte superficial claro y pobre en materia orgánica por debajo del cual pueden aparecer una gran variedad de caracteres morfológicos de acuerdo con las condiciones y a los materiales a partir de los que se han desarrollado. Estos caracteres pueden ser el resultado de las actuales condiciones de aridez o heredadas de condiciones anteriores y los procesos involucrados en su génesis incluyen la migración y acumulación de sales solubles, carbonatos y arcillas silicatadas o concentraciones de calcáreo o sílice. También pueden presentar alteraciones de los materiales originales sin evidencias de ninguna acumulación significativa. Son los suelos de climas áridos ya sean fríos o cálidos, que no disponen durante largos períodos de agua suficiente para el crecimiento de cultivos o pasturas polifíticas. También se encuentran suelos del orden Entisol. En este orden están incluidos los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica.

En función de las texturas de los mismos se elaboró el mapa de suelos y texturas correspondiente (***Figura 22***). Como se observa, el tipo de suelos y texturas predominantes es el denominado Areno-Franca, en menor medida el Franco-Arenoso, y en proporciones ínfimas se observa Material Rocoso.

Tomando los datos de la ***Tabla 9*** y las características de texturas de los suelos de las cuencas en análisis, se confeccionaron los mapas correspondientes de los Grupos Hidrológicos de Suelos (***Figura 23***). Aquí podemos apreciar que el grupo hidrológico predominante es el A, en menor medida el B y, en un sector reducido, el D. Se puede decir que, en la mayor parte de nuestra cuenca en estudio, los suelos tienen alta velocidad de infiltración, aun cuando están muy húmedos, teniendo alta velocidad de transmisión. En sectores menores, se tiene moderada velocidad de infiltración cuando están bien húmedos, con moderada velocidad de transmisión. Y ya en sectores muy reducidos, se tiene infiltración muy lenta cuando están muy húmedos, con lenta transmisión de agua.

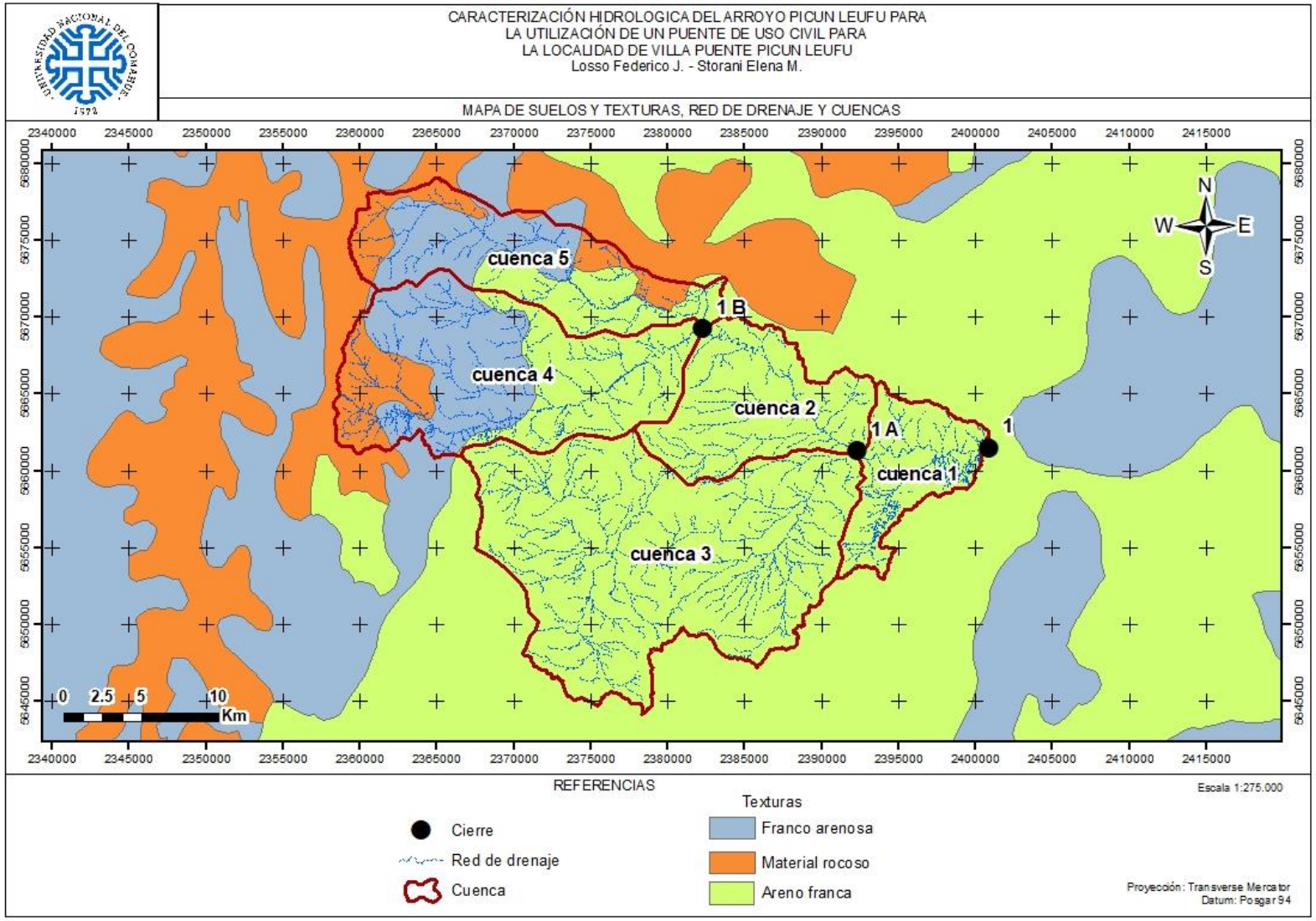

Figura 22: *Mapa de suelos y texturas*

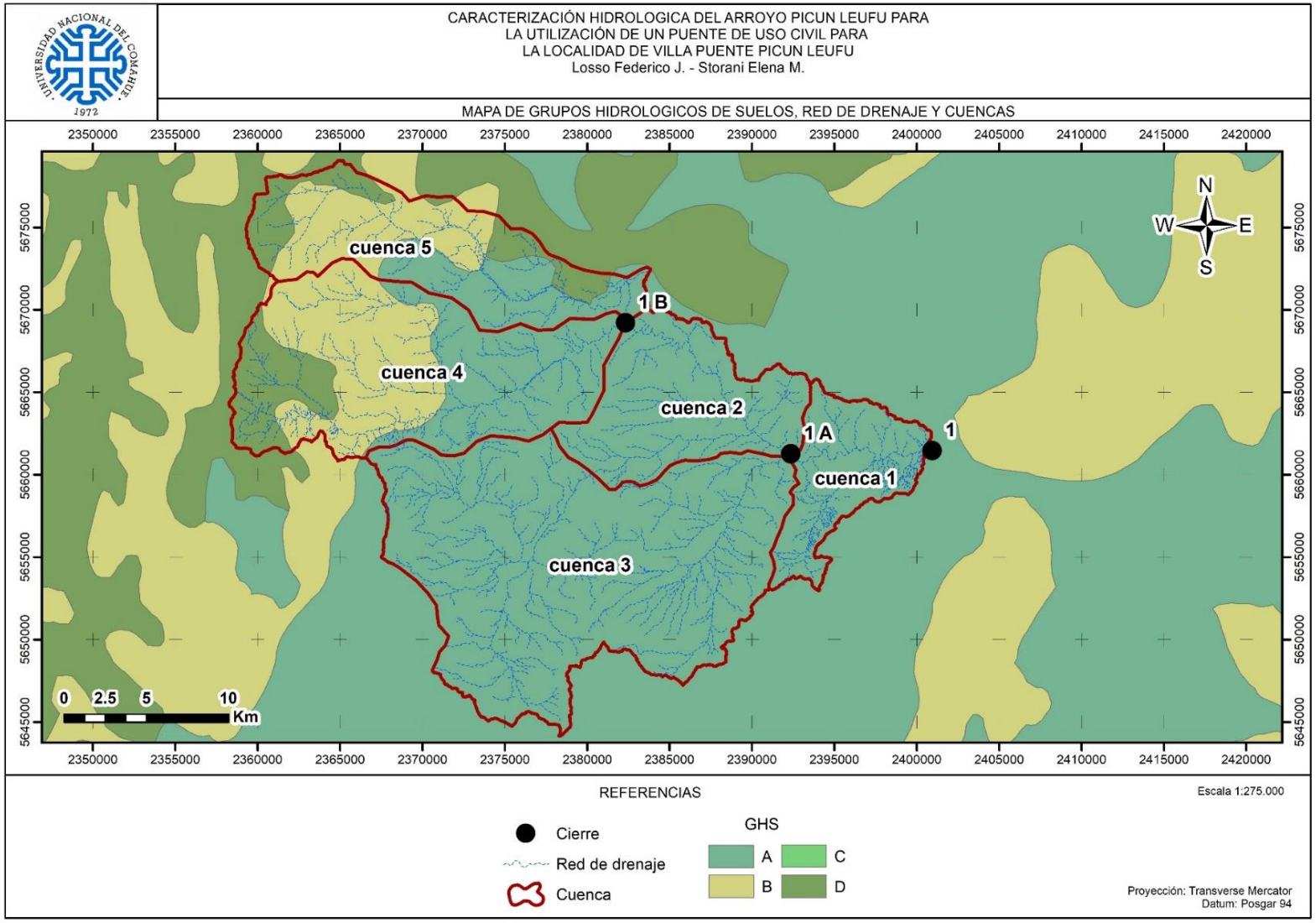

***Figura 23**: Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos*

4.2.8 Mapa De Pendientes

El estudio de la pendiente se basa en el cálculo del gradiente de pendiente para las distintas cuencas estudio. La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. Su estimación partir del MDT se basa en el cálculo de la pendiente de un plano de ajuste en cada punto o celda del modelo. La pendiente es calculada por:

$$tanG = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \qquad (18)$$

Donde:

z: es la altitud;

x e y: son coordenadas axiales.

En la ***Figura 24*** se muestra el mapa de pendientes de las cuencas aluvionales. Se puede observar que predominan valores de pendiente promedio de 18% aproximadamente en las cuencas del Este y aumenta hacia el Oeste a un valor promedio de 26% debido a la presencia de relieves montañosos próximos al Cordón montañoso del Chachil.

El método de obtención de CN aplicado hasta el momento no tiene en cuenta los efectos de las pendientes. Sin embargo, los valores de pendientes que se determinaron en la zona de estudio del proyecto son elevadas, por esta razón, se consideró un factor de importancia para la determinación de los escurrimientos superficiales.

Obtenido el mapa de CN para las condiciones de humedad I, II y III se determinó el valor de CN corregido en función de la pendiente.

La modificación por pendiente del índice CN, se realiza mediante la ecuación propuesta por Williams et al (1990) para pendientes mayores a 3%:

$$CN_{ap} = \frac{(CN_{III} - CN_{II})}{3}[1 - 2\,Exp(-13.86\,Pend.)] + CN_{II} \qquad (19)$$

Donde:

CNap: Índice CN ajustado por pendiente,

CNII: Índice CN con Condición Humedad Antecedente II,

CNIII: Índice CN con Condición Humedad Antecedente III,

Pend.: pendiente en porcentaje.

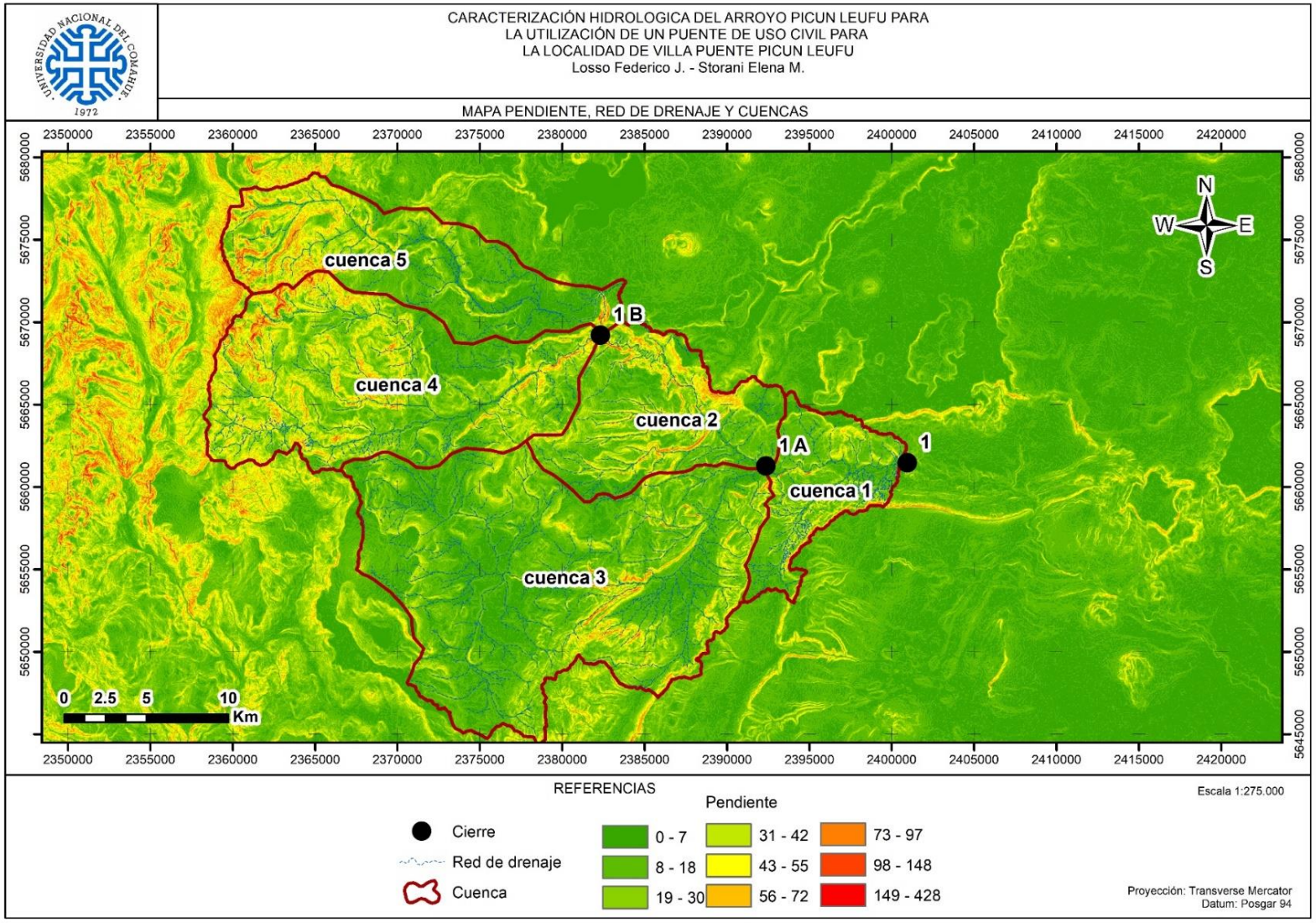

Figura 24: *Mapa de pendientes*

4.2.9 Algebra De Mapas. Potencial De Escorrentía

Obtenidos los mapas del modelo cartográfico se procede a la obtención de los mapas de potencial de escorrentía considerando el estado de humedad antecedente II (AMCII).

En la ***Tabla 10*** se dan los valores promedios del índice CN para los tres estados de humedad antecedente (AMC) para las cuencas en análisis.

Cuenca	CN1	CN2	CN3
1	54	73	86
2	51	71	85
3	52	72	86
4	60	78	89
5	61	79	90

Tabla 10: *Valores del índice CN*

De la tabla anterior se observa que los índices CN para los estados AMCII y AMCIII son elevados, lo que implica que escurrirá por superficie la mayor parte de las precipitaciones intensas que se produzcan sobre las cuencas. En la ***Figura 25*** se muestra el mapa de escorrentía de la cuenca.

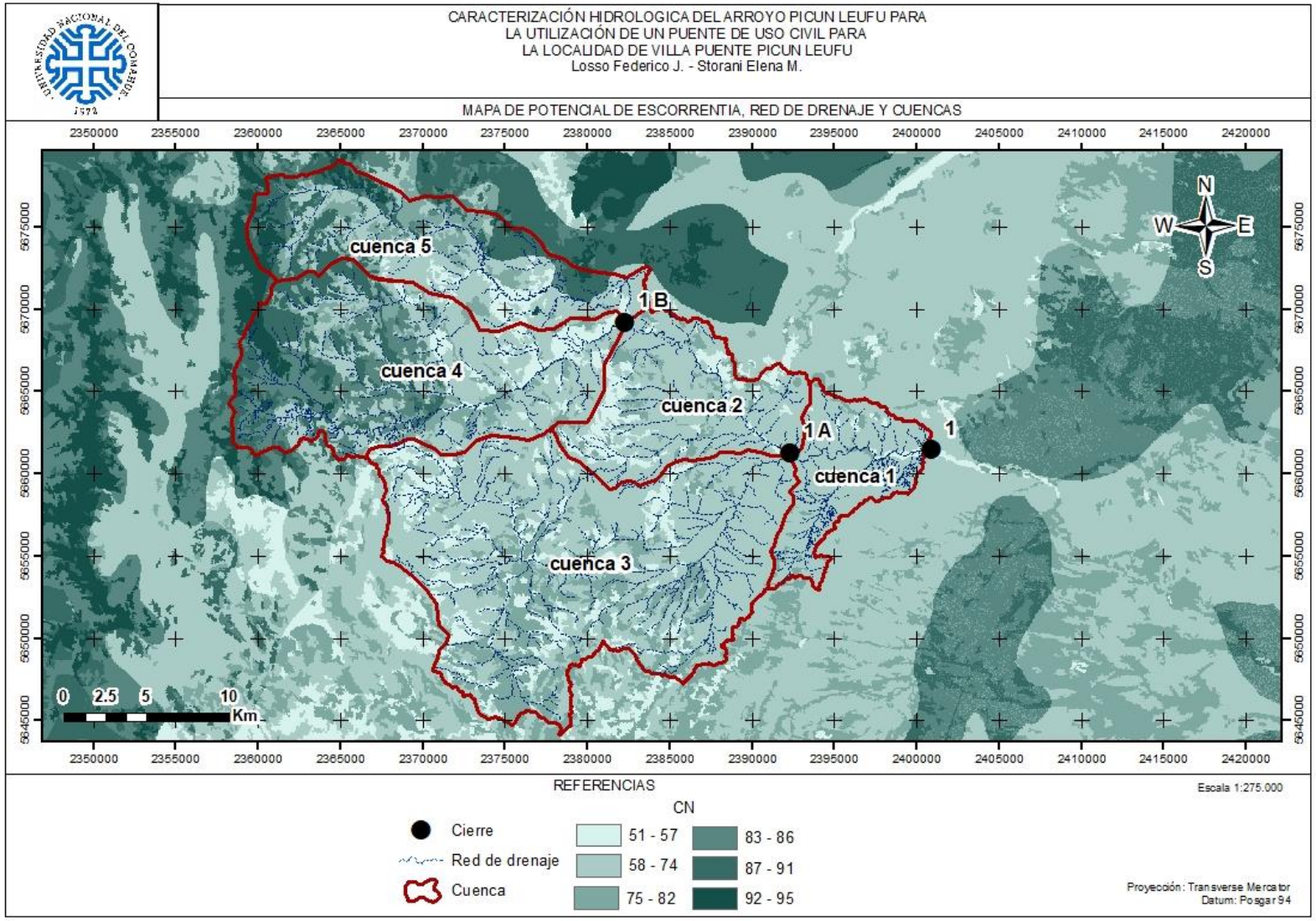

Figura 25: *Mapa de potencial de escorrentía*

4.2.10 Precipitaciones Intensas-Tormentas De Proyecto (ver anexo RRHH)

Se recopilaron datos de precipitaciones diarias registrados en las estaciones meteorológicas Puesto Painemilla y Picún Leufú Arriba (ver coordenadas de estaciones en ***Tabla 11***), provistos por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC) (***Figura 26***).

Estación	Latitud	Longitud	Cota (msnm)
Picún Leufú Painemilla	39° 11’ 40.18” S	70° 10’ 48.69” O	852
Picún Leufú Arriba	39° 9’ 57.15” S	70° 28’ 37.61” O	1241

Tabla 11*: Coordenadas de las Estaciones Meteorológicas*

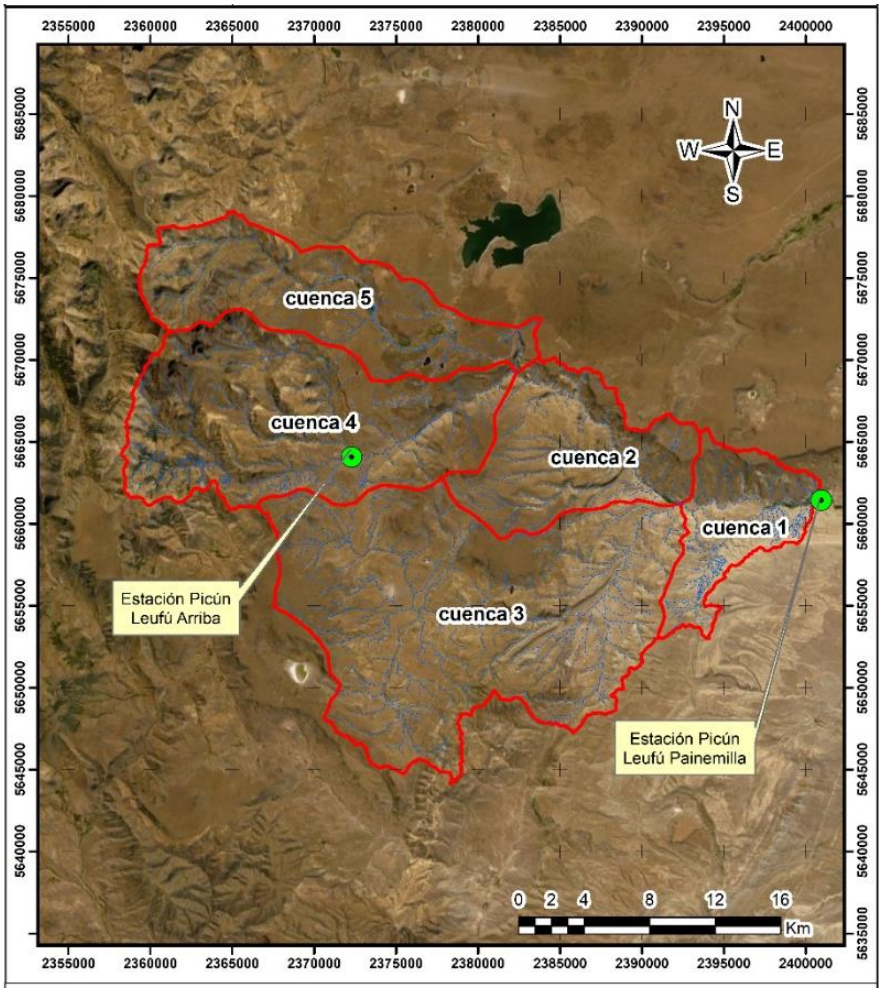

Figura 26: *Mapa de estaciones meteorológicas*

Para el ajuste estadístico a una distribución de probabilidad de las precipitaciones diarias, se utilizaron series de duraciones parciales que están conformadas por datos máximos diarios anuales.

Se registraron valores de precipitaciones diarias durante 26 años (1993-2018) en la estación Picún Leufú Arriba y 22 años (1997-2018) en la estación Puesto Painemilla. Para el ajuste estadístico a una distribución de probabilidad se utilizaron las máximas precipitaciones obtenida de las precipitaciones máximas diarias anuales (mm) de ambas estaciones (***Tabla 12***).

	Precipitación Máxima Diaria Anual (mm)		
Año	Picún Leufú Arriba	Puesto Painemilla	Máximo
1993	83	s/d	83
1994	66	s/d	66
1995	42	s/d	42
1996	30.4	s/d	30.4
1997	60	0.6	60
1998	29	28.15	29
1999	40	24	40
2000	35	78	78
2001	72	40	72
2002	117	50	117
2003	85	18	85
2004	33	49.5	49.5
2005	52	66	66
2006	48.2	26	48.2

2007	35	15	35
2008	35	40	40
2009	35	28	35
2010	20	27	27
2011	30	40.5	40.5
2012	37	28.5	37
2013	40	24.5	40
2014	50.3	39.5	50.3
2015	35	30	35
2016	68	50	68
2017	37	52	52
2018	38	40	40

Tabla 12: *Registros de precipitaciones máximas diarias anuales por estación.*

Con relación al tipo de serie adoptada, Bonacci (1984) reporta que no existe consenso entre investigadores de cual tipo de serie de datos debería ser utilizada en los análisis de valores extremos. Por su parte Chow (1964), establece que la utilización de cada uno de los tipos de series es determinada por cada proyecto específico en los cuales se vayan a aplicar los resultados de los eventos extremos. Para este proyecto se determinó adecuado proyectar con el valor máximo obtenido entre ambas estaciones, considerando que se abarcaría mayor cantidad de registros y se estaría trabajando del lado de la seguridad.

Se realizó el ajuste de las precipitaciones diarias máximas a la función de distribución de probabilidad de los valores extremos (GEV- “General Extreme values”). La función de distribución de valores extremos tiene tres formas básicas, Gumbel (EVI), Frechet (EVII) y Weibull (EVIII). Estas tres funciones son casos especiales de una distribución GEV cuya función de distribución acumulada es:

$$F(x) = exp\left[-\left(1 - k\frac{(x-\beta)}{\alpha}\right)^{1/k}\right], \text{con } 1 - k\frac{(x-\beta)}{\alpha} > 0, k \neq 0 \qquad (20)$$

Donde

k es un parámetro de forma

β un parámetro de localización

α un parámetro de escala

Estos parámetros a determinar dependen del promedio y del desvío estándar de la serie de datos.

En la función de Gumbel, k=0 y los valores de la variable x no tiene límite. Se aplicó esta función a la serie de máximos obtenidos de las dos estaciones. Esta ley de distribución ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste, a valores máximos de caudales, precipitación en distintos periodos de tiempo, etc. Una variable aleatoria x sigue una distribución de probabilidad de Gumbel si:

$$F_{(x)} = P_{(x<X)} = e^{-(\exp(-\alpha(x-\beta)))}, \text{con } -\infty \leq x \leq \infty \qquad (21)$$

donde α, β son parámetros de la función, y x la variable de estudio:

$$\alpha = \frac{1}{0.7805 * \sigma_{n-1}} \qquad (22)$$

$$\beta = x_{prom} - \frac{0.577}{\alpha} \qquad (23)$$

En la ***Tabla 13*** se observan los parámetros estadísticos obtenidos por el Método de Gumbel para la serie de datos seleccionada:

Promedio	Desvío estándar	alfa	beta
52.535	21.122	0.061	43.022

Tabla 13: *Parámetros Estadísticos – Función de distribución de Gumbel.*

Aplicando los parámetros a la ecuación (21) se tiene la distribución Gumbel para la serie de datos seleccionada. Con la ecuación obtenida se obtienen los valores de precipitación máxima diaria asociada las recurrencias analizadas.

A continuación, se observan los valores de Precipitación Máxima de 24 horas (***Tabla 14***).

Tiempo de recurrencia TR (años)	Probabilidad P (1/TR)	Precipitación máxima en 24 horas P24 (mm)	Intensidad Media Máxima de lluvia de 24 horas (mm/h)
2	0.5	49.064	2.044
5	0.2	67.750	2.823
10	0.1	80.122	3.338
25	0.04	95.753	3.989
50	0.02	107.349	4.473
100	0.01	118.860	4.953

Tabla 14: *Precipitación Máxima de 24 horas e intensidad media máxima de lluvia de 24 hs.*

Con la obtención del P24 (Precipitación Máxima en 24 horas), se obtienen las intensidades para poder determinar el hietograma porcentual de bloque alterno para las distintas duraciones de tormentas establecidas.

4.2.11 Duraciones de tormentas

Se realizó la determinación de las duraciones de tormentas de proyecto y la confección de los hietogramas correspondientes siguiendo los lineamientos sugeridos por los técnicos de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén. Las duraciones a considerar surgen de analizar los tiempos de concentración de las cuencas considerándolas iguales o

superiores a estos. Se admiten agrupamientos en intervalos de 30 minutos. Por lo tanto, se adoptaron los siguientes tiempos de concentración (Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén):

Cuenca 1: ***3 horas***

Cuenca 2: ***3.5 horas***

Cuenca 3: ***6 horas***

Cuenca 4: ***5 horas***

Cuenca 5: ***6 horas***

Se sabe que las precipitaciones en la zona en estudio son predominantemente de origen convectivo con duraciones inferiores o iguales a 6 horas (en el 75% de los casos) y que para duraciones mayores la frecuencia disminuye notablemente. En base a ello, se adoptó para estas cuencas una duración de tormentas de proyecto inferior a 6 horas.

4.2.12 Tormentas de proyecto

Las tormentas de proyecto en el presente estudio se definirán mediante hietogramas acumulados que especifican la distribución temporal de la precipitación durante la tormenta de determinada duración.

Para las duraciones de tormentas adoptadas y las recurrencias analizadas, se obtuvieron las curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia). Las curvas IDF relacionan la intensidad de la lluvia con su duración. Para cada frecuencia de ocurrencia se tiene una curva diferente, cuanto menor es la frecuencia del evento analizado, mayor es la intensidad, es decir que los eventos más intensos son menos frecuentes.

Para duraciones menores a una hora se utilizó la ecuación de Cartaya:

$$I_D\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{P_D}{D} = \frac{1{,}041 * D^{0{,}49} * P_{1h}}{D} \qquad (24)$$

Donde:

I_D: Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia estipulada.

D: Duración en horas, 0<D<1 hora

P_{1h}: Precipitación máxima acumulada en 1 hora para la recurrencia estipulada

Diversos autores han estudiado la desagregación temporal de las precipitaciones máximas de 24 horas a duraciones menores. García (2001) describe los coeficientes de desagregación temporal de P24 obtenido por investigadores en distintos países. En la ***Tabla 15*** se describen algunos valores de la relación P_{1h}/P24 horas:

País	Autor y Año	P1h/P24h	
		Máximo	Mínimo
Argentina	Medina et al 1975	0.57	0.39
Argentina	Lucero 1994	0.57	0.39
Argentina	García et al 1988	0.65	0.52
USA	Bell 1969, otros	0.56	0.4
Promedio		**0.59**	**0.42**

Tabla 15*: Coeficientes relación P1 hora / P24 horas*

Luego, se adopta para aplicar en a formula de Cartaya la siguiente relación: $\frac{P_{1h}}{P_{24h}} = 0.59$ (Anexo RRHH).

Para duraciones mayores a una hora se empleará la ecuación del Método de Intensidad Contigua-MIC:

$$I_D\left(\frac{mm}{h}\right) = 13{,}98 * I_{24} * D^{-0{,}83} \tag{25}$$

I_D: Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia estipulada.

D: Duración en horas, 1<D≤24 horas

I_{24}: Intensidad máxima media de la lluvia de 24 hs en mm/hs, obtenida de la Precipitación Máxima de 24 horas (PM24) para la recurrencia determinada ***(Tabla 14)***.

Luego, las ***Figuras 27*** a ***30*** muestran las gráficas IDF para las distintas duraciones de las tormentas adoptadas. Para el análisis de este proyecto, se tuvieron en cuenta las tormentas de diseño de 50 y 100 años respectivamente:

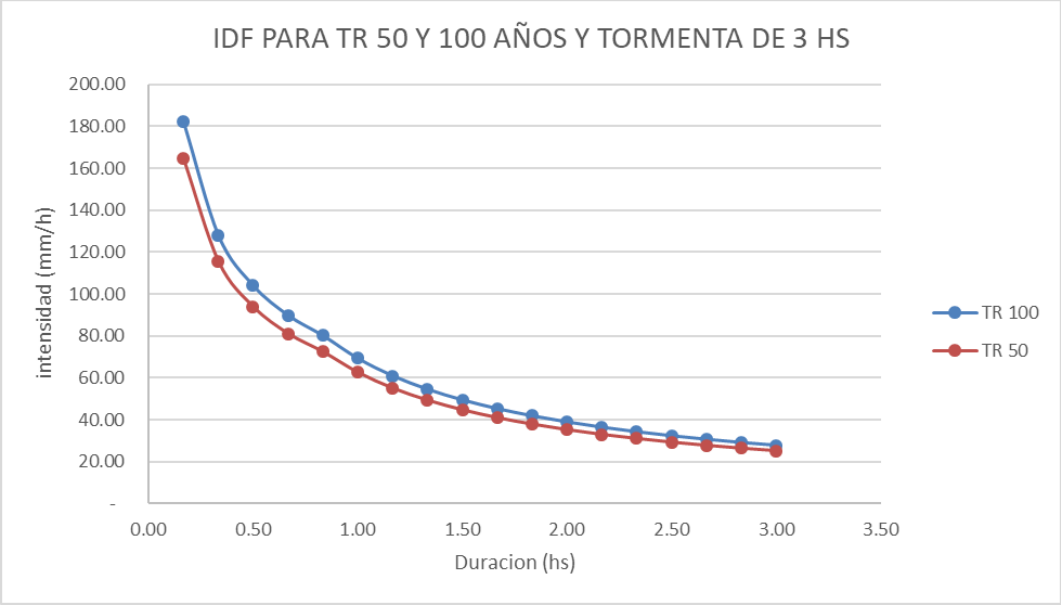

Figura 27: *IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 3 hs.*

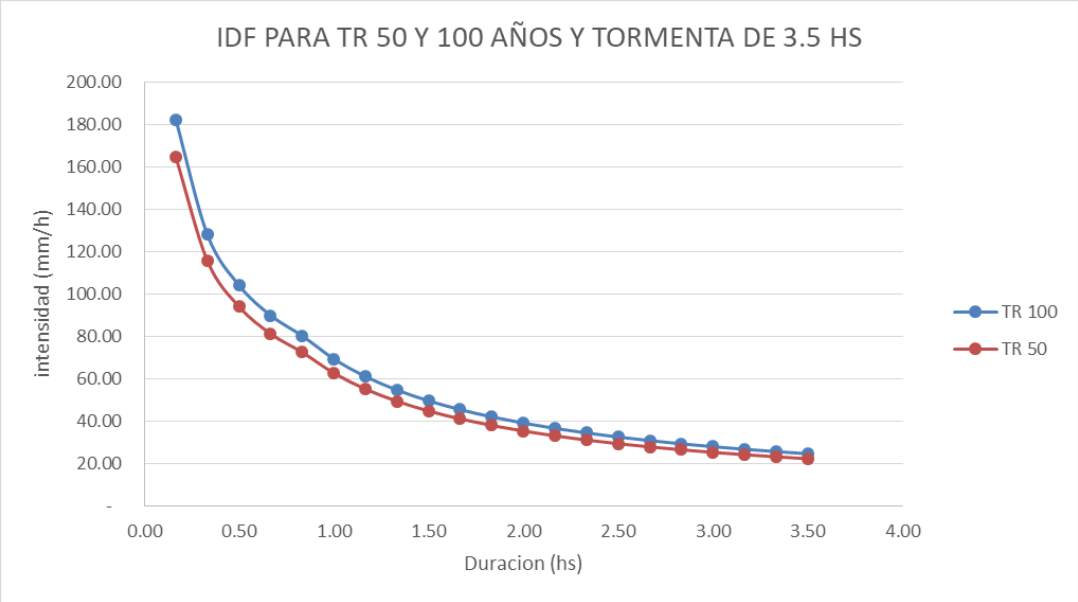

Figura 28: *IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 3,5 hs.*

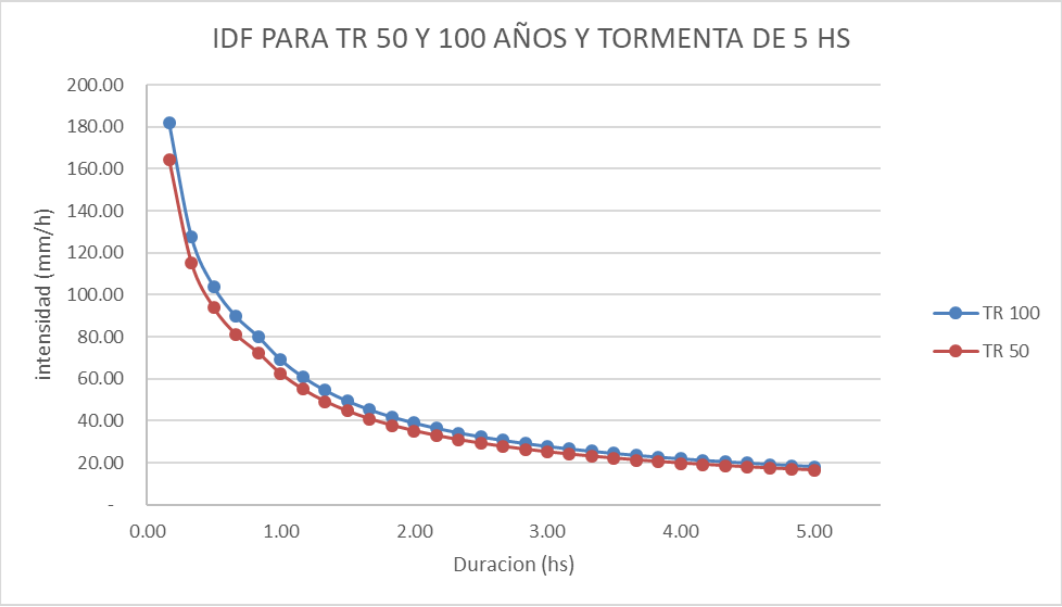

***Figura 29**: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 5 hs.*

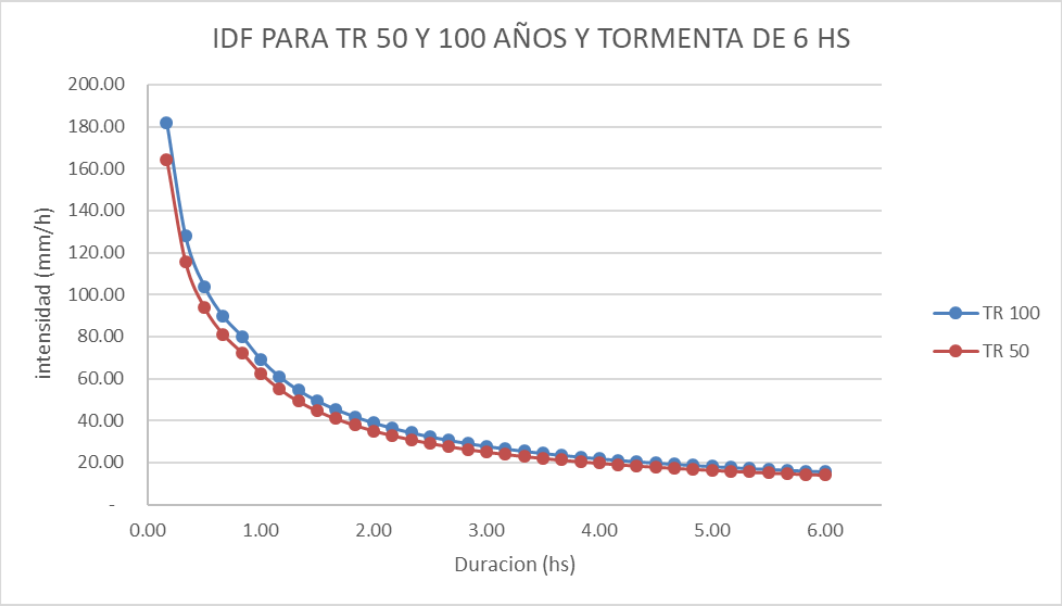

***Figura 30**: IDF para TR 50 y 100 años y tormenta de 6 hs*

Aplicando la ecuación (25) con las duraciones adoptadas, la ***Tabla 16*** muestra los montos de precipitaciones totales para las duraciones adoptadas y los tiempos de recurrencias analizadas, obtenidas mediante la siguiente formula:

$$P = I * D \tag{26}$$

Donde:

P = Precipitación Total (mm).

I = Intensidad Máxima obtenida mediante la fórmula (25) para las duraciones adoptadas (mm/hs).

D = Duración de tormenta adoptada para cada cuenca (hs).

Precipitaciones Totales (mm)		
D (horas)	TR50	TR100
3	75.37	83.45
3.5	77.37	85.67
5	82.21	91.02
6	84.80	93.89

Tabla 16: *Precipitaciones Totales (mm) para las duraciones de tormentas adoptadas.*

4.2.13 Tormentas de Proyecto Adoptadas

En los métodos de diseño hidrológicos actuales, en donde se calculan hidrogramas, es necesario contar con una distribución temporal de la precipitación. El más utilizado es el método del Bloque Alterno. Este método especifica el volumen de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt, sobre una duración total especificada previamente, Td = n Δt.

La metodología a seguir es la siguiente:

- Se selecciona el periodo de retorno de diseño.
- Se calcula el volumen de precipitación multiplicando la intensidad por la duración (formula (26)).
- Se calcula la cantidad de precipitación correspondiente a cada intervalo de tiempo tomando diferencias entre valores sucesivos de volumen de precipitación.
- Se reordenan los bloques de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida Td y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el pluviograma de diseño.

Siguiendo la normativa propuesta por Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén, para la distribución de precipitaciones en el tiempo, se utilizó el método de Bloque Alterno con el pico de hietograma entre un 25 y 33% de la duración total.

En base a esto, se confeccionaron los hietogramas de bloque alterno porcentuales para cada una de las duraciones adoptadas que luego se combinan con los valores de las precipitaciones totales de la ***Tabla 16***, en las ***Figuras 31 a 34*** se observan los hietogramas porcentuales generados.

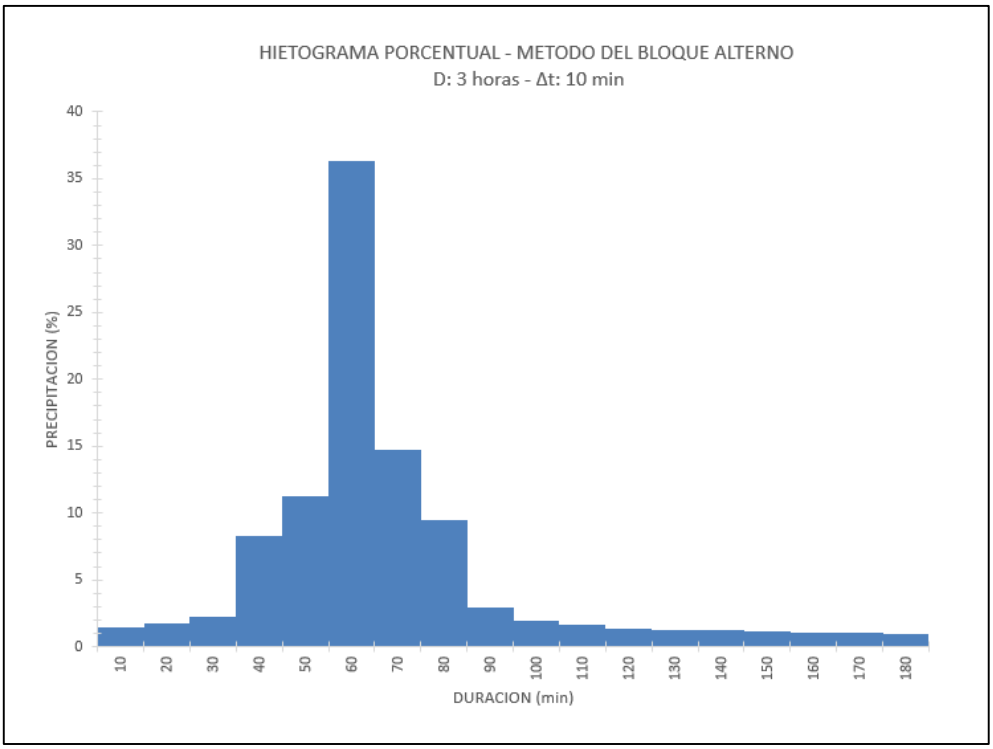

Figura 31: *Hietograma Porcentual Tormenta de 3 horas.*

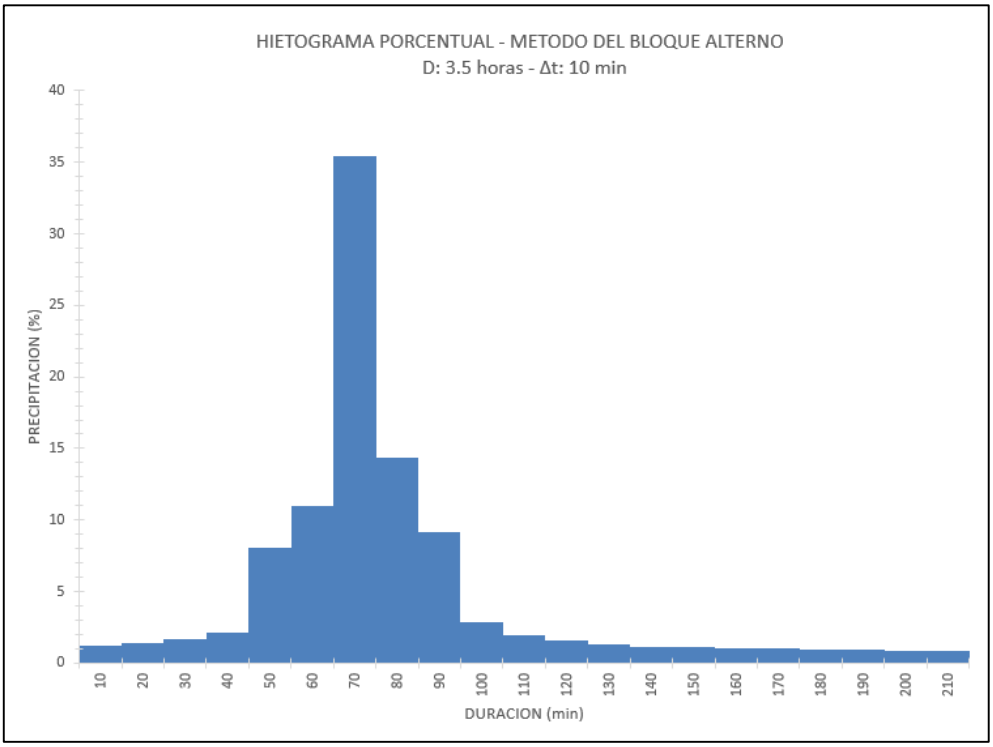

Figura 32: *Hietograma Porcentual Tormenta de 3,5 horas.*

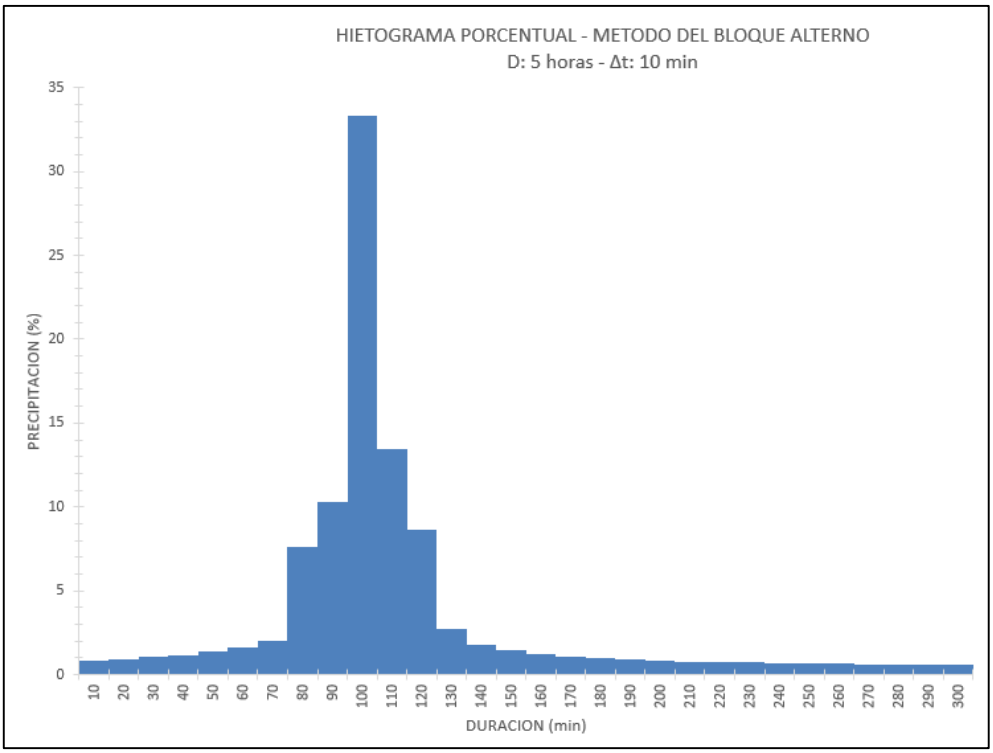

Figura 33: *Hietograma Porcentual Tormenta de 5 horas.*

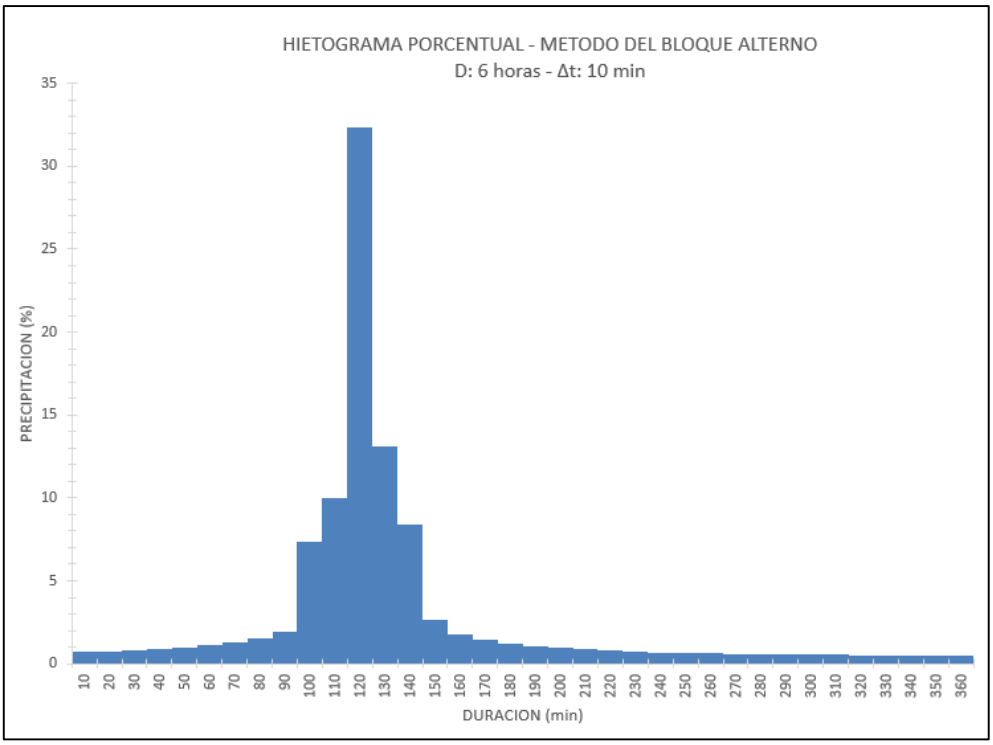

Figura 34: *Hietograma Porcentual Tormenta de 6 horas.*

4.2.14 Modelación Hidrológica – Modelo HEC-HMS

Se aplicó el modelo HEC-HMS al área de estudio, se adoptó como Modelo de Cuenca (Basin Model) una topología de cálculo independiente para cada cuenca aluvional identificada. El Método del Número de Curva (índice CN) se adoptó para la estimación de las pérdidas de precipitación, el Método de Snyder (1938) para la transformación de lluvia-caudal y no se consideró el flujo base o subterráneo, dado que interesa conocer el flujo superficial que es el que aporta mayor volumen de agua en una crecida aluvional.

El hidrograma unitario sintético generado por Snyder (1938) relaciona las características del hidrograma unitario estándar (***Figura 35(a))*** a partir de las cuales pueden calcularse las características de un hidrograma unitario requerido (***Figura 35(b))*** para una duración de lluvia dada: el caudal pico por unidad de área de la cuenca q_{pr}, el retardo de la cuenca tpr (diferencia entre el centroide del hietograma de exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario), el tiempo de base t_b y los anchos W (en unidades de tiempo) del hidrograma unitario al 50% y 75% del caudal pico. Con estas características puede representarse el hidrograma unitario requerido.

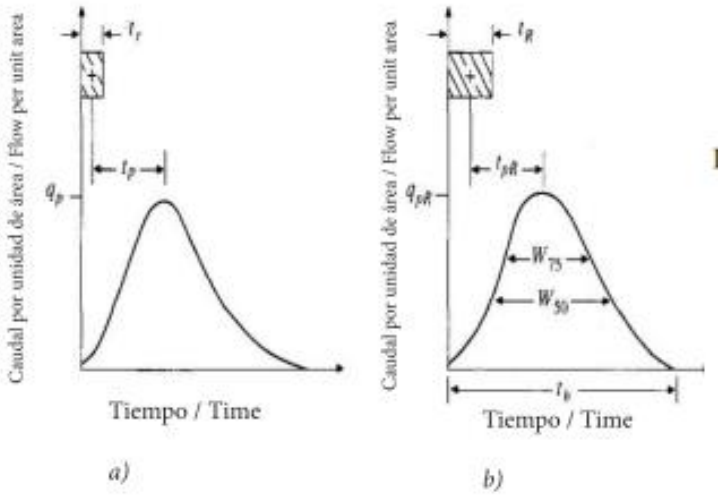

Figura 35: (a) *Hidrograma Unitario de Snyder.* ***(b)*** *Hidrograma Unitario Requerido*

Snyder, definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración de lluvia (Tr) se relaciona con el tiempo de retardo (T_L) de la siguiente forma:

$$T_L = 5.5\, T_r \tag{27}$$

Para el hidrograma unitario estándar encontró que:

La relación para obtener el tiempo de retardo:

$$T_L = C\ C_t\ (L\ L_c)^{0.3} \tag{28}$$

Donde

T_L: Tiempo de retardo (h);

Ct: coeficiente de cuenca, varía entre 1,35 (pendientes altas) y 1,65 (pendientes bajas);

L: longitud del cauce principal desde la divisoria a la salida de la cuenca (km);

Lc: Longitud del cauce principal desde el punto más cercano al centroide de la cuenca hasta la salida de la cuenca (km),

C: una constante conversión de unidades (0,75 para SI)

Si la duración de los hidrogramas unitarios buscados para la cuenca hidrográfica de interés es diferente de la especificada por la ecuación (26), se puede utilizar la siguiente relación

$$T_{LR} = T_L - \frac{T_r - T_R}{4} \tag{29}$$

T_R: duración establecida, T_{LR}: tiempo de retardo modificado

Además, Snyder descubrió que el tiempo de retardo (T_L) y el pico por unidad de exceso de precipitación por unidad de área de la cuenca se relacionan a través de:

$$\frac{U_p}{A} = C\ \frac{C_p}{T_L} \tag{30}$$

Donde

Up: pico del HU,

A: área de drenaje de las cuencas hidrográficas;

Cp: coeficiente pico del HU

C: constante de conversión (2,75 en SI)

El SCS (1972) a partir de un estudio de hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales de distintos tamaños indica que el tiempo de retardo T_L se puede obtener en función del tiempo de concentración de la cuenca T_C:

$$T_L = 0.6\, T_C \qquad (31)$$

Donde

T_L: Tiempo de retardo (h);

Tc: Tiempo de concentración (h)

Este último criterio es el que se utilizó para la obtención de los tiempos de retardo. En la ***Tabla 17*** se muestran los resultados obtenidos de los mismos:

Cuenca	T_L (h)
1	1.54
2	1.98
3	4.34
4	2.95
5	3.65

Tabla 17: *Valores de tiempo de retardo T_L.*

El hecho de subdividir la cuenca en subcuencas y de obtener el tiempo de concentración de las mismas con más de una ecuación empírica (para el presente trabajo, Témez, Kirpich y SCS), busca

reducir la incertidumbre asociada y adoptar resultados más conservadores desde el punto de vista del diseño de obras hidráulicas. De modo que se adoptó el uso del método de SCS para el tiempo de retardo asumiendo que los resultados obtenidos son adecuados para obtener modelaciones aceptables.

El Control de Especificaciones (Control Specifications) define el periodo de tiempo en el que se realizara la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar para graficar el hidrograma. Se utilizará un período de 24 horas y un intervalo de tiempo de 1 minuto para graficar cada punto del hidrograma de escurrimiento.

En la ***Figura 36*** se muestra la tipología empleada para la determinación de la escorrentía en la cuenca aluvional.

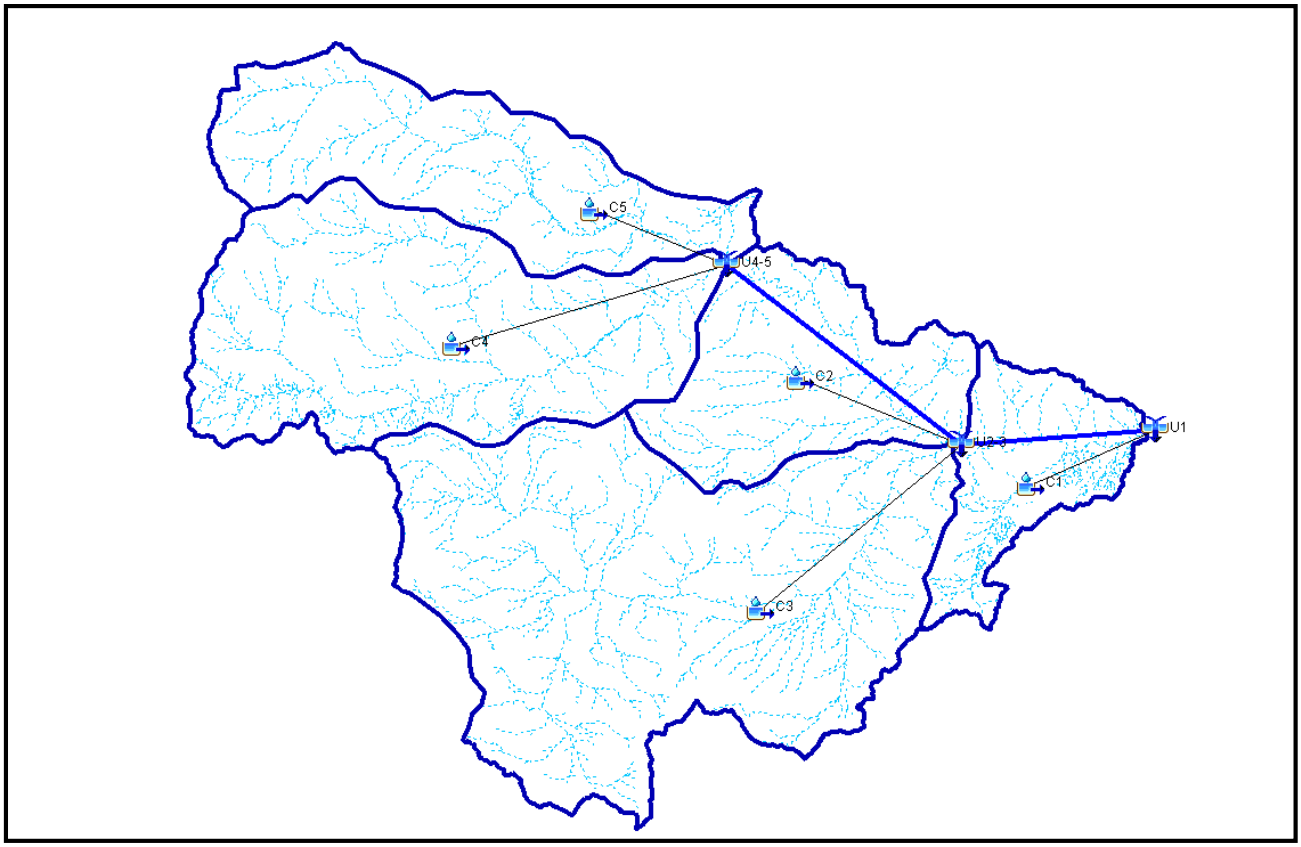

Figura 36**:** *Esquema topológico en HEC HMS para la simulación de la escorrentía en las cuencas*

Se consideró para el análisis de evaluación de escorrentía de las cuencas el estado de humedad antecedente media (AMCII).

Los valores de caudales y volumen de escorrentía para las tormentas de proyecto consideradas y para la Condición de Humedad Antecedente Intermedia (AMCII) obtenidos en la modelación se presentan en la ***Tabla 18***.

	Estado de Humedad Antecedente Intermedio (AMCII)			
	TR50		TR100	
CUENCA	Qmáx. (m^3/seg)	V (1000m^3)	Qmáx. (m^3/seg)	V (1000m^3)
C1	937.0	22013.0	1160.0	26775.8
C2	790.3	12970.8	960.1	15636.2
C3	351.1	7778.6	433.5	9573.5
Confluencia C4-C5	628.2	10995.1	755.4	13166.7
C4	416.3	6443.5	501.6	7736.0
C5	239.8	4551.6	287.0	5430.6

Tabla 18: *Valores de caudales máximos y volúmenes de escorrentías.*

A continuación, en las ***Figuras 37 a 41***, se muestran los hidrogramas simulados con el modelo HEC-HMS correspondientes a las cuencas de estudio. La ***Figura 42*** muestra los hidrogramas de crecida a la salida de cada subcuenca y el hidrograma total de la cuenca en el punto de salida, producto de una tormenta de 50 años de recurrencia y con humedad antecedente AMCII (intermedio). Del mismo modo, las ***Figuras 43 a 47*** muestran los hidrogramas de subcuencas y total para la tormenta de 100 años de recurrencia y también con humedad antecedente AMCII (intermedio), y la ***Figura 48*** la crecida a la salida de cada subcuenca y el hidrograma total de la cuenca en el punto de salida, producto de una tormenta de 100 años de recurrencia y con humedad antecedente AMCII (intermedio).

En todas las figuras, los hietogramas de precipitación están graficados en la parte superior izquierda de manera invertida, los mismos están discretizados cada 5 minutos, que es el tiempo mínimo de análisis adoptado para la simulación. La precipitación total se representa en color azul, las pérdidas por abstracción inicial e infiltración en color rojo. La diferencia entre ambas constituye la precipitación neta.

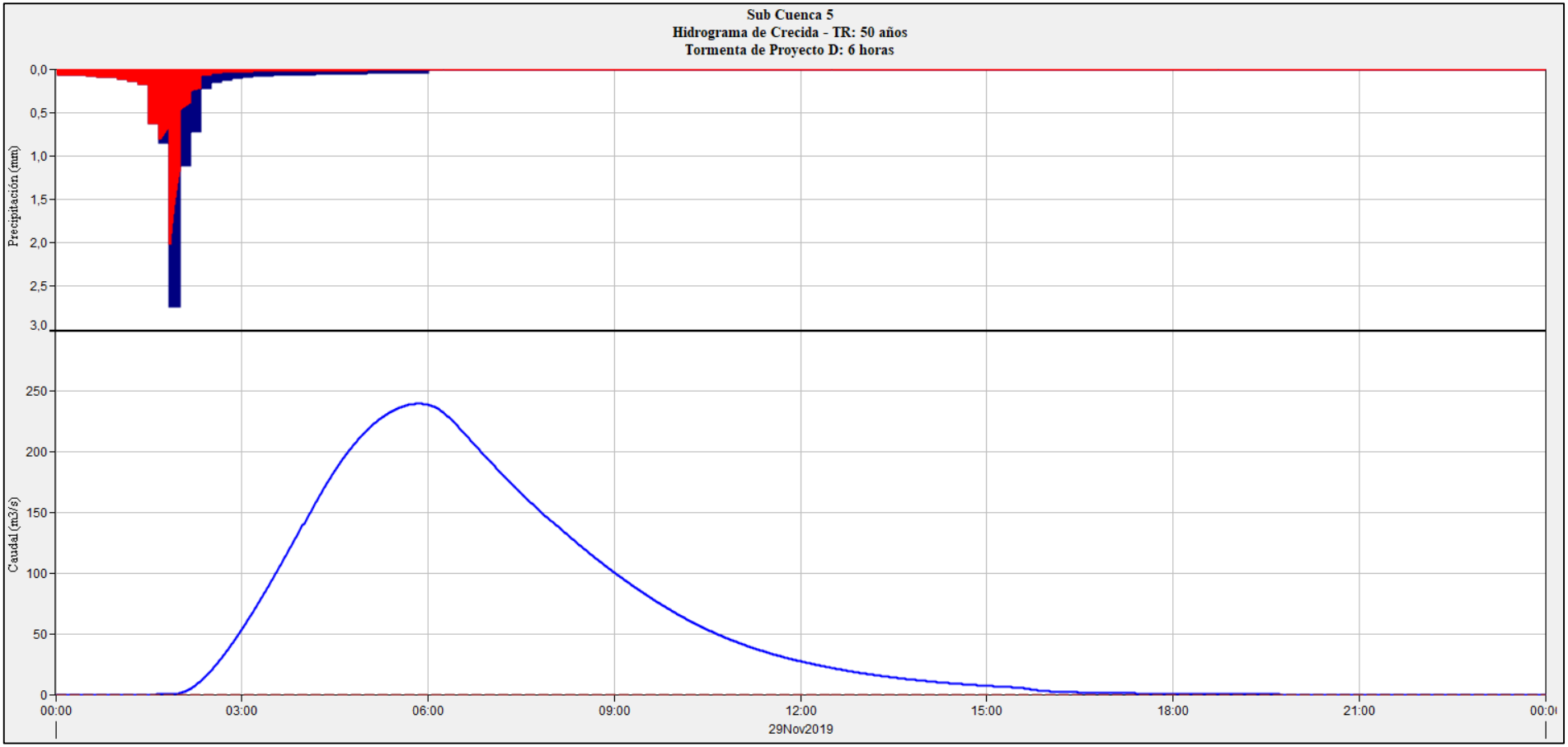

***Figura 37**: Hidrograma de crecida Sub Cuenca 5, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas.*

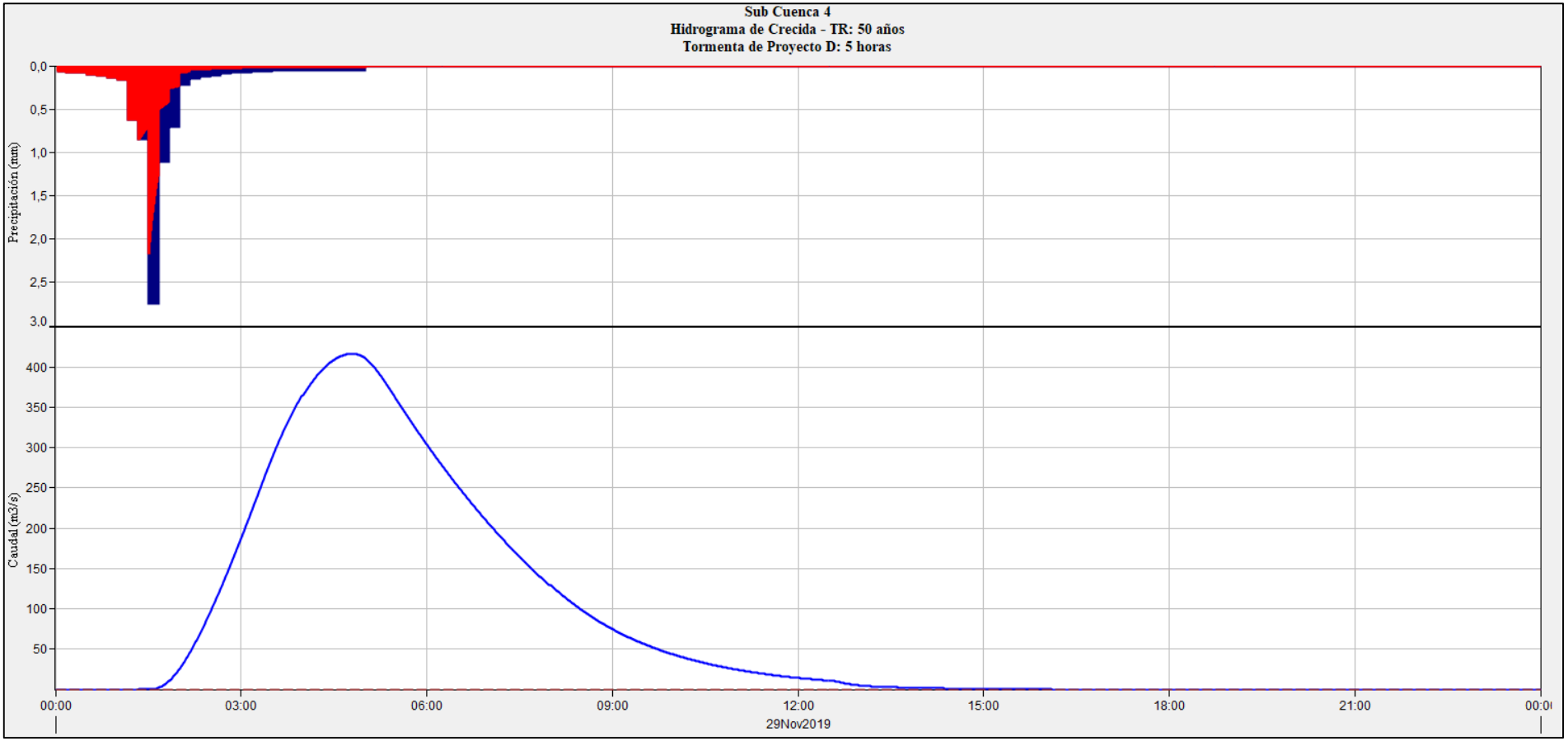

Figura 38: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 4, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 5 horas.*

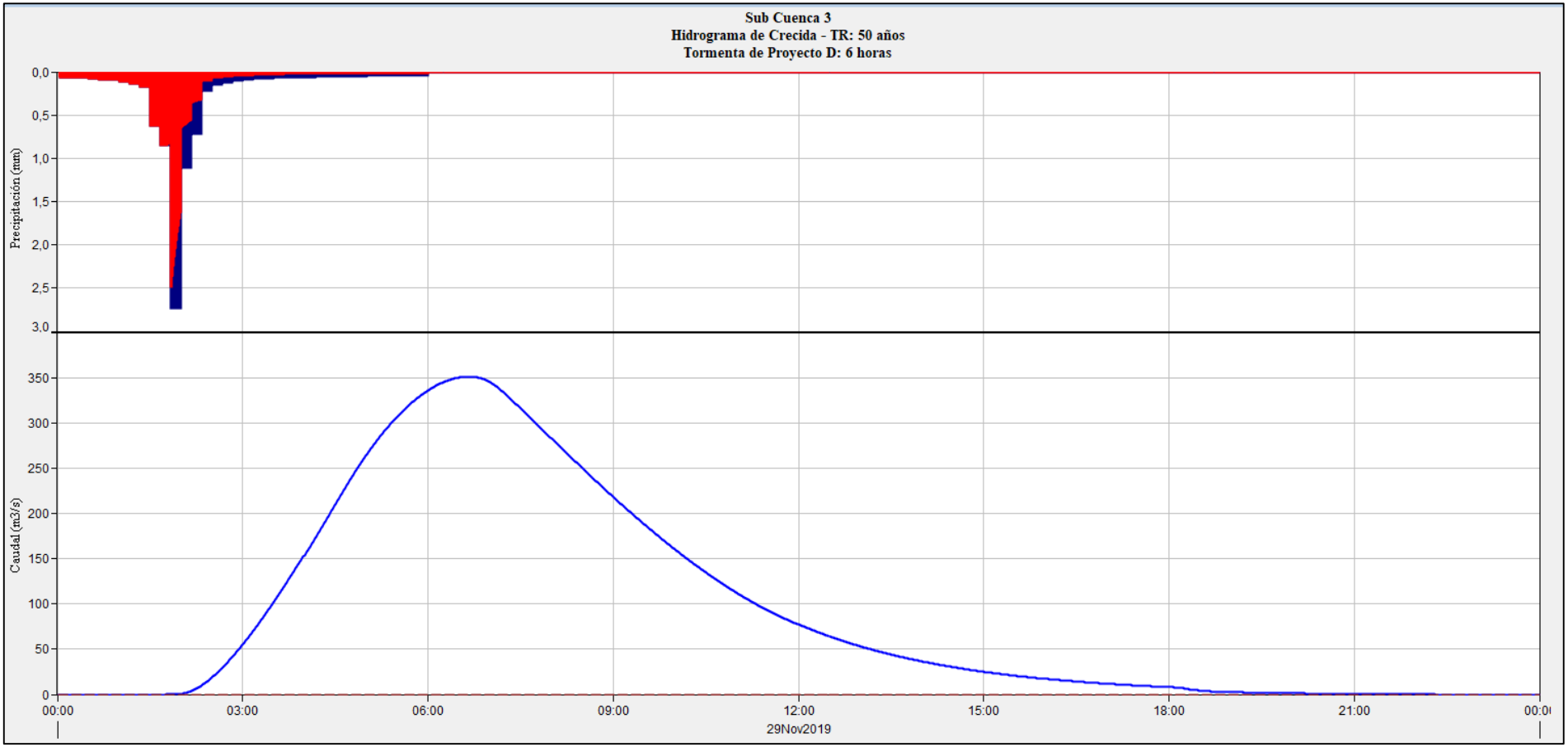

Figura 39: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 3, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas.*

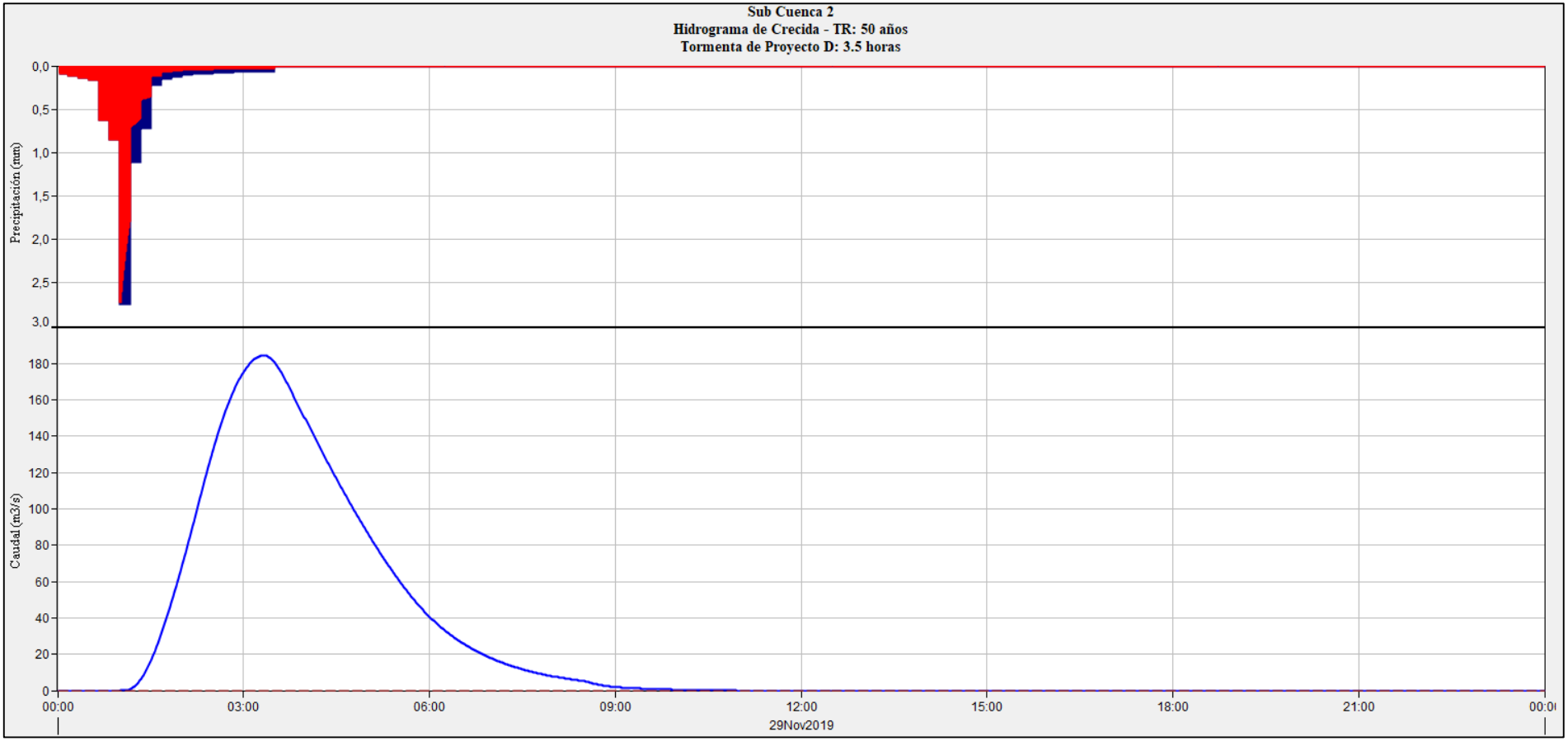

Figura 40: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 2, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 3,5 horas.*

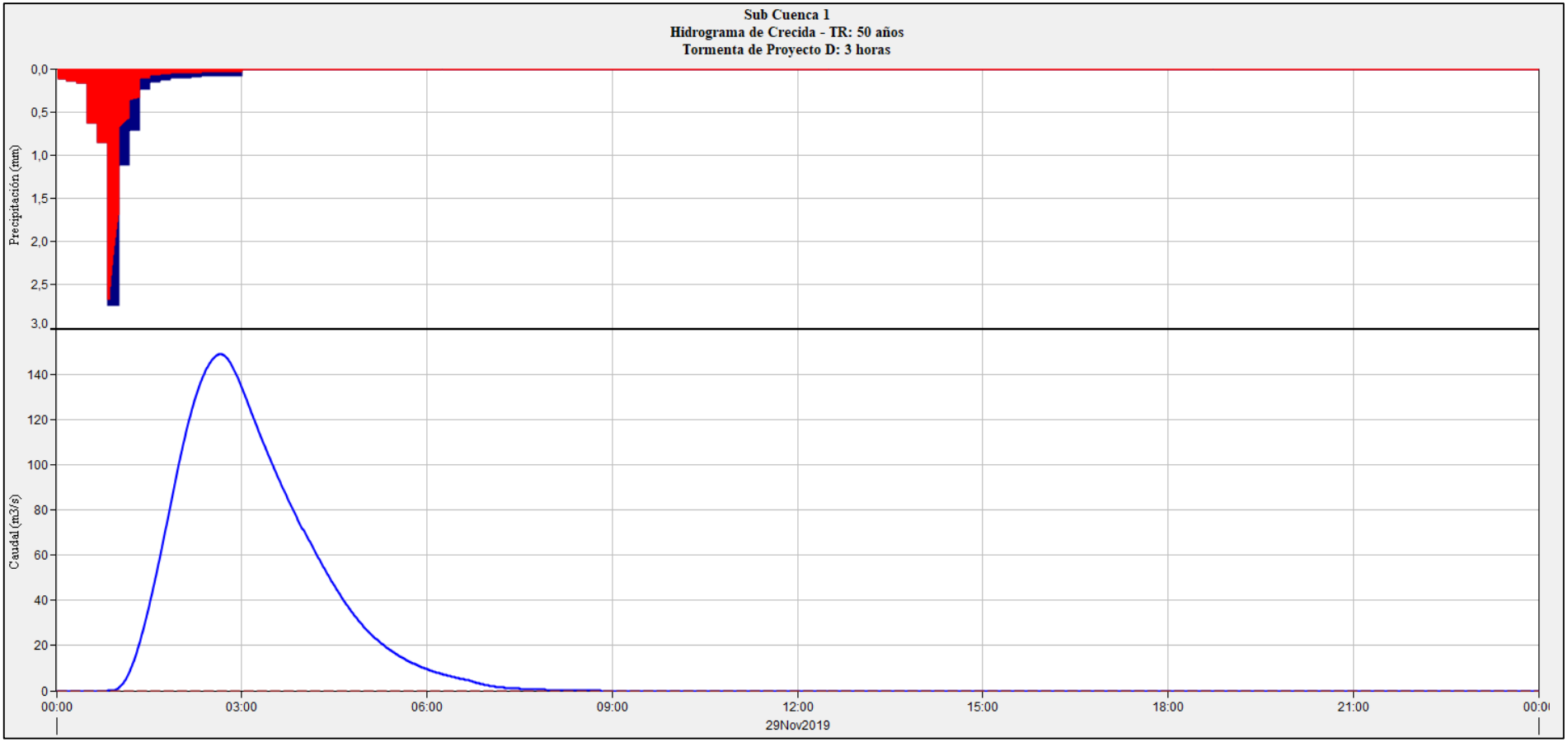

Figura 41: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 1, TR 50 años, Tormenta de Proyecto D: 3 horas.*

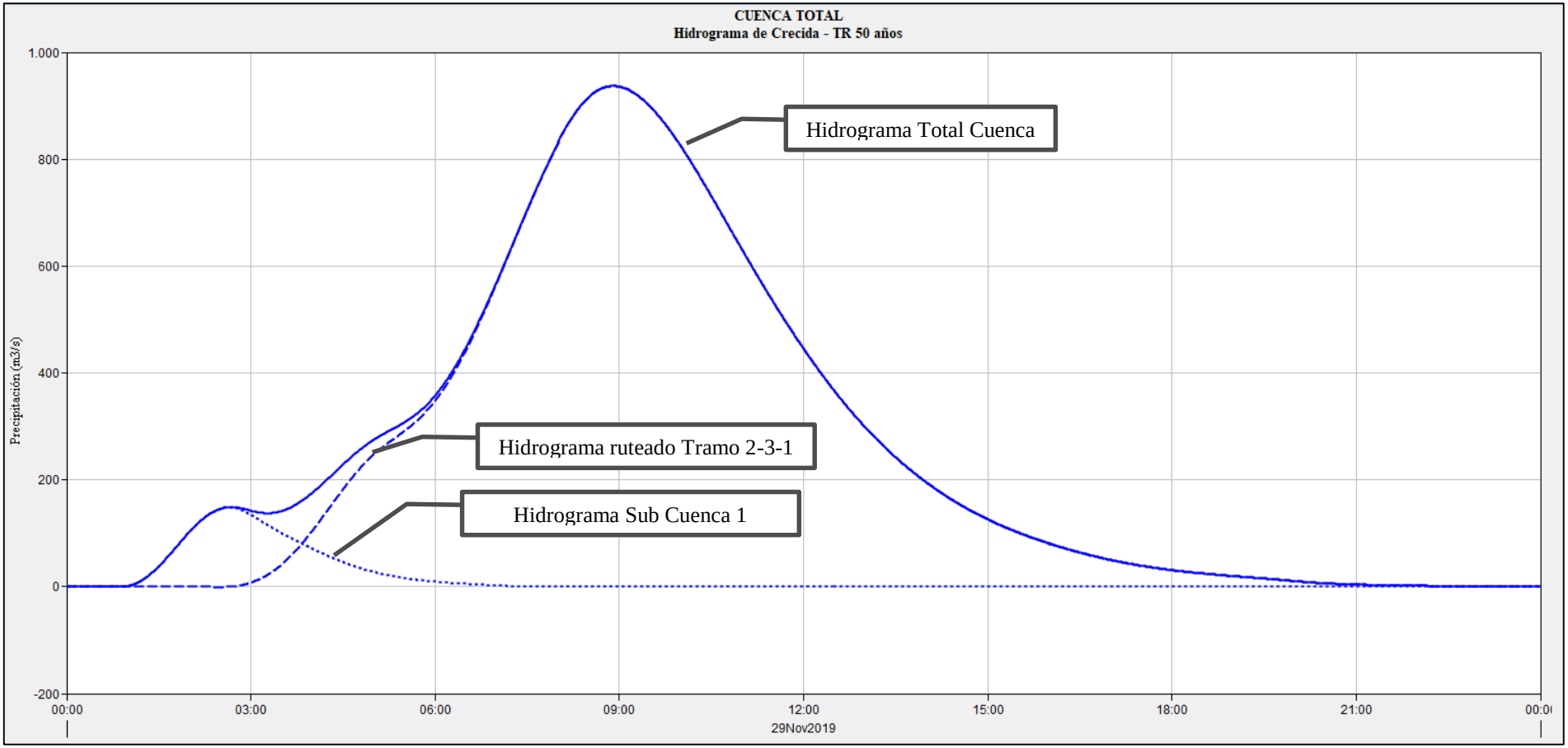

Figura 42: *Hidrograma de Crecida, Cuenca Total – TR 50 años.*

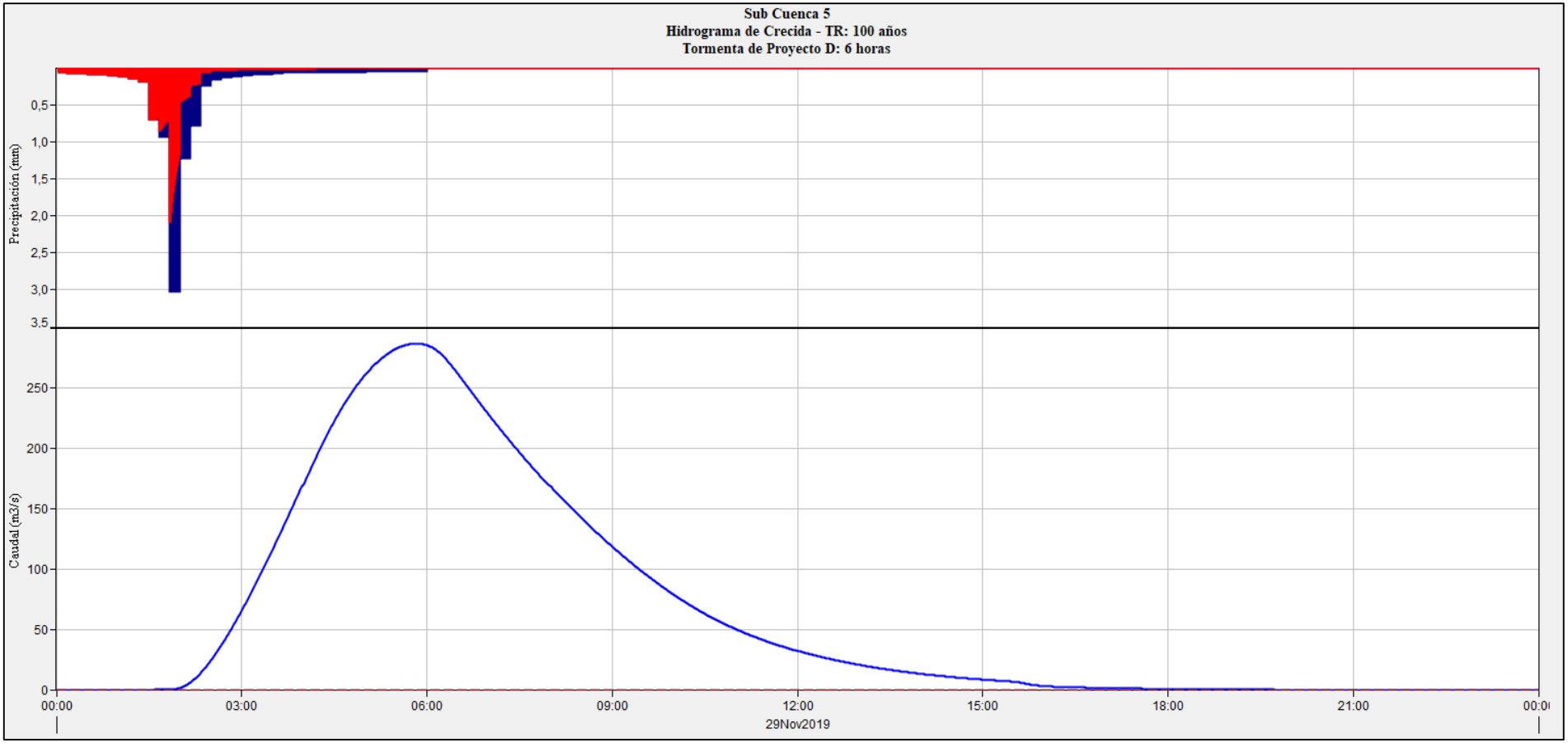

Figura 43: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 5, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas.*

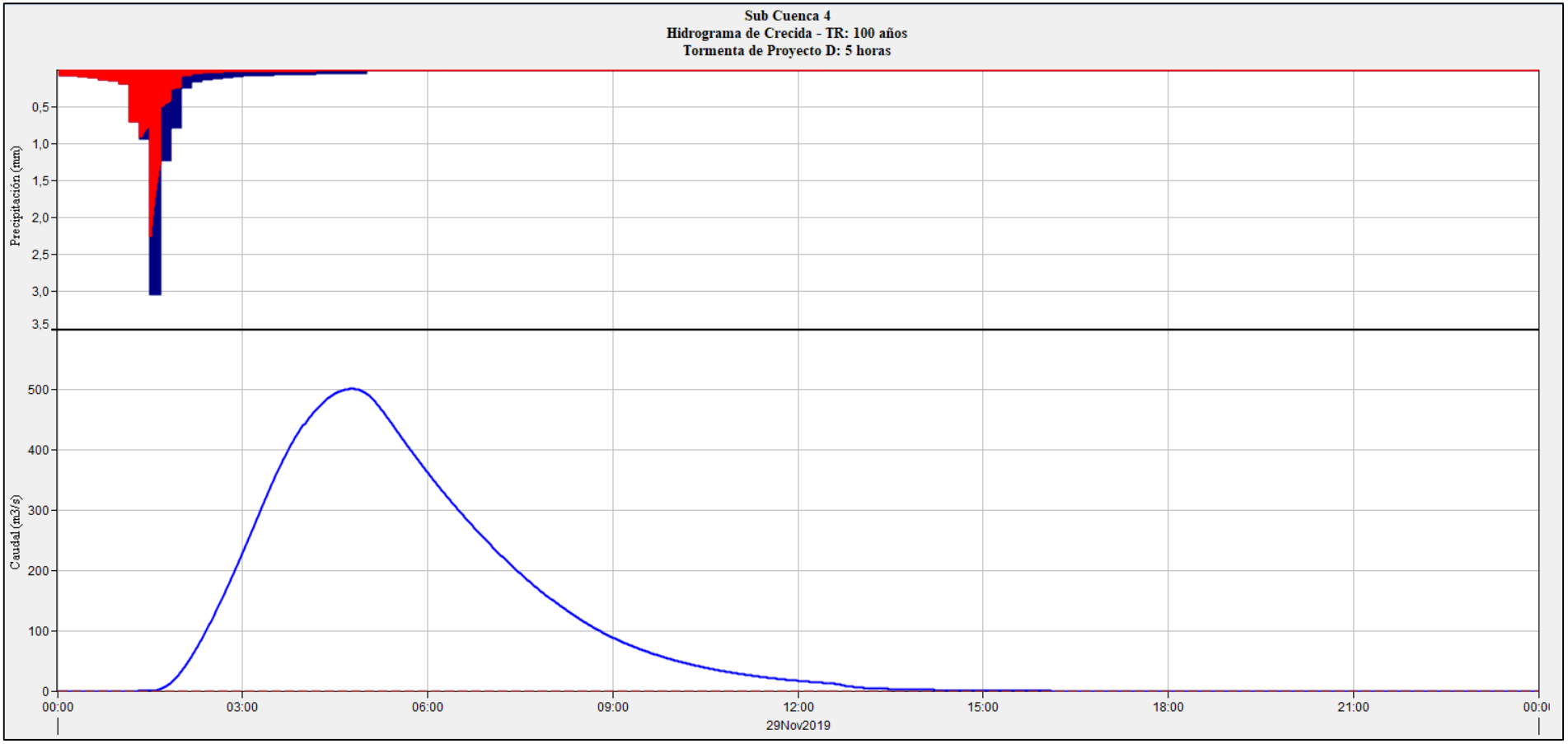

Figura 44: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 4, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 5 horas.*

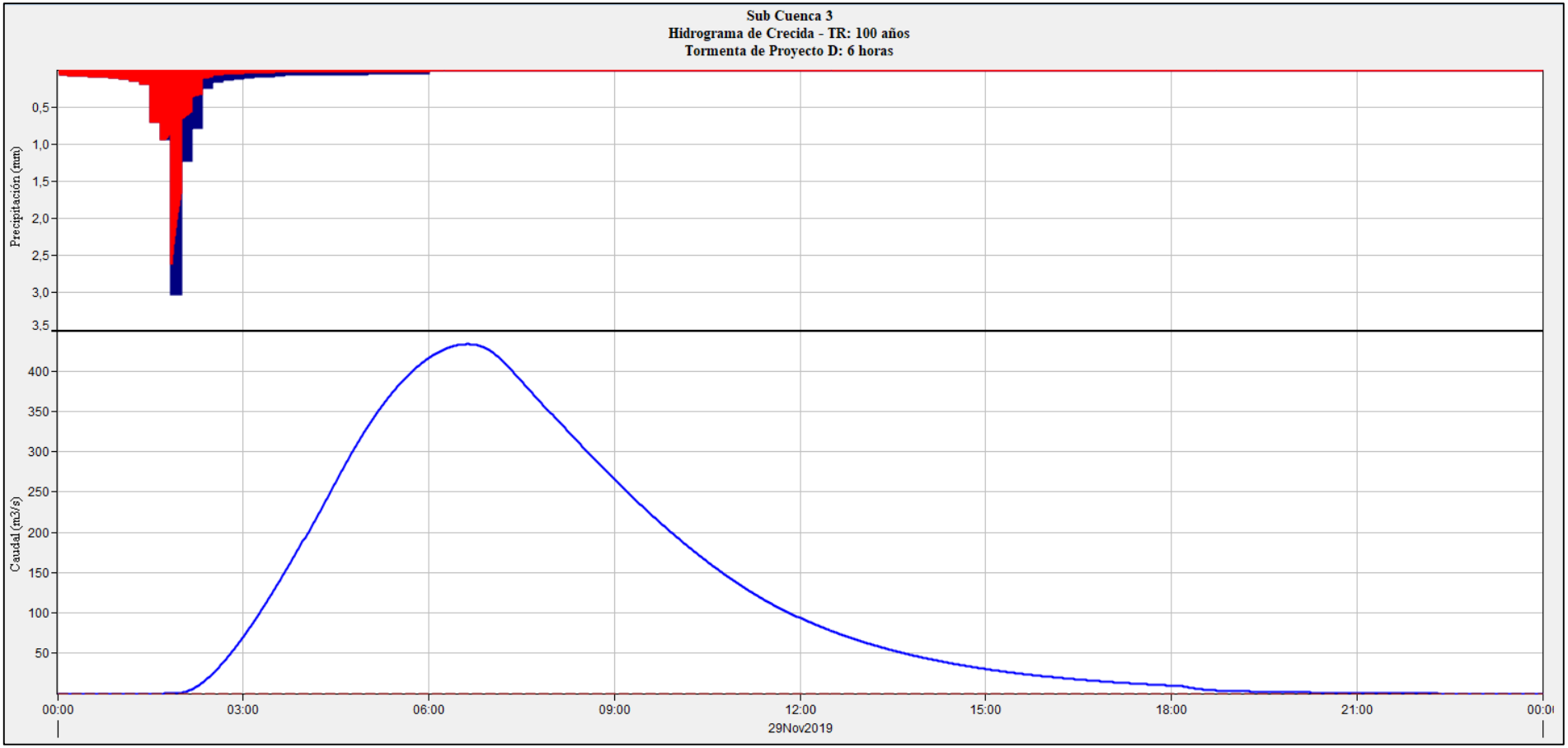

Figura 45: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 3, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 6 horas.*

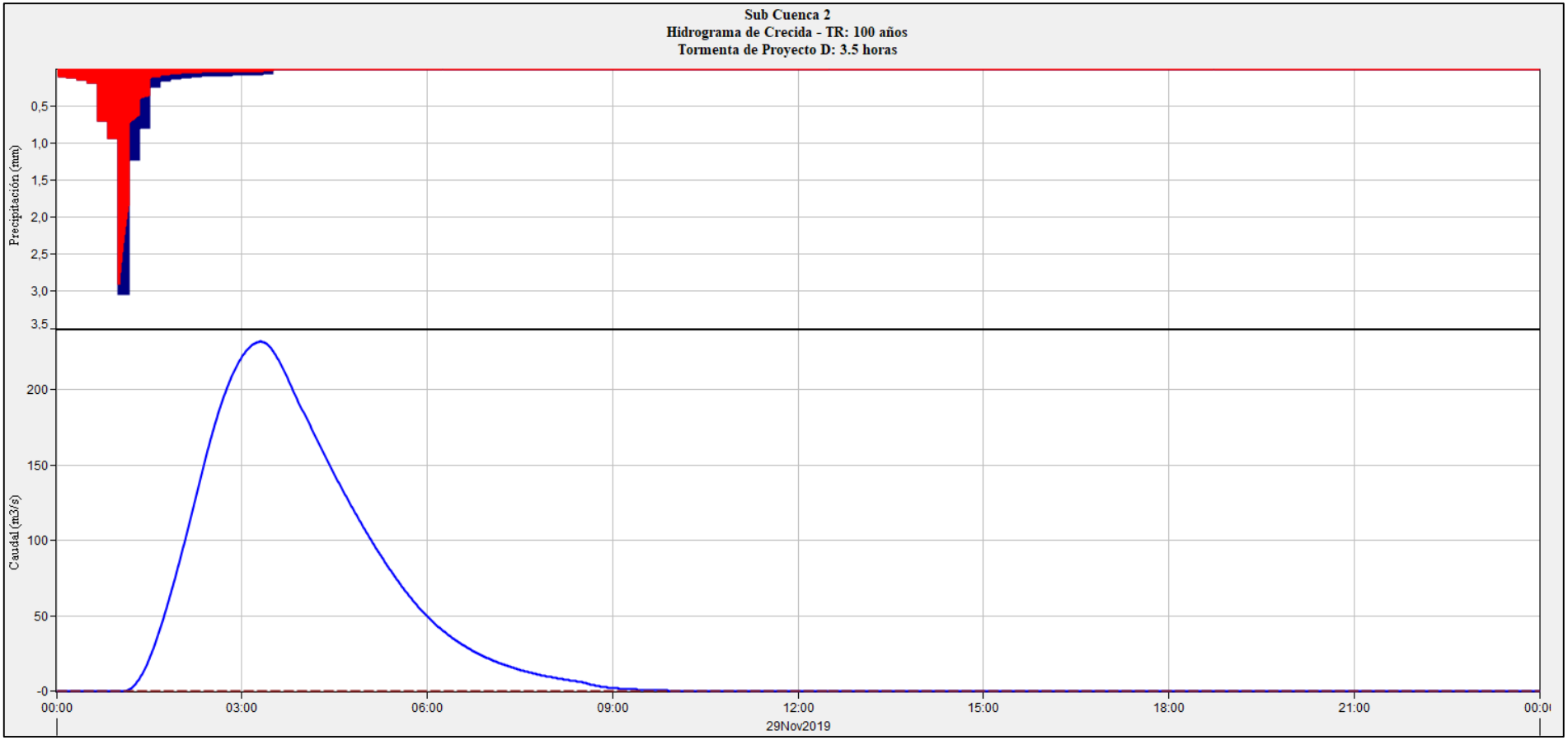

Figura 46: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 2, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 3,5 horas.*

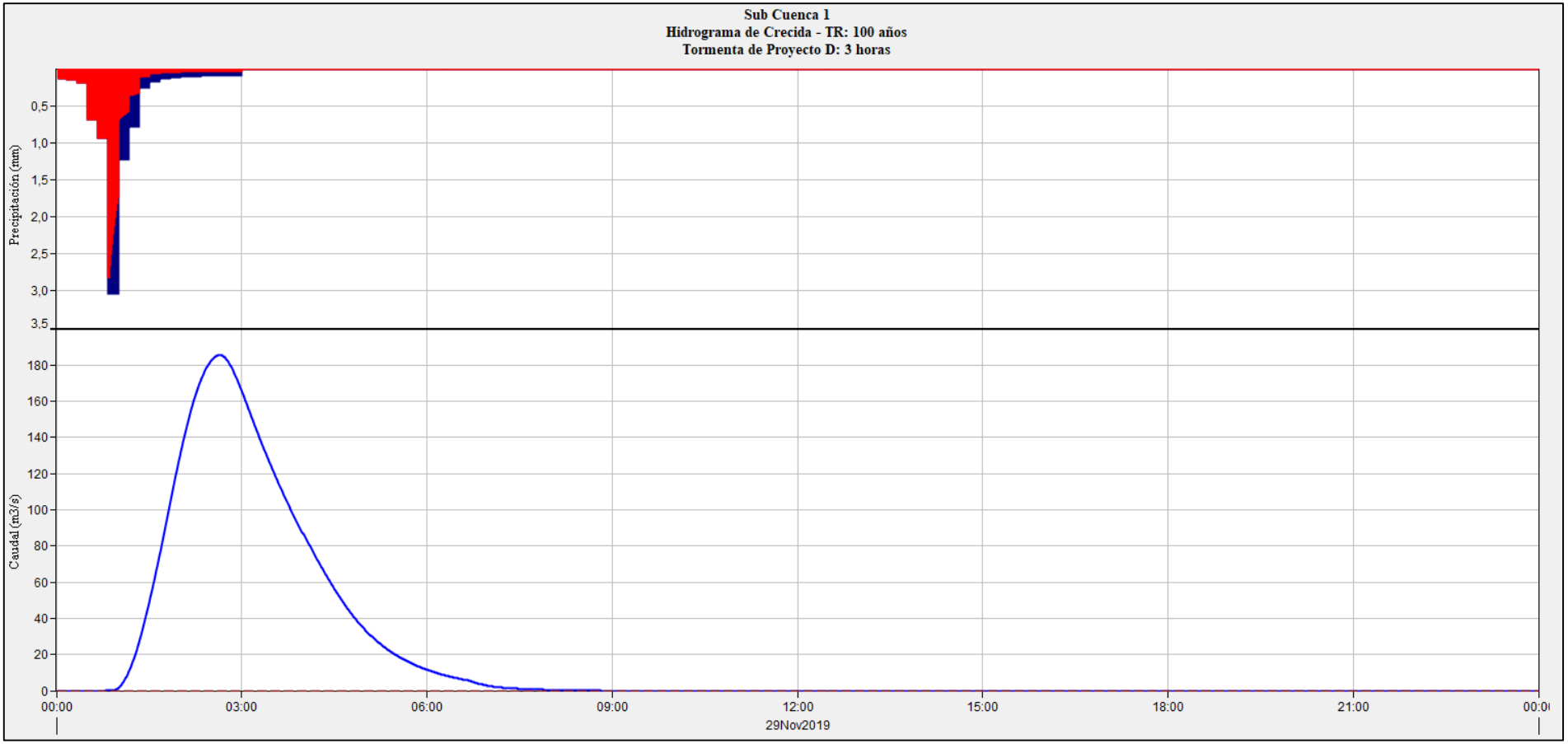

Figura 47: *Hidrograma de crecida Sub Cuenca 1, TR 100 años, Tormenta de Proyecto D: 3 horas.*

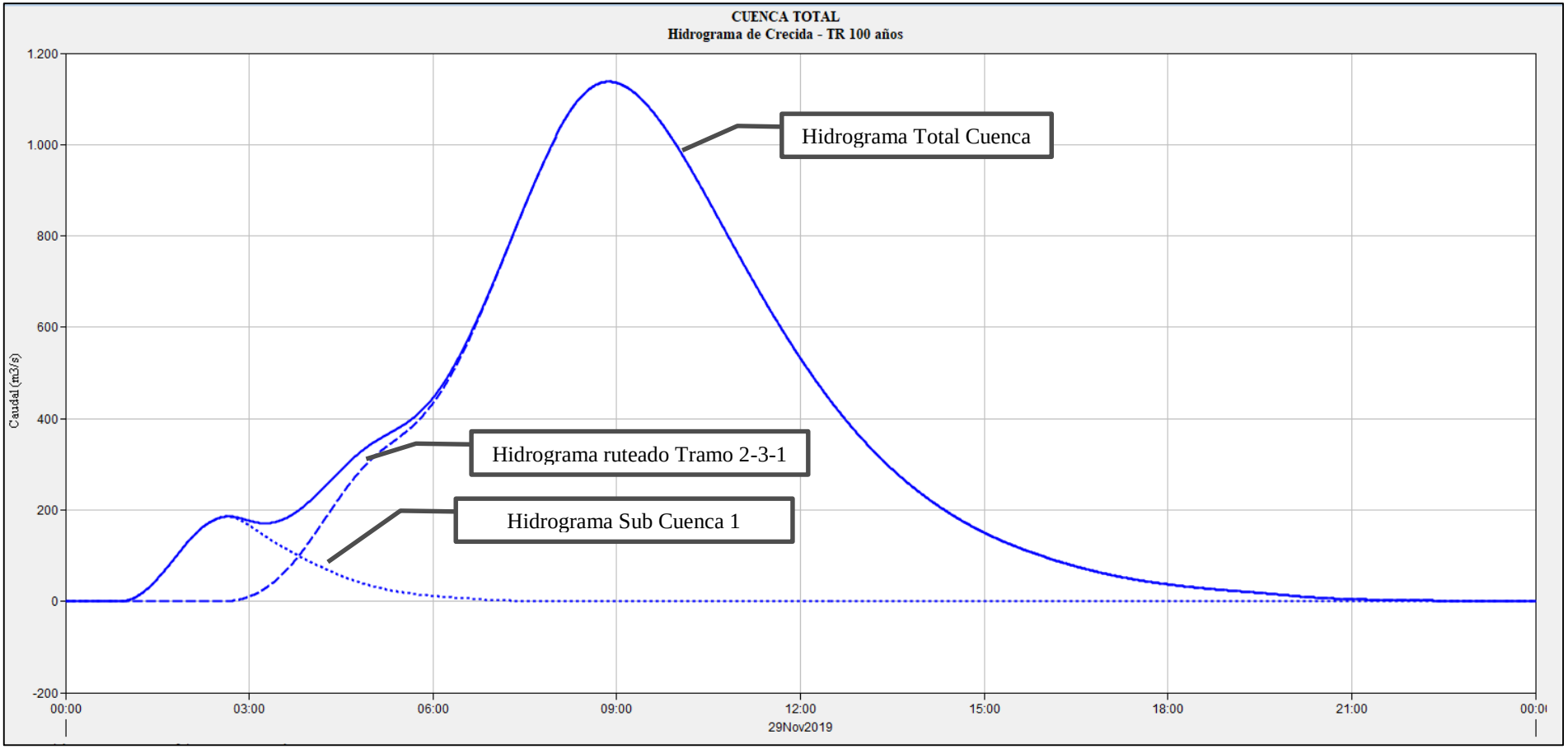

Figura 48: *Hidrograma de Crecida, Cuenca Total – TR 100 años.*

Cabe resaltar que los caudales obtenidos fueron modelados para simulaciones de eventos, para tormentas extraordinarias de 50 años y de 100 años con una duración máxima de las mismas de 6 horas. Si se contara con datos de los caudales horarios observados y además se tuviera registros de una tormenta similar a las que se realizaron las simulaciones en la estación Painemilla, se podría haber realizado una calibración del modelo (comparación con caudales reales) y poder verificar que tan cercanos a valores reales son los resultados obtenidos.

Por lo cual se adoptaron los caudales obtenidos de la modelación hidrológica realizada a partir de la simulación de evento para generar la modelación hidráulica con el software HEC-RAS.

5 MODELACION HIDRAULICA HEC-RAS

HEC-RAS (USACE, 2016) es un software de uso libre, que ha desarrollado herramientas para el análisis de flujo en diferentes condiciones. La versión 5.0, la cual se utilizó en el presente trabajo, permite la modelización en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes.

El modelo desarrollado está basado en visualizar el comportamiento del Arroyo Picún Leufú en la zona de estudio para los caudales obtenidos en la sección 4 para las tormentas analizadas. La simulación requiere de un Modelo de Elevación Digital (DEM) con un tamaño de píxel pequeño, lo que permite aumentar la precisión de la generación de secciones transversales en el arroyo.

En este trabajo se evaluó mediante un modelo desarrollado con el software HEC-RAS el comportamiento bidimensional (2D) del flujo en el arroyo de estudio. Para la simulación se requiere una geometría base con valores de elevación topográfica de alta precisión, los cuales se obtuvieron mediante un DEM que proporciono la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Provincia. El mismo fue generado mediante un vuelo de dron el día 14 de agosto del 2019 y tiene una precisión de 0.1 metro de píxel. Además, se dispone de un Ortomosaico obtenido en el mismo vuelo con la misma resolución (***Figura 49***) en el cual se puede visualizar la zona de estudio.

La simulación permitirá obtener la representación gráfica del flujo y su llanura de inundación, la velocidad del flujo, la profundidad en cualquier punto del cauce, etc.

Figura 49: *Ortomosaico obtenido a partir de modelo de dron.*

En la

Figura 50 se observa el mapa de altitudes generado mediante el MDT con vuelo de dron.

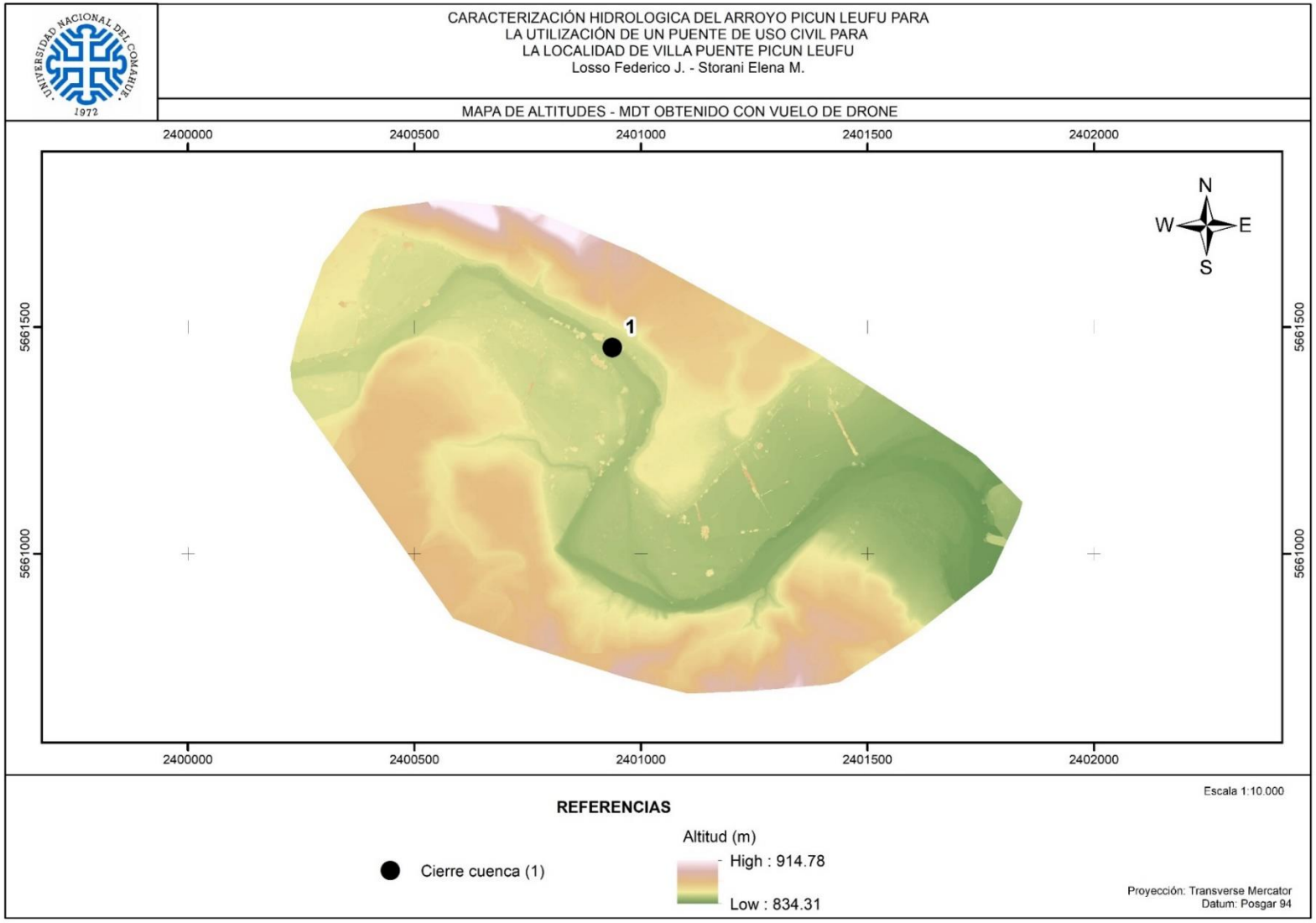

***Figura 50**: Mapa de altitudes – MDT obtenido con vuelo de dron.*

5.1 Metodología de modelación en HEC-RAS

Para el desarrollo del modelo se utiliza la interfaz RAS Mapper, la cual es una herramienta de HEC-RAS 5.0 que suministra la demostración de los resultados de la modelación hidráulica, representando principalmente la llanura de inundación que ocasionaría el desborde del arroyo. En esta herramienta interactúan tres componentes:

- Los elementos geométricos usados en la modelación hidráulica.
- El modelo digital del terreno
- La representación gráfica del agua a través del cauce y su llanura de inundación, las cuales pueden representarse como profundidad, velocidad o cota.

En la ***Figura 51***, se observa el Modelo Digital de Elevación en entorno HEC-RAS del área de estudio. El DEM fue convertido en formato GeoTIFF, esto le permitió un menor espacio de almacenamiento y mayor rapidez en la velocidad de cómputo al momento de generar los mapas de inundación. El DEM tenía un sistema de referencia espacial asociado, el cual se cargó junto con la generación del mismo en el entorno de RAS Mapper.

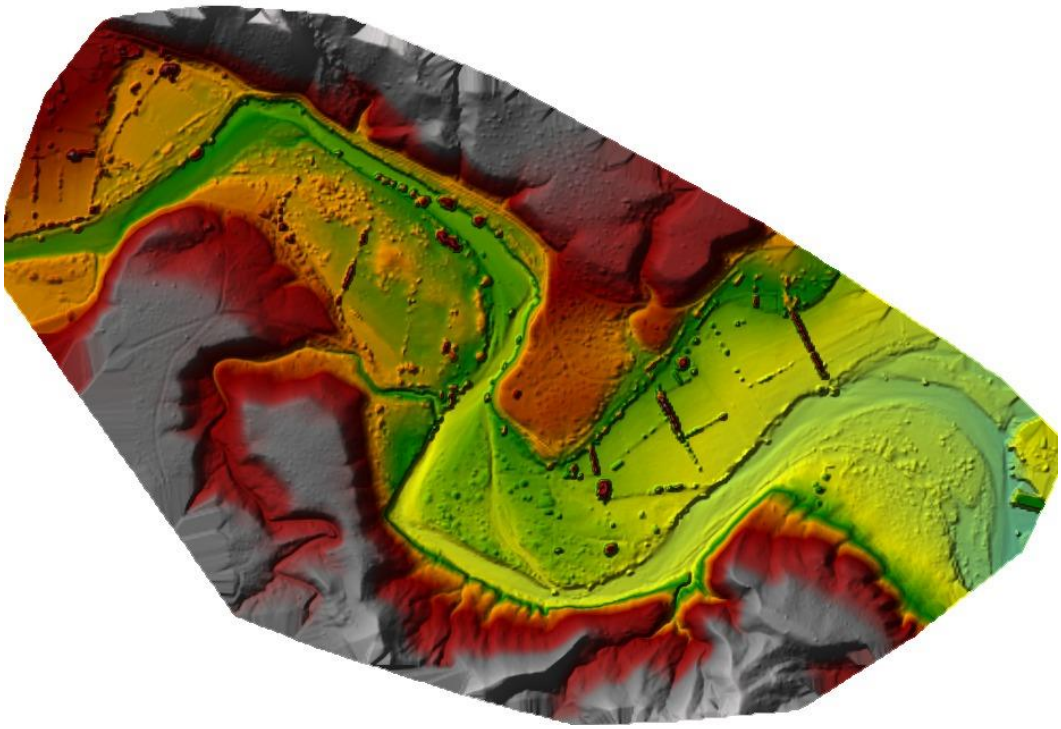

Figura 51: *Modelo Digital en entorno HEC-RAS.*

El modelo digital utilizado fue proporcionado por la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Neuquén. El mismo fue realizado mediante un vuelo de dron el día 14 de agosto del año 2019. Se ejecutó a este el procesamiento necesario para poder trabajarlo en RAS Mapper. Se puede visualizar que en dicho modelo no se hizo la extracción de obstáculos como son árboles o arbustos. De esta manera el programa los podría interpretar como montículos de tierra.

Para la modelación bidimensional en HEC-RAS se procedió de la siguiente manera:

1. Generación de la geometría 2D: El esquema numérico empleado en HEC-RAS 2D, permite generar una geometría de mallas cuyos lados varían de 3 hasta 8 lados por malla. La creación de la malla se realiza desde la herramienta *Geometric Data.* El proceso consiste en dibujar un polígono que encierre el área a analizar e indicar el tamaño de malla que se empleara en la modelación. La calidad y la precisión del resultado depende de este mallado, además de la cantidad de celdas que se hayan empleado para su generación.

Dentro de *Geometric Data* se identifica la herramienta 2*D Flow Area Geometry* con la cual se delimita el área 2D. Luego de trazado el polígono se le realizo la configuración de algunas tolerancias para la generación de la malla 2D. Se adoptó 0.03 como el valor de Manning y se especificó un tamaño de celdas de 5 x 5 metros (***Figura 53)*** para la cual se obtienen las siguientes características de mallado (***Figura 52***):

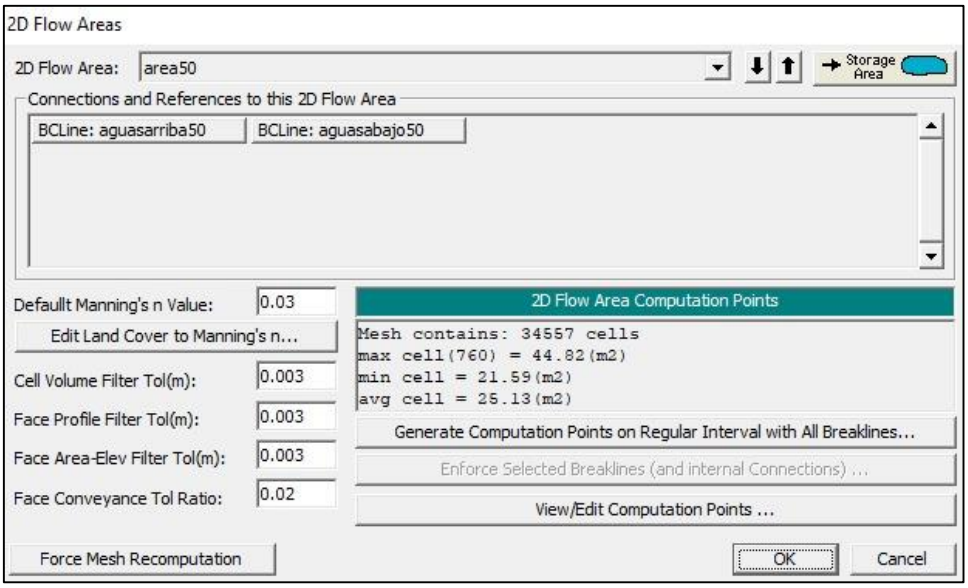

Figura 52: *Características del mallado.*

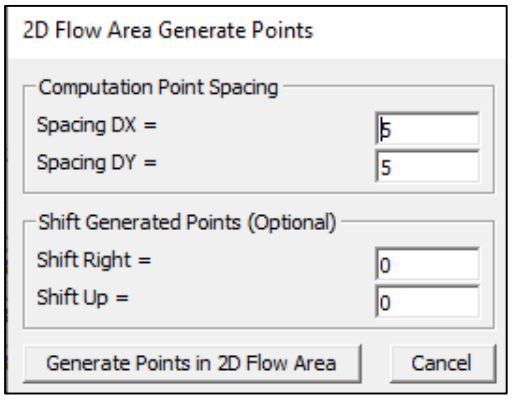

Figura 53: *Determinación de tamaño de celdas*

Cuando se presiona el botón "*Generate Computation Points on Regular Interval with all Breaklines…"* se abre la ventana que se muestra en la ***Figura 53*** donde se definió el espacio entre los centros de celdas computacionales de la cuadricula, como se detalló anteriormente se adoptó Dx=5m y Dy=5m. Luego se obtuvo una malla computacional que tiene cuadrículas de 5x5 en todas partes, excepto alrededor de las líneas de ruptura y el límite exterior. Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes parámetros que caracterizan la malla (***Tabla 19***):

Cantidad de celdas (unidad)	34.557
Sección máxima de celda (m^2)	44,82
Sección mínima de celda (m^2)	21,59
Sección promedio de celda (m^2)	25,13

Tabla 19: *Resultados de mallado para el tamaño de celda determinado*

Una vez realizado el proceso e mallado 2D, el paso siguiente consistió en indicarle al software las condiciones de contorno y su ubicación. Estas se colocan con el empleo de la herramienta *Boundary Conditions*. Con la opción *Edit Boundary Conditions* se designó a la condición de contorno "aguasarriba50" a la condición aguas arriba y "aguasabajo50" a la otra condición, esto se visualiza en la ***Figura 54***.

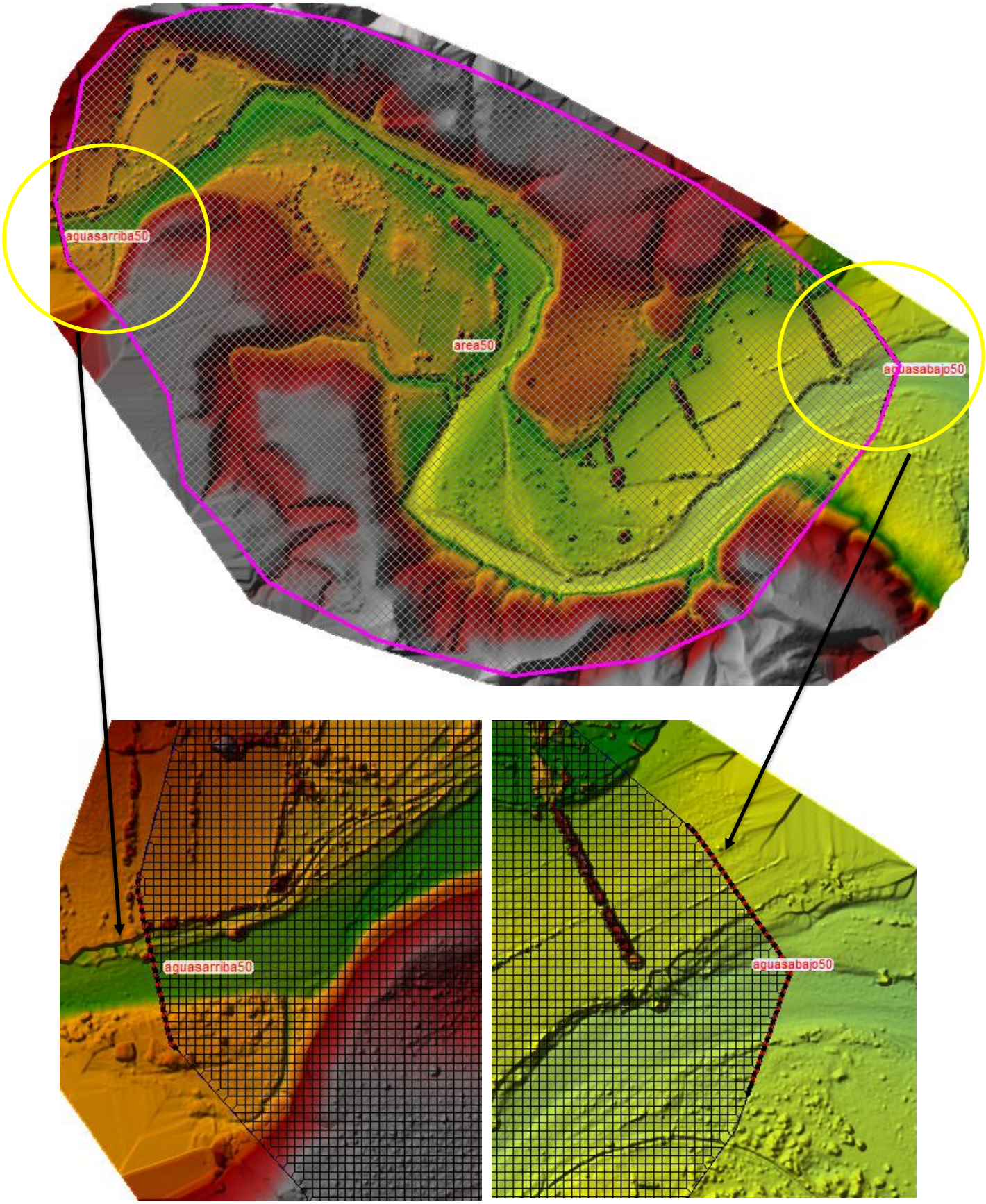

Figura 54: *Geometría del mallado y condiciones de contorno*

2. Determinación de datos para la modelación en condición de flujo no permanente.

El programa permite visualizar la evolución temporal del flujo, y así apreciar la rapidez con la que el flujo se estabiliza y como varia la superficie del agua.

Las condiciones de contorno empleadas por el modelo 2D son 4: *Flow Hydrograph*, *Stage Hydrograph*, *Normal Depth* y *Rating Curve*; las dos primeras se emplean para ingresar flujo al área 2D, y las dos últimas permiten que el flujo abandone dicha área.

El hidrograma de flujo (*Flow Hydrograph*) se usa generalmente para modelar el flujo en un área de flujo 2D. Los datos requeridos para este tipo de condición de límite son:

- Hidrograma de flujo (Caudal-tiempo)
- Pendiente de energía (para calcular se utiliza la profundidad normal)

La pendiente de energía se usa para calcular la profundidad normal a partir del caudal dado y los datos de la sección transversal (datos de terreno subyacentes) a lo largo de la línea de condición de borde para el tiempo de análisis. La distribución de flujo en la sección transversal se calcula (en función de la profundidad normal de la superficie del agua y el transporte en la sección transversal) y se utiliza para distribuir adecuadamente el flujo a las celdas a lo largo de la línea de condición de contorno que están mojadas. En cualquier momento de tiempo analizado, solo una parte de la línea de condición de borde puede estar mojada, por lo tanto, solo las celdas en las que la elevación de la superficie del agua es más alta que el terreno de su límite exterior recibirá agua. Sin embargo, si la superficie de agua de profundidad normal calculada es más alta que todos los datos de elevación de la cara límite a lo largo de la línea de condición de borde, entonces todas las celdas recibirán agua según una ponderación aproximada de transporte.

Para asignar las condiciones de borde se utilizó la herramienta de edición *Unsteady Flow Data*. En la condición de aguas arriba se introducen el hidrograma obtenido en la modelación con HEC-HMS, para la tormenta de diseño para TR 50 años y TR 100 años (***Figuras 55 y 56***). Como condición de borde aguas abajo, se adoptó una pendiente de energía similar a la pendiente del terreno, de 0.02.

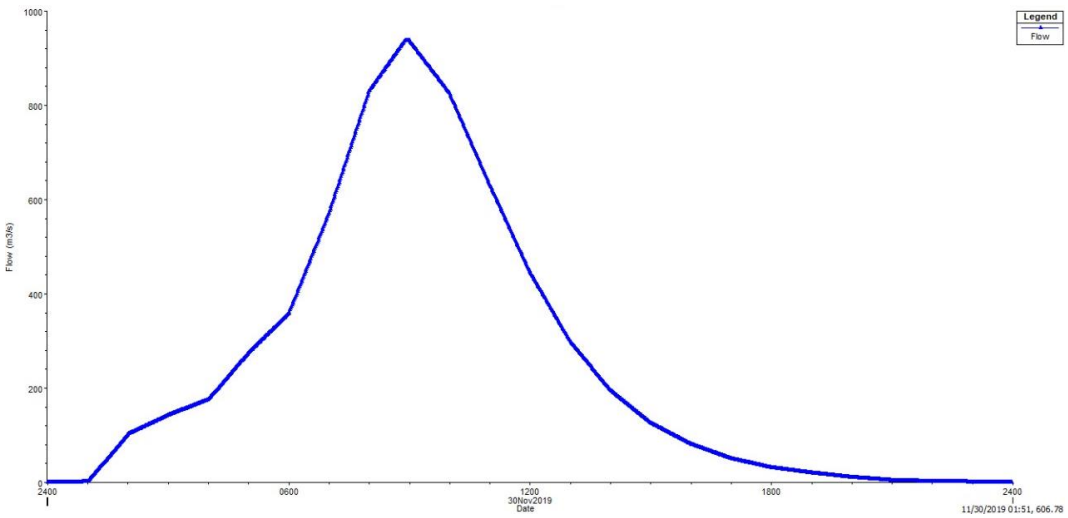

Figura 55**:** *Hidrograma TR 50 años HEC-RAS.*

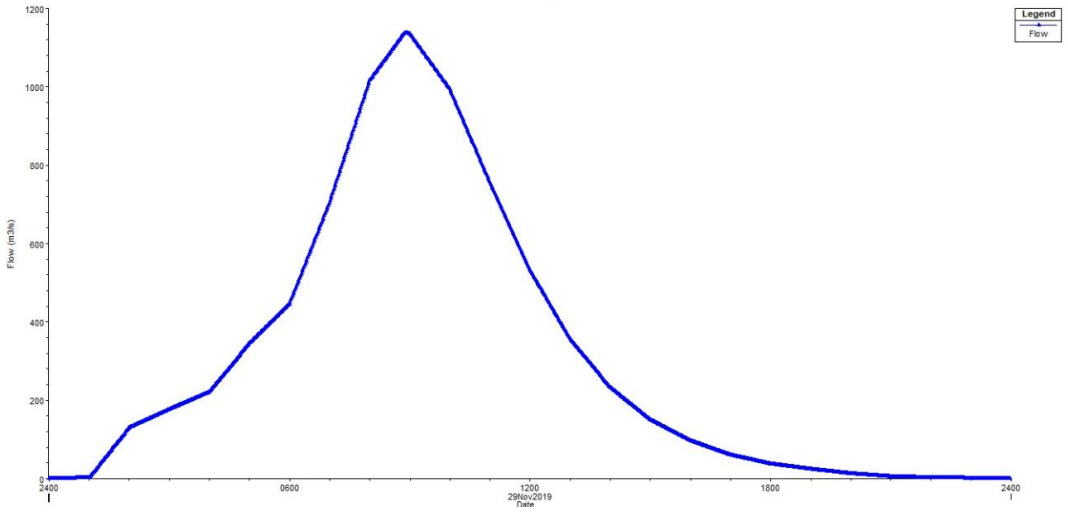

Figura 56**:** *Hidrograma TR 100 años HEC-RAS.*

3. Ejecución del modelo 2D.

La ejecución del modelo 2D requiere establecer tolerancias de cálculo. El tamaño de la malla es un parámetro fundamental de configuración, realizado en el paso anterior, y otro es el paso del tiempo de cómputo.

El tamaño de malla (Δx) permite que el modelo se adecue apropiadamente al terreno y de esa forma incluir las obstrucciones presentes.

El paso del tiempo de cómputo (Δt), remarcado en un recuadro rojo en la ***Figura 57*** *("Computation Interval")*, relaciona el número de Courant, que se obtiene de la relación entre espacio, velocidad y tiempo, dicha relación debe ser menor o igual a la unidad.

La relación que existe entre (Δx) y (Δt), obliga a que el intervalo de tiempo sea tal que funcione adecuadamente con la malla elaborada. Por lo cual se realizaron varias modelaciones hasta encontrar aquella que resulten resultados coherentes, siendo Δt=30 segundos, el cual permitió reducir el tiempo de cálculo.

Con la herramienta *UnSteady Flow Analisis* se asignó los parámetros de análisis, entre ellos la geometría donde se realizará el cálculo (1), los datos de flujo no permanente cargados anteriormente (2). Luego, definen los intervalos de simulación, adoptando un tiempo de análisis de 24 horas, con el fin contemplar los datos del hidrograma completo obtenido en el mismo periodo de análisis. Por último, en las "Computation Settings" se configuran los tiempos de iteración sobre los cuales se correrá la modelación. Se adoptaron un tiempo de cálculo de 30 segundos y 10 minutos de salida para obtener una buena precisión numérica y reducir al mínimo el tiempo de cálculo.

La opción *Floodplain Mapping* (recuadro punteado rojo) se debe tildar ya que cuyo propósito es automatizar el proceso de cálculo de un mapa de inundación y permitir usarlos en otras aplicaciones. A continuación, se muestra una imagen de la ventana de análisis para definir el procesamiento en flujo en condiciones no permanentes (***Figura 57***).

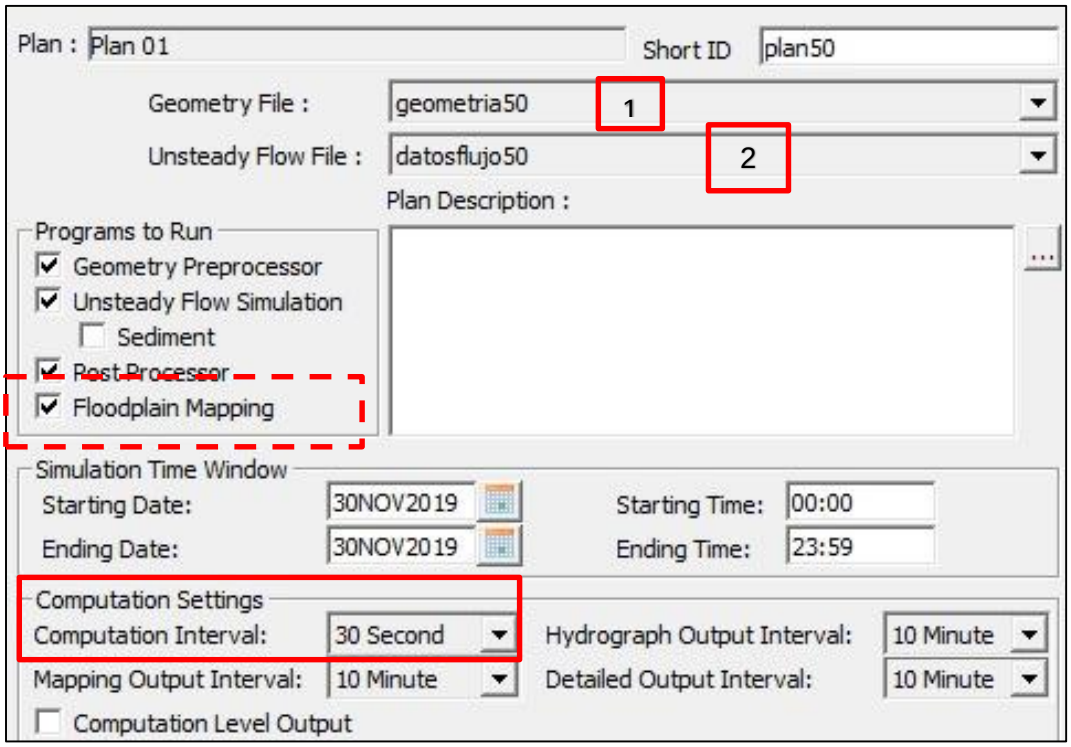

Figura 57*: *Ventana de análisis de flujo en condición no permanente.

4. Visualizador de resultados: se obtuvieron los resultados de nivel de cota de elevación, profundidad y velocidad del agua en el cauce para el tiempo de análisis realizado. En las siguientes imágenes se expresan los resultados para el caudal pico, en las condiciones analizadas de TR 50 años y TR 100 años respectivamente.

En las ***Figuras 58 y 59***, se observan las crecidas máximas del cauce para un TR de 50 años, como avanza la llanura de inundación en ortomosaico y MDT respectivamente. Se demarco mediante una recta de color magenta la ubicación del puente propuesta por la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén (D.P.V.N.).

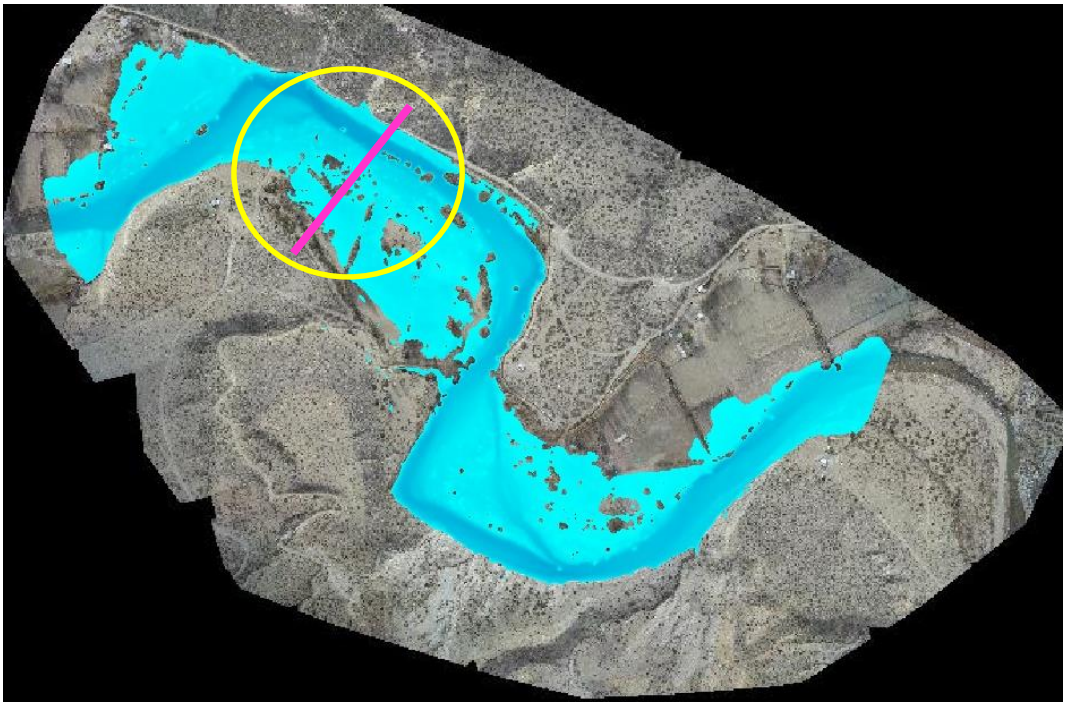

Figura 58**:** *Crecida máxima del cauce para TR 50 años en ortomosaico a las 8:50 del hidrograma de crecidas.*

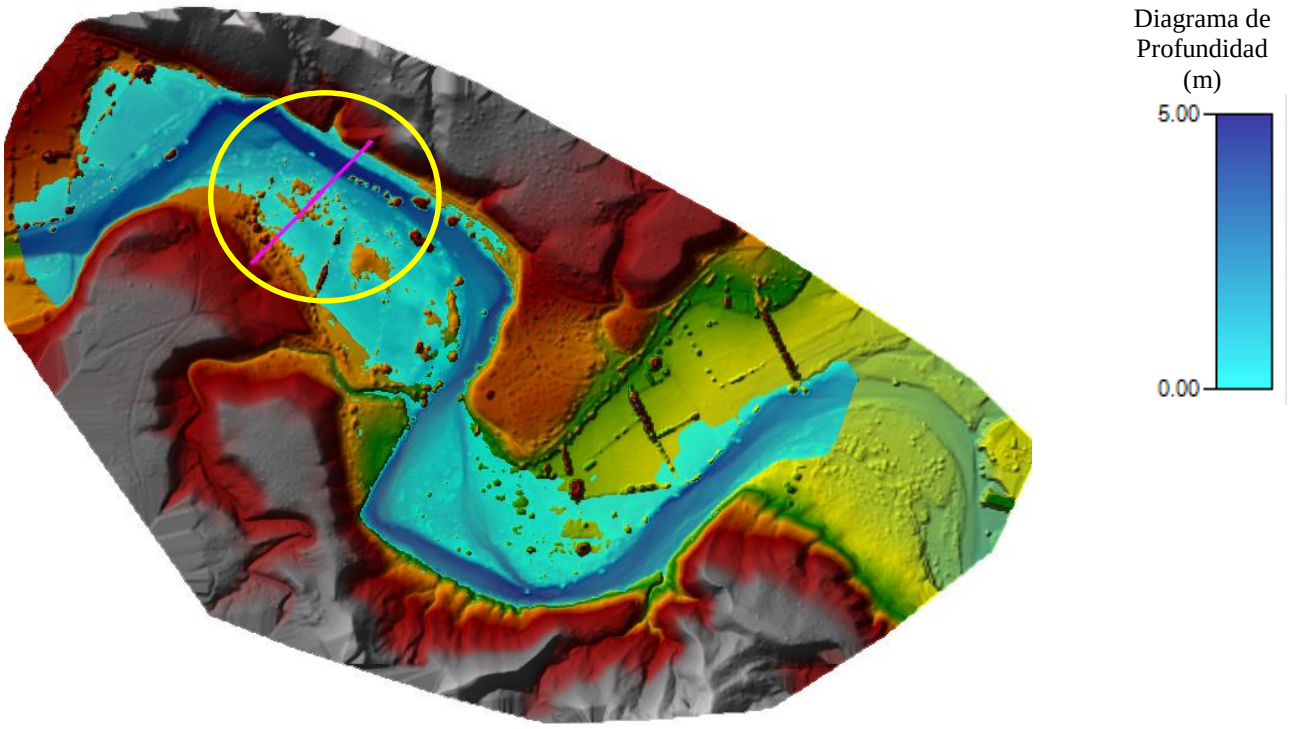

Figura 59**:** *Crecida máxima del cauce para TR 50 años en MDT a las 8:50 del hidrograma de crecidas.*

En la ***Figura 60*** se expresa el flujo de velocidades para la crecida máxima para la tormenta TR 50 años. Se aprecian mayores velocidades en las curvas y en las zonas en donde se encuentra el cauce principal, con velocidades medias máximas cercanas a los 5,5 m/seg en cercanías de la posible ubicación del puente.

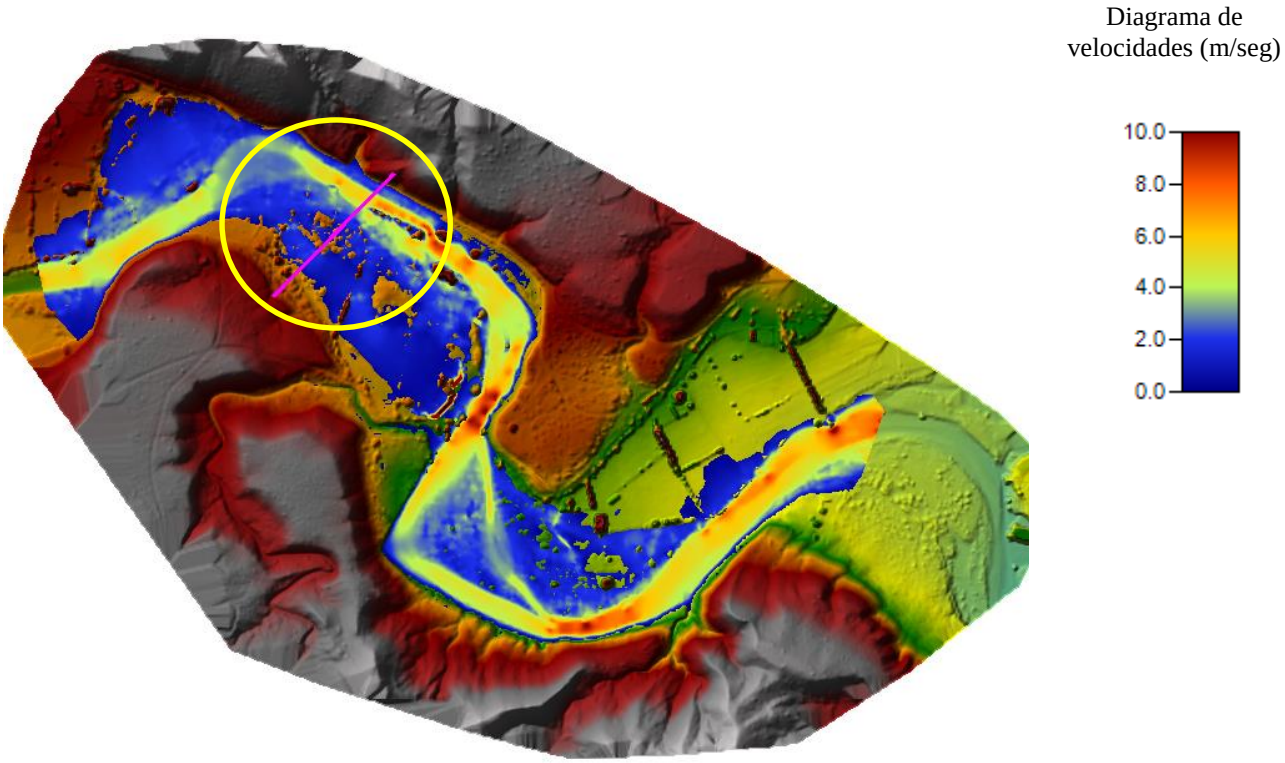

Figura 60**:** *Flujo de velocidades en cauce para TR 50 años a las 8:50 del hidrograma de crecidas.*

Periodo de retorno 100 años: En las ***Figuras 61 y 62***, se observan las crecidas máximas del cauce, en ortomosaico y MDT respectivamente, mientras que en la ***Figura 63*** se expresa el flujo de velocidades para la crecida máxima para la tormenta TR 100 años. Se aprecian mayores velocidades en las curvas y en las zonas en donde se encuentra el cauce principal, con velocidades medias máximas cercanas a los 5,94 m/seg en cercanías de la posible ubicación del puente.

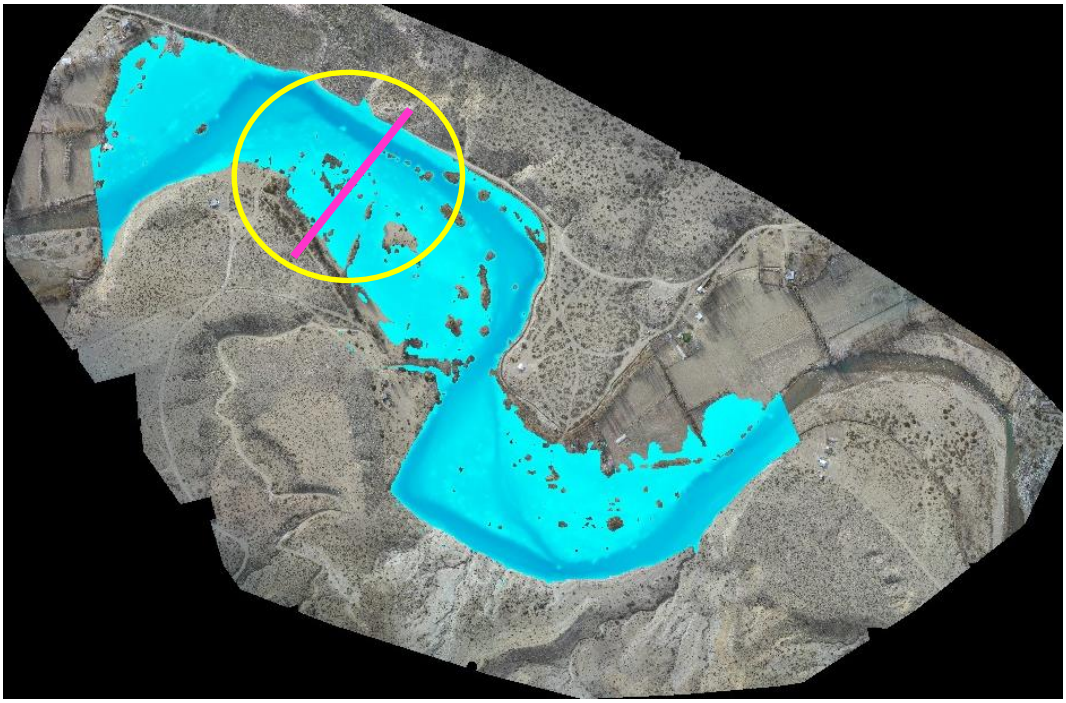

***Figura 61*:** *Crecida máxima del cauce para TR 100 años en ortomosaico.*

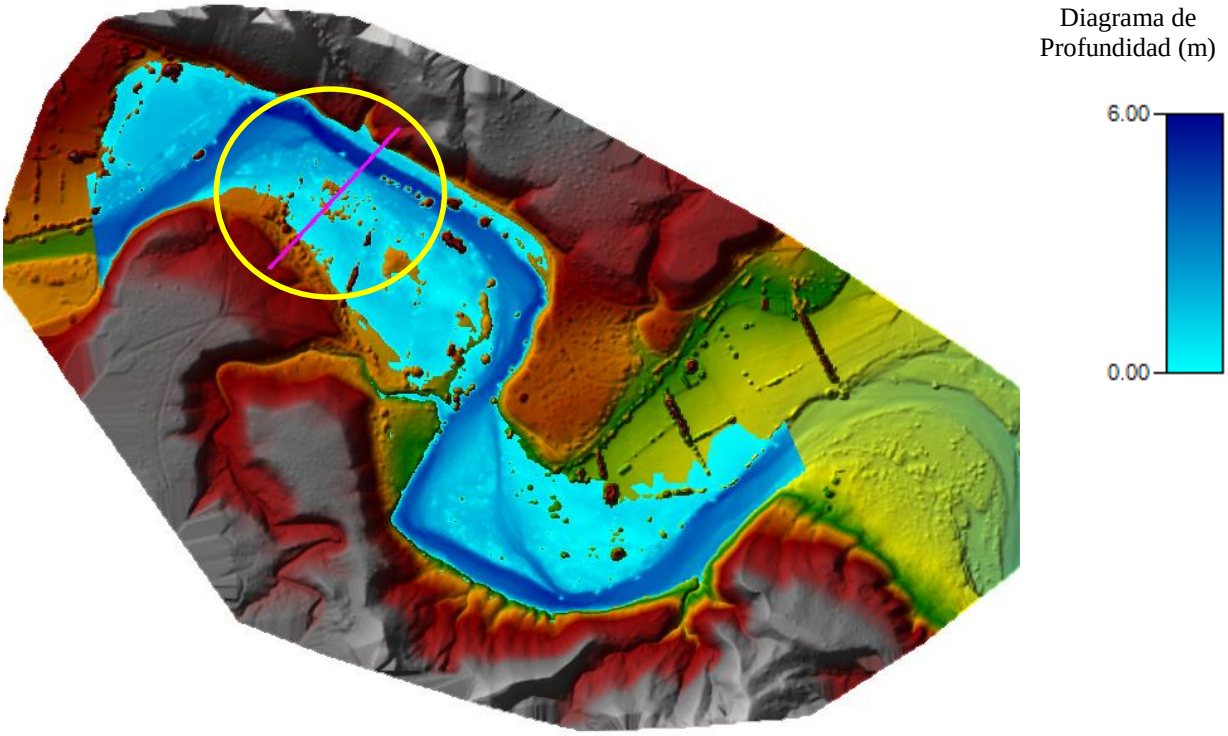

***Figura 62*:** *Crecida máxima del cauce para TR 100 años en MDT.*

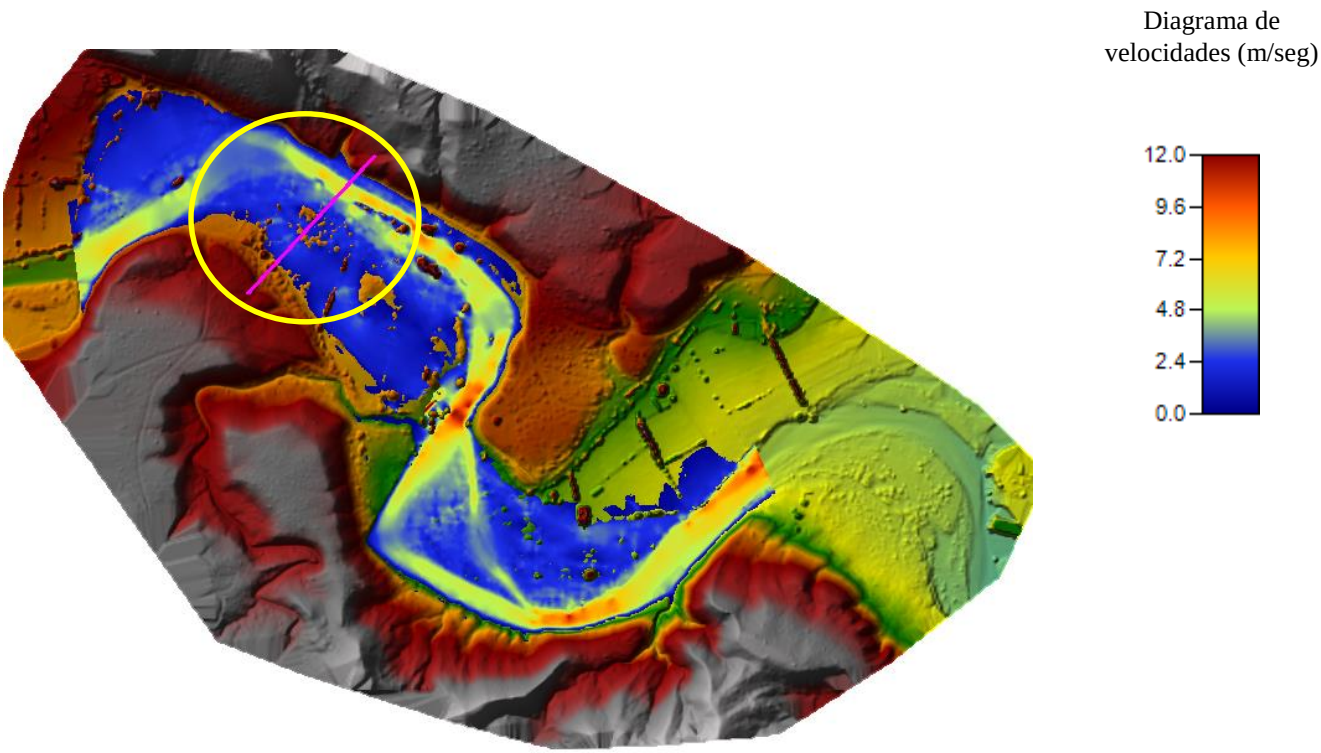

Figura 63**:** *Flujo de velocidades en cauce para TR 100 años.*

Se puede observar que el modelo digital de terreno disponible, no fue procesado de manera de extraer los obstáculos como son los árboles o arbustos. Por consiguiente, el programa, al realizar el mallado, considera a estos obstáculos como elevaciones de tierra o montículos de suelo, lo que, a los efectos del cálculo, determinan un estrechamiento de la sección del cauce y generan velocidades que podrían ser distintas a las reales.

Sin embargo, analizando las representaciones obtenidas se puede observar que debido a la presencia de la superficie libre y la fricción a lo largo de las fondo del cauce, la distribución de las velocidades en el mismo no es uniforme (***Figura 60*** y ***Figura 63***).

La distribución de velocidad en una sección depende de su geometría. La velocidad máxima medida normalmente ocurre debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. La configuración general para la distribución de velocidades de una sección irregular se muestra en ***Figura 64:***

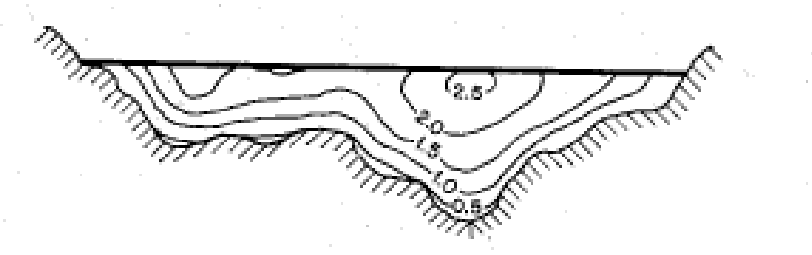

Figura 64: *Curvas típicas de igual velocidad en un canal natural irregular (Hidráulica de los canales abiertos. Ven Te Chow)*

Para las simulaciones, tanto de TR50 años como de TR 100 años se puede observar que las velocidades obtenidas varían de 0,00 hasta 10,00 m/s en TR 50 años y hasta 12,00 m/s en TR 100 años. Los sectores que experimentan mayores valores de velocidades, para ambas recurrencias, es donde se angosta el cauce y no se observa grandes llanuras de inundación. La presencia de curvas aumenta significativamente las velocidades en el lado convexo debido a la acción centrifuga del flujo resultando estos sectores que requieren mayor análisis a la hora de realizar obras.

La velocidad del caudal influye fuertemente en la erosión hídrica. Se sabe que la velocidad mínima para desprender y transportar una partícula de suelo está en función del diámetro de esta. Sin embargo, una vez que la partícula se desprendió requiere menos energía para ponerse en movimiento. Dado que se observan elevados valores de velocidad, se producirá erosión y transporte de sedimentos, esto debería analizarse con mayor detalle en un estudio que cuente con un análisis de granulometría. Este resultado es de gran importancia a la hora de elegir un tipo de puente, pasarela o cualquier infraestructura vial ya que la posible socavación va a condicionar el proyecto.

Se puede concluir que el esquema de velocidades obtenido podría proporcionar una idea de cómo sería el espectro de velocidades proporcionando mayor información sobre la planicie de inundación, pero debería recurrirse a una mejora del modelo para poder obtener mayores certezas sobre el comportamiento. Además, se debería realizar una modelación con el proyecto del puente, ya que las velocidades van a sufrir cambios en presencia de este.

6 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la modelación se presentan en la ***Tabla 20***.

	TR 50 años	TR 100 años
Caudal pico (m^3/s)	937,00	1160,00
Volumen (1000 m^3)	22013,00	26775,80
Resultados en progresiva de ubicación del puente propuesto por D.P.V.N.		
Velocidad máxima (m/seg)	5,50	6,00
Cota máxima (m.s.n.m.)	851,60	851,90
Profundidad máxima (m)	4,90	5,40

Tabla 20*: Resultados de modelación*

Se realizaron los estudios hidráulicos e hídricos pertinentes con una tormenta de diseño para un Tiempo de Recurrencia igual a 100 años (tiempo propuesto para el cálculo de puentes). Así mismo, se realizaron los cálculos para un Tiempo de Recurrencia de 50 años, para obras alternativas de menor jerarquía, como por ejemplo alcantarillas, pasarelas peatonales o distintas obras complementarias que requiera la población.

En la ***Figura 65*** se observa el camino rural, que brinda acceso a los pobladores comunicándolos con la Ruta Nacional N° 40. Se aprecia que dicho camino, en la zona de propuesta de ubicación del puente, se encuentra muy próxima al cauce principal del arroyo, y por momentos, prácticamente sirve como límite de talud del mismo.

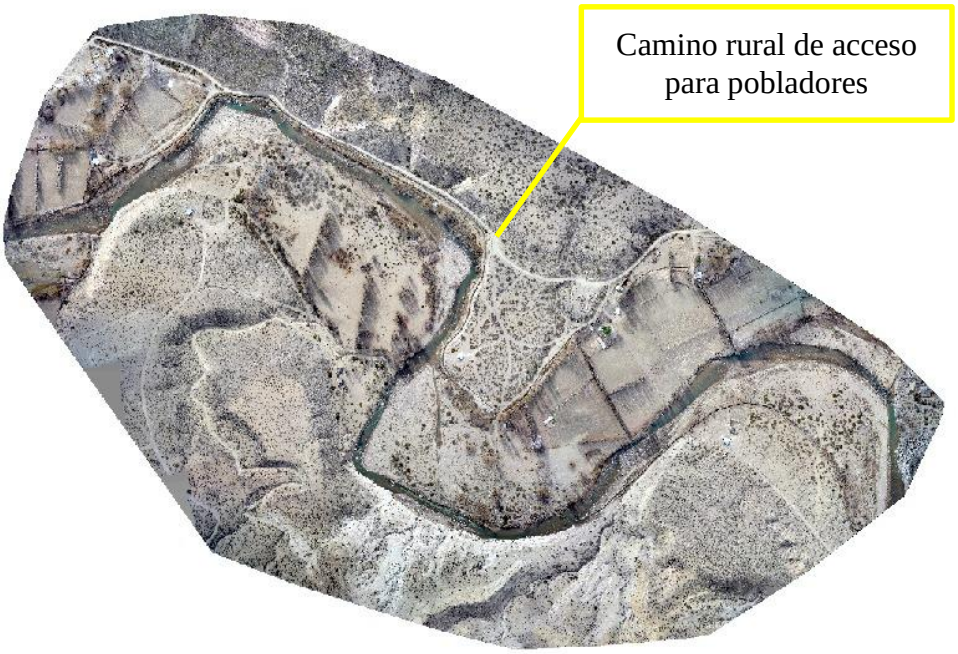

Figura 65: *Camino rural de acceso*

En primer lugar, puede observarse que tanto con las tormentas de diseño TR 50 años y TR 100 años, gran parte del camino circundante a la zona propuesta para la ubicación del puente, queda bajo agua (***Figura 58*** y ***Figura 61***), por lo cual se debería en principio redefinir una cota de rasante de diseño para este, ya que dicho camino rural es de gran importancia para la comunicación de la comunidad, vinculándolos con la Ruta Nacional N°40.

En segundo lugar, en la zona de propuesta para la ubicación del puente por la Dirección Provincial de Vialidad del Neuquén, se puede observar que con la tormenta de diseño de TR 50 años (***Figura 58***), el cauce alcanza un nivel de cota de 851,60 m.s.n.m. muy próximo a la rasante relevada del camino, la cual es 851,75 m.s.n.m (***Figura 66***), mientras que con la tormenta de diseño TR 100 años (***Figura 61***), el cauce alcanza una cota de pelo de agua de 851,90 m.s.n.m., por lo que llega a inundar toda la superficie del camino (***Figura 67***).

Figura 66: *Perfil de propuesta de ubicación del puente – Tormenta de diseño TR 50 años.*

Figura 67: *Perfil de propuesta de ubicación del puente – Tormenta de diseño TR 100 años.*

7 CONCLUSIONES

El principal logro del presente Proyecto ha sido el de poder realizar la caracterización de la cuenca del arroyo Picún Leufú para la ubicación del puente para los habitantes de la Villa Puente Picún Leufú.

Se realizó un análisis de las cuencas con la información disponible entre la que se incluyen datos de precipitaciones proporcionados por AIC de Estaciones Meteorológicas (Estación Picún Leufú Painemilla, registros de precipitaciones durante 23 años y Estación Picún Leufú Arriba, registros durante 25 años) y se aplicaron las recomendaciones de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén en lo referente a la evaluación de crecidas. Se puede concluir que la propuesta metodológica aplicada permite la integración de la información disponible, la implementación del modelo digital de elevaciones, como así también de imágenes satelitales para la determinación de parámetros de caracterización de las cuencas aluvionales que posibilitaron el cálculo de escorrentía.

Los resultados obtenidos en la determinación de caudales de las cuencas aluvionales evidencian que el criterio utilizado para el uso de los datos y valores en este proyecto, resulta ser conservador y proporciona resultados que se encuentran del lado de la seguridad a la hora de proyectar obras de infraestructura vial en la zona de estudio. Debido a que en la adopción de valores o criterios se optó siempre por la condición más desfavorables.

La condición hidrológica para la infiltración se define en función del grado de humedad previo del terreno. Como se detalló anteriormente el SCS (1972) especifico tres estados de humedad en el momento previo de producirse el aguacero a la que llama condición antecedente de humedad y son (Chow et al, 1994; Rapacioli, 2007);

AMCI Seca. Suelo seco que permite una capacidad de infiltración alta, asociada a intensidades desde 0 a 635mm/año.

AMCII Media. Suelo parcialmente húmedo que permite una capacidad de infiltración normal, asociada a intensidades desde 635 a 1270 mm/año.

AMCIII Húmeda. Suelo saturado que permite una capacidad de infiltración baja, con intensidades mayores a 1270 mm/año.

De acuerdo con la bibliografía (Ferrer Polo-1993-, -Subramaya-2008, Ponce-2014, -Nania et, al 2017) se debe considerar para el análisis de evaluación de escorrentía el estado de humedad más frecuente de los suelos de las cuencas, debido a que en la zona de estudio predominan precipitaciones anuales de 150mm a 200mm podría determinarse los caudales para la condición de humedad antecedente seca (AMCI). En este estudio se adoptó la condición de humedad media (AMCII), que es el parámetro establecido por el instructivo anexado establecido RRHH de la provincia de Neuquén. Aplicando a la modelación (AMCI) los resultados se acercan a caudales más razonables para el arroyo Picún Leufú. Los valores de caudales y volúmenes de escorrentía para las tormentas de proyecto consideradas y para la condición de humedad antecedente seca (AMCI) se detallan en la ***Tabla 21***:

	Estado de Humedad Antecedente Intermedio (AMCI)			
	TR50		TR100	
CUENCA	Qmáx. (m^3/seg)	V (1000m^3)	Qmáx. (m^3/seg)	V (1000m^3)
C1	257.3	5810.6	356	8124
C2	218.2	3975.3	300.9	5386.5
C3	68.5	1589.1	102.7	2363.7
Confluencia C4-C5	198.2	3679.5	267.1	4908.4
C4	128.6	2094.7	174.3	2813.8
C5	79.7	1584.8	106.2	2094.6

Tabla 21: *Valores de caudales máximos y volúmenes de escorrentías para condición de humedad seca (AMCI).*

Estos valores son más próximos a los caudales medios diarios obtenidos a partir de curvas HQ del lugar, teniendo en cuenta la altura hidrométrica en las mediciones realizadas en la Estación Picún Leufú Painemilla también proporcionados por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC). El máximo caudal obtenido se registró el 19 de marzo de 1997 de 151.71m^3/s.

El software HEC-RAS 5.0, a través de RAS Mapper incorpora herramientas básicas para brindar una modelación con una primera estimación del comportamiento del cauce. Se pudo obtener resultados aceptables para los caudales modelados. Los parámetros computacionales como son la dimensión de malla y el paso de tiempo computacional son factores de importancia para asegurar resultados que sean razonables como gráficos representativos del comportamiento del cauce en tiempos de análisis considerables. Se puede indicar que el Software HEC-RAS 5.0 proporciono un modelado del cauce en dos dimensiones adecuado incorporando herramientas de fácil manejo siempre y cuando se disponga de un Modelo Digital de Terreno de precisión aceptable para realizar la modelación.

A partir de las modelaciones realizadas se observan imágenes que esquematizan las velocidades que se obtuvieron en distintos sectores del cauce de análisis, valores para los cuales se recomienda realizar un estudio específico de erosión del cauce y de las márgenes del mismo, dado que las velocidades medias se encuentran por encima de los valores de velocidades máximas medias permitidas para el tipo de suelo predominante en la zona de estudio. A su vez, se recomienda elevar el nivel de cota de elevación del camino rural, para evitar su inundación y posible erosión.

Un dato para tener en cuenta es que, para dichas tormentas, la llanura de inundación alcanza en la zona propuesta, un ancho de aproximadamente 190 metros, por lo que debería realizarse un estudio intensivo del tipo de puente a colocar y de sus cabeceras de ingreso y salida, pudiéndose analizar el caso de un terraplén de acceso sobre dicha llanura de inundación y luego realizarse las corridas nuevamente del modelo para observar el comportamiento hidráulico con las obras propuestas.

La información generada resulta de gran importancia y conforma el punto de partida para lograr el diseño de obras de infraestructura para el beneficio de la comunidad del paraje en cuestión, tratando de facilitar la comunicación de las márgenes y de los pobladores que residen más lejos de la Ruta Nacional N° 40.

Se puede establecer que los resultados obtenidos del análisis de la dinámica hídrica de la cuenca son fundamentales en el diseño de proyectos y deben ser considerados, a menos que un estudio de mayor profundidad así lo avale.

Sobre la base de estas conclusiones, se puede establecer como recomendación, la necesidad de contrastar los resultados a partir de la obtención de datos de campo en una cuenca experimental, o estableciendo puntos de control en las cuencas aluvionales de la región para así poder ajustar mejor los resultados de la dinámica hídrica del arroyo Picún Leufú. Además, se considera que se debería analizar con mayor detenimiento el transporte de sedimento y los procesos erosivos que se producen producto de la dinámica hídrica.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aparicio Mijares Francisco Javier. “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Ed. Limusa S.A de C.V. Grupo Noriega Editores. 1° edición. México, (1992).
- Bradbury K.R., Dripps W., Hankley C, Anderson M., Potter K. Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates. (2000).
- Chow Ven Te –Maidment David R.– Mays Larry W. “Hidrología Aplicada”. Ed. McGraw - Hills. 4° edición. Colombia, (2000).
- Chow Ven Te. “Hidráulica de los canales abiertos”. Ed. McGraw - Hills. 4° edición. Colombia, (1994).
- Comisión de Fomento El Sauce, Gobierno de la Provincia del Neuquén - “Caracterización Hidrogeológica de la Cuenca del Arroyo Picún Leufú”. (2013).
- Bonacci O. - “Rainfall as the basin urban-runoff-Experience and practice in Yugoslavia” - Publicación periodica // Water Science and Tecnology, 16.-pags. 102-108. (1984)
- Fernández P., Segerer C.D., Fernández J.M., De Segerer E.C., Delgados C. and BUK E.M. Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia del Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Buenos Aires: INCYTH-CRA. (1980).
- Ferrer Polo F.J. “Recomendaciones para el Cálculo Hidrometereológico de Avenidas”. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, 76 p., Madrid. (1993).
- Franzese J.¸ Pereira M. y Vergani G. Aspectos estructurales de la intersección de la Dorsal de Huincul con la Faja Andina, Cuenca Neuquina, Argentina. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén. (2011).
- Garcia C.M. Caamsño Nelli G.E, Dass C.M. Estimación de láminas máximas de lluvia a partir de información pluviométrica diaria”. Ingeniería del agua-Vol 8 (2001)
- Garrido A.C. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (República Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Nueva Serie 12 (2): 121-177. Buenos Aires. (2010).

- Horton R.E., Drainage Basin Characteristics. Trans. Am. Geophys.Union, vol. 13, pp. 350-361. (1932).
- Howell J.A., Schwarz E., Spalletti L.A. and Veiga G.D.. The Neuquén Basin, Argentina: An Overview. In: Veiga G. D., Spalletti L. A., Howell J. A. and Schwarz E. (eds.) The Neuquén Basin: a case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. Geological Society of London, Special Publications, 252: 1-14. (2005).
- Instituto FLUMEN en Dinámica Fluvial e Ingeniería Hidrológica - "Manual de utilización del programa HEC-HMS". Universidad Politécnica de Cataluña. (http://www.flumen.upc.edu/es). (2010).
- INTA. "Atlas de Suelos de la República Argentina". Proyecto PNUD ARG: 85/019. (www.inta.gov.ar). (1990).
- Kirpich Z. P., Time of concentration of small agricultural wathersheds Civ, Eng, vol 10, No. 6, p.362. (1940).
- Laboratorio de Teledetección – SIG-INTA-EEA Bariloche, Rio Negro - "Áreas Ecológicas del Neuquén". (2002).
- Leanza, H.A. & C.A. Hugo. Hoja Geológica 3969-III - Picún Leufú, provincias del Neuquén y Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Naturales. SEGEMAR, Boletín 218: 1-135. Buenos Aires. (1997).
- Leanza, H. A. Estratigrafía del Paleozoico y Mesozoico anterior a los Movimientos Intermálmicos en la comarca del cerro Chachil, provincia del Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 45(3-4): 272-299, Buenos Aires. (1990).
- León Rolando J.C., Bran Donaldo, Collantes Marta, Paruelo José M. y Soriano Alberto - "Grandes unidades de vegetación Patagónica extra-andina" Depto. Ecología, IFEVA, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, INTA - EEA Bariloche, CEVEG, CONICET. (1998).
- Marcolin, A.. Relevamiento edafológico como apoyo a otros planes de trabajo. En: Memoria Técnica INTA. EERA Bariloche. 85 p. S.C. de Bariloche. (1977).
- Mármol L.. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta. Salta. (2008).

- Rapacioli Raúl. “Seminario Sistemas de Información Geográfica aplicados al manejo de Cuencas Hidrográficas”. Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional del Comahue. 1° edición. Argentina. Argentina, (2013).
- Rocha Felices Arturo. “Introducción a la Hidráulica Fluvial”. Ed. Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería. 1° edición. Perú, (1998).
- Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, disponible en U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. (1972).
- Soil Conservation Service, SCS, “Urban hydrology for small watersheds”, Technical Release 55. Washington D.C. Departamento de Agricultura de EEUUA. (1975).
- Strahler, A.. “Hypsometric (area-altitud) analysis of erosional topography”. Bulletin of Geological Society of America, 63, 1117- 1142. (1952).
- Taylor, A. & Schwarz, H.. Unit-hidrograph lag and peak flow related to basin characteristic. Transactions American Geophysical Union. 33 (2), 235-246. (1952).
- Témez J.R. - "Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales" - Dirección General de Carreteras. MOPU. (1987).
- USACE. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, version 4.3, User’s Manual. U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center. Davis. California. http://www.hec.usace.army. mil/software/hec-hms/. (2018).
- USACE, Hydrologic Engineering Center, River Analysis System HEC-RAS, Hydraulic Reference Manual version 5.0. www.usace.army.mi . (2016).
- U.S.Conservation Service (USSCS), Urban hydrology for small watersheds”, Technical Release 55. Washington D.C. Departamento de Agricultura de EEUUA. (1975).
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T.- The Epic Model. Technical Bulletin Number 1768. Agricultural Research Service, USDA. (1990)

9 ANEXOS

9.1.1 Normativa de Recursos Hídricos de la Provincia del Neuquén.

GOBIERNO DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN | MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES | NEUQUÉN PROVINCIA | JUNTOS PODEMOS MÁS

INSTRUCTIVO ESTUDIOS DE RIESGO HÍDRICO

Documentación obligatoria a presentar

Factibilidad

a) Definición de la problemática actual con fotografías del lugar.

b) La ubicación de las obras de mitigación a ejecutar deberá ser en el sistema de coordenadas Gauss Krugger Posgar 94 Faja2.

c) Estudios de antecedentes en la zona.

d) Estudios hidrológicos y criterios de diseño a adoptar.

e) Esquema general y propuesta de obras tipo.

f) Dicha documentación, se deberá presentar 1 (una) copia en:

- *Formato papel* con la siguiente documentación:
  1. Nota de solicitud dirigida al Subsecretario de Recursos Hídricos, firmada por el apoderado de la empresa (acompañando poder o indicar la nota de presentación del mismo).
  2. Resumen del estudio hidrológico (máximo 20 páginas).
  3. Plano de ubicación de las obras propuestas (máximo 5 planos).
- *Formato digital* con la siguiente documentación:
  1. Documentación completa incluyendo archivos de modelo hidrológico.
  2. Delimitación de las cuencas de aporte y traza del ducto o instalación Hidrocarburífera en estudio, en formatos shapefile (SHP).
  3. Planos de esquema general y propuesta de obra en formato CAD.

Consideraciones técnicas mínimas.

El estudio hidrológico deberá contener los siguientes aspectos:

a) Aspectos físicos de la cuenca.

- Modelo Digital del Terreno utilizado y resolución. Como máximo se deberá utilizar el MDT del IGN de resolución 30 m por 30 m.
- Mapa de pendientes de la cuenca.
- Red de drenaje.
- Curva Hipsométrica.
- Tiempo de concentración de la cuenca
  Se aplicarán las formulas del SCS, Kirprich y Temez para determinarlo y promediar las mismas para el valor único.
- Tabla con las siguientes características de las cuencas
  1) Área de la cuenca.
  2) Perímetro.
  3) Desnivel máximo.
  4) Longitud de la cuenca.
  5) Pendiente media de la cuenca.

Instructivo E.R.H. Página 1 de 6

6) Longitud del cauce principal.
7) Pendiente del curso principal.
8) Parámetro de pérdidas de la cuenca, como ser CN o coeficiente de escorrentía.
9) Tiempo de concentración.
10) Duración de tormenta.
11) Caudal de diseño.

b) Caracterización Hidrológica de la cuenca, no inferior a una escala 1:100.000.

- Mapa de tipo de cobertura de vegetación y sus porcentajes
- Mapa grupos hidrológicos de suelo, a través de mapa de tipos de suelo, texturas y drenajes.
- Mapa de Curva Numero (CN)

c) Tormenta de diseño

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia se deducirán con las formulas detalladas a continuación, tomando como base la estación pluviométrica de referencia de la zona.

Para duraciones menores a una hora (Cartaya)

$$I_D(mm/h) = \frac{P_D}{D} = \frac{1.041 \cdot D^{0.49} \cdot P_{1h}}{D}$$

Donde:

I_D: Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia estipulada.

D: es la duración en horas, 0 < D ≤ 1 hora.

P_{1h}: es la precipitación máxima acumulada en 1 hora y recurrencia estipulada.

P_{1h}/P_{24h} = **0.59** Para la zona aluvional de la provincia del Neuquén.

Para duraciones mayores a una hora (Método Intensidad Contigua - MIC)

$$I_D(mm/h) = 13.98 \cdot I_{24} \cdot D^{-0.85}$$

Donde:

I_D: Intensidad máxima media para la duración D y recurrencia estipulada.

D: es la duración en horas, 1 < D ≤ 24 horas.

I_{24}: es la intensidad máxima media de la lluvia de 24 horas en mm/h, para la Recurrencia estipulada.

d) Determinación de caudales

- Para áreas menores a 120 Ha se puede aplicar el método racional.
- Para áreas mayores a 120 Ha se debe realizar una modelación hidrológica (Modelo HMS) de cada una de las cuencas con una duración de tormenta de diseño acorde a su tiempo de concentración.

e) Para las tormentas de duraciones mayores a 1 hora, se deben combinar ambas ecuaciones de IDF.

f) Para la zona aluvional de la provincia de Neuquén, las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes estaciones y recurrencias se detallan a continuación:

GOBIERNO DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN | MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES | NEUQUÉN PROVINCIA | JUNTOS PODEMOS MÁS

Estacion	Recurrencia					
	2	5	10	25	50	100
Aero Neuquen	35	57	74	100	122	146
Paso de Indios	30	44	54	69	81	93
Catriel	34	47	60	82	104	130
RDLS	34	47	58	72	85	99
Buta Ranquil	32	40	46	56	63	72

g) Transformación Lluvia-caudal: se recomienda utilizar las metodologías del HU SCS, Snyder o Clark. En el caso de utilizar el HU Clark se deberá determinar el histograma área-tiempo de la cuenca en particular y no utilizar la ecuación propuesta por HEC.

h) Para la distribución de precipitaciones en el tiempo se debe utilizar el método de bloque alterno con el pico del hietograma entre un 25 y 33% de la duración total.

i) Las duraciones de tormentas deben ser iguales o levemente mayores al tiempo de concentración (Tc). Se admiten agrupamientos en intervalos de 30 minutos.

j) Los deltas de tiempo en los hietogramas deben ser como máximo de 10 minutos, preferentemente de 5 minutos, independientemente de la duración de la tormenta.

k) Para el abatimiento de las tormentas debido a la distribución espacial, se debe utilizar ecuaciones que relacionen área de la cuenca y duración de tormenta.

l) Para duraciones de tormenta mayores a 6 horas, se deberá elaborar un hietograma de precipitaciones de 6 hs de duración con un diámetro de tormenta convectiva entre 15 y 20 km. Luego se deben realizar supuestos de ubicación en diferentes sitios de la cuenca y el caudal de diseño será el máximo resultante de los supuestos.

m) Recurrencias mínimas de diseño en base al tipo de obra.

Tipo de obra	Recurrencia (años)
Cruce de Oleoducto, Línea de conducción, gasolinoducto, poliducto, etc	100
Gasoducto	50
Obra de defensa por inundación	100
Alcantarillas (depende de riesgo aguas abajo)	25
Zanja de guardia de locaciones	10
Obras sobre caminos	A consideración de la empresa

Autorización

a) Si cuenta con FACTIBILIDAD copia de la misma, sino incluir la documentación exigida para factibilidad.

b) La ubicación de las obras de mitigación a ejecutar deberá ser en el sistema de coordenadas Gauss Krugger Posgar 94 Faja2.

c) Licencia Ambiental del proyecto, emitida por la Subsecretaría de Medio de Ambiente de la provincia de Neuquénr.

d) Estudios topográficos y de suelos en la zona de implementación de obras.

e) Diseño hidráulico de las obras.

f) Estudio de erosión.

g) Diseño estructural y/o estabilidad de obras (si correspondiera).

h) Planos generales y de detalle, a escala conveniente y bajo el formato IRAM 4504 de normas de dibujo técnico.

i) Memoria constructiva.

j) Plan de trabajo y cronograma tentativo de obra.

k) Dicha documentación, se deberá presentar 1 (una) copia en:

- *Formato papel* con la siguiente documentación:
  1. Nota de solicitud dirigida al Subsecretario de Recursos Hídricos, firmada por el apoderado de la empresa (acompañando poder o indicar la nota de presentación del mismo).
  2. Resumen ejecutivo que contenga los principales aspectos referidos a la hidrología, hidráulica y diseño de obras (máximo 20 páginas).
  3. Memoria constructiva (máximo 20 páginas).
  4. Plano en planta con la indicación de ubicación y tipo de obra y los planos de detalle de cada uno de los cruces u obras, especificando las tapadas y obras a construir (máximo 5 planos)
- *Formato digital* con la siguiente documentación:
  1. Memoria técnica que contendrá los diseños hidráulicos, estudios de erosión, topográficos, etc.
  2. Memoria de cálculo estructural
  3. Archivos de los modelos hidráulicos utilizados.
  4. Planos en formato CAD.

Consideraciones técnicas mínimas

- El estudio hidráulico deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

  a) Para caudales menores a 4 m^3/s se podrán determinar los tirantes de agua, velocidades, etc. a través de la ecuación de Manning.

  b) Para caudales iguales o mayores a 4 m^3/s se deberá ejecutar una modelación hidráulica del tramo (HEC RAS), para lo cual se deberá relevar secciones transversales del cauce que aseguren una adecuada representación del mismo, tanto hacia aguas arriba, como aguas abajo.

  La distancia mínima respecto a la obra de interés deberá ser de 10 veces el ancho del cauce o un mínimo de 200 m, tanto aguas arriba como aguas abajo. La cantidad mínima de perfiles deberá ser de 10 o que los mismos representen fielmente las características del cauce. En el caso de afectación de vivienda, urbanizaciones y/o infraestructura, la autoridad de aplicación podrá solicitar la reducción y/o ampliación de los límites impuestos.

En base al tipo de proyecto, se debe contar con una red de puntos fijos (coordenadas GK Posgar 1994 Faja 2 y Cota IGN) materializados mediante mojones o en estructuras permanentes que garanticen su invariabilidad y permanencia a lo largo del tiempo. Estos puntos fijos deben estar distribuidos en forma tal, que la distancia a los puntos de interés (obras, cruces, etc) no exceda los 5 km.

Describir los parámetros de la modelación como ser: condición de borde aguas arriba, condición de borde aguas abajo, valores de Manning.

- Para el cálculo de erosión general se deberá utilizar la ecuación de Lischtvan-Lebediev original, determinando caudales específicos por fajas. La ecuación propuesta (Basile, 2018[1]) es la siguiente:

$$H_{sj} = \left(\frac{q_j}{4{,}7 \cdot \beta \cdot d^{0{,}28}}\right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Donde: H_{sj} es la profundidad del agua luego de ocurrida la erosión (m), q es el caudal específico de la faja j determinado como $q_j = U_j \times h_j$, d es el diámetro representativo del sedimento del lecho (m), el cual para sedimentos en el rango de las arenas, cuasi-uniformes (σ_g<1.4): d=d_{50} (mediana de la distribución granulométrica del sedimento del lecho); para sedimentos no uniformes, gravas, etc.: d=dm (diámetro medio aritmético); y β es un coeficiente adimensional, que depende de la recurrencia R asociada al caudal Q_R, para 10 años ≤ R ≤ 1000 años:

$$\beta = 0.8217 + 0.0369 \cdot \ln R$$

El exponente x es función del diámetro representativo d. Para d expresado en (mm), las siguientes ecuaciones brindan el valor de x:

$$x = \begin{cases} 0.4007 \cdot d^{-0.0262} \rightarrow 0.2 < d(mm) \leq 1 \\ 0.4005 \cdot d^{-0.0778} \rightarrow 1 < d(mm) \leq 100 \\ 0.5235 \cdot d^{-0.1359} \rightarrow 100 < d(mm) \leq 500 \end{cases}$$

- La profundidad de soterramiento debe ser 1,5 veces la erosión calculada. El ancho de soterramiento debe ser 3 veces el ancho superior del cauce o de 7 m a cada lado de la margen (el menor de ambos).
- Los ensayos de suelo deberán considerar como mínimo las siguientes características:
  1. Profundidad mínima 2m.
  2. Descripción de los Perfiles Estratigráficos.
  3. Curvas granulométricas por cada estrato encontrado.
- Se deberá anexar al Estudio de Riesgo Hídrico, Registro Fotográficos de cada cruce o afectación de cauce aluvional y/o recurso hídrico. En caso de realizar calicatas, fotografiar el perfil encontrado.
- Requisitos para la topografía efectuada con relevamiento aerofotogramétrico.

[1] Pedro A Basile 2018: Transporte de sedimentos y morfodinámica de los ríos aluviales – Capítulo 9 – Ediciones UNR.

1) Los vuelos deben estar apoyados como mínimo en 6 puntos en el terreno, con una distribución en el terreno en forma de grilla cuadrada o rectangular, siendo la máxima distribución de apoyo de 2x2 km.

2) Se deben presentar los reporte de calidad del procesamiento del vuelo aerofotogrametrico.

3) El vuelo deberá comenzar desde el extremo aguas arriba en un tramo encauzado del curso de agua.

4) Se debe anexar a los archivos digitales, el archivo de proyección y el ortomosaico del vuelo.

- Requisitos para el modelado bidimensional con HEC RAS

1) El tamaño máximo del pixel celda aceptado para el modelado bidimensional será de hasta 2x2m.

2) Como regla general, al Modelo Digital de Superficie (DSM) debe eliminarse la vegetación del cauce, con una buffer a cada lado del 20% del ancho.

5) Describir los parámetros de la modelación como ser: condición de borde aguas arriba, condición de borde aguas abajo, tamaño de X e Y de grilla computacional, tamaño X e Y de la grilla en las Breaklines (si se anexaron las mismas), shapefile de polígonos de Manning, tiempo de cálculo del modelo y tiempo de cálculo de salida.

6) Los valores de Manning deberán ser variables como mínimo entre el cauce y la planicie de inundación.

7) Para los resultados deberán anexar perfiles en los lugares donde se cruzaran los ductos o donde se quiera efectuar una obra.

8) La estimación de la erosión, deberá ser el valor más desfavorable obtenido entre el cálculo de erosión con la velocidad más elevada o el tirante más elevado.