

Caudales de diseño en cuencas de la provincia de Salta

Design flow discharges in basins of the province of Salta

Cecilia Botelli¹, Nicolás Guillén², Matías Eder²

Ingeniería civil/ artículo científico

Citar: Botelli, C.; Guillén, N. y Eder, M. (2022). Caudales de diseño en cuencas de la provincia de Salta. *Cuadernos de Ingeniería* (14). <http://revistas.ucasal.edu.ar>

Recibido: septiembre/2022

Aceptado: diciembre/2022

Resumen

Para poder dimensionar infraestructura hídrica en una localización es necesario contar con caudales de diseño asociados a diferentes tiempos de retorno. En la provincia de Salta, debido a que en la mayoría de las cuencas no se cuenta con registros históricos suficientes de caudales como para realizar un análisis estadístico de ellos, si se desean estimar los caudales e hidrogramas de diseño asociados a diferentes recurrencias es necesario aplicar un modelo de transformación lluvia-caudal; asociando los caudales a las recurrencias de las precipitaciones y, por ende, asumiendo que las tormentas de proyecto y los picos de caudales que estas generan poseen la misma recurrencia.

Este trabajo presenta el cálculo de caudales e hidrogramas de diseño en diferentes cuencas de interés de la provincia de Salta. La información que se presenta no pretende ser un reemplazo de las técnicas clásicas de análisis y procesamiento hidrológico sino un valor de referencia a nivel regional. Para generar la información de base se emplearon modelos de transformación lluvia-caudal, a partir de precipitaciones asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia (recurrencias). Se desarrollaron modelos hidrológicos en 17 cuencas de la provincia, generando así una importante base de datos (la cual será de suma utilidad en el futuro). Los resultados alcanzados resultan fundamentales para proyectar obras de infraestructura hídrica destinadas a mitigar el riesgo hídrico.

Palabras clave: hidrología de diseño, caudales de diseño, cuencas de Salta

¹ Universidad Católica de Salta.

² Universidad Nacional de Córdoba.

Abstract

In order to size water infrastructure in a location, it is necessary to have design flows associated with different return times. In the province of Salta, since most of the basins do not have sufficient historical flow records to perform a statistical analysis of them, if we wish to estimate the design flows and hydrographs associated with different recurrences it is necessary to apply a rainfall-flow transformation model; associating the flows to the rainfall recurrences and, therefore, assuming that the project storms and the flow peaks they generate have the same recurrence.

This work presents the calculation of flow rates and design hydrographs in different basins of interest in the

province of Salta. The information presented is not intended to replace the classical hydrological analysis and processing techniques, but to be a reference value at regional level. Rainfall-flow transformation models were used to generate the basic information, based on rainfall associated with different probabilities of occurrence (recurrences). Hydrological models were developed in 17 basins of the province, thus generating an important database (which will be extremely useful in the future). The results obtained are essential for the design of water infrastructure works to mitigate water risk.

Keywords: design hydrology, design flow discharges, Salta watersheds.

1. Introducción

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un impacto positivo si se la considera como un recurso natural que puede utilizarse con fines domésticos, industriales, agrícolas, mineros, o recreativos, entre otros. A la vez, también puede tener un impacto negativo si se habla de los fenómenos naturales que pueden convertirse en amenazas hídricas (por ejemplo, inundaciones) para seres vivos, suelos, infraestructura, etc.

Para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico (problema de regulación de aportes continuos a largo plazo) y para mitigar los efectos de amenazas hídricas (problema de control de eventos extremos), se debe proceder a desarrollar medidas estructurales (infraestructura) y medidas no estructurales (medidas de gestión, disposiciones legales y reglamentarias, normas de operación, etc.).

El diseño sustentable de estas medidas estructurales y no estructurales se define como el diseño consistente con los principios del desarrollo global sustentable, el cual prevé un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987). Un sobredimensionamiento de las medidas genera un impacto innecesario sobre el medioambiente y resulta antieconómico, en tanto que si se subestiman estas medidas pueden fallar con resultados catastróficos, con un impacto aun mayor para la sociedad y el medioambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados. En este marco, el diseño sustentable de las medidas estructurales y no estructurales requiere de un estudio integral que complemente los siguientes aspectos: (a) diseño hidrológico que consiste en la definición precisa de las variables hidrológicas de diseño (por ejemplo, caudal); (b) diseño hidráulico óptimo que contemple la compleja interacción de los flujos turbulentos con el lecho, márgenes, vegetación, infraestructura hídrica existente o nueva, etc.

La modelación hidrológica e hidráulica para la toma de decisiones se enmarca dentro del programa HOMS (por su sigla en inglés), esto es, el Sistema de Hidrología Operativa para Fines Múltiples, un programa creado por la Organización Meteorológica Mundial para la transferencia de tecnología en hidrología y los recursos hídricos (World Meteorological Organization, 1972). Esta tecnología se encuentra normalmente en la forma de descripciones de instrumentos hidrológicos, manuales técnicos o programas de computador, material que ha sido ofrecido para ser incorporado al HOMS por los servicios hidrológicos de los países miembros de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) a partir de las técnicas que ellos mismos usan en sus operaciones de rutina. Este es un aspecto importante de la filosofía del HOMS, dado de que asegura que la tecnología transferida no solo está lista para ser utilizada, sino también que funciona de manera confiable.

Este trabajo resume resultados obtenidos en la línea de trabajo relacionada con el diseño hidrológico de infraestructura hídrica, para lo cual se realizó un estudio detallado de cuencas de interés en la provincia de Salta y se calcularon hidrogramas de diseño asociados a diferentes recurrencias en cuencas hídricas para, posteriormente, ser utilizados para proyectar infraestructura hídrica (estructurales o no estructurales) que mitigue el riesgo hídrico.

Para el logro de tal fin se implementaron modelos computacionales de simulación hidrológica e hidráulica en cuencas, para calcular los hidrogramas de diseño en las diferentes cuencas hídricas.

Para poder implementar los modelos de transformación lluvia-caudal es fundamental contar con un adecuado estudio de lluvias de diseño. En este sentido, en los últimos años se ha avanzado en la Argentina en el desarrollo de una aplicación en línea que permite visualizar, de una manera directa e intuitiva, los mapas de valores de lluvias extremas requeridas para el diseño hidrológico de obras hidráulicas de pequeña y mediana envergadura en la porción continental del país (Catalini et. al, 2021). En esa aplicación se visualizan los valores estimados de precipitación máxima diaria (PMDT) para diferentes periodos de retorno, y el valor límite estimado de precipitación (VELP) —denominado habitualmente como precipitación máxima probable (PMP)—.

En lo referido a caudales e hidrogramas de diseño, estos son los datos fundamentales e imprescindibles a la hora de dimensionar cualquier medida estructural o no estructural para mitigar el riesgo ante una amenaza hídrica. Si no se cuenta con caudales de diseño (y por ende, hidrogramas) estimados de manera adecuada, las futuras obras o medidas proyectadas seguramente estarán mal diseñadas, lo que ocasionará problemas futuros de gran magnitud.

2. Estimación de caudales de proyecto en cuencas de la provincia de Salta

Debido a que no se cuenta con registros históricos suficientes de caudales en las cuencas de estudio como para realizar un análisis estadístico de ellos, se realizó un estudio hidrológico aplicando un modelo de transformación lluvia-caudal y se asociaron los caudales a las recurrencias de las precipitaciones, asumiendo que las tormentas de proyecto y los picos de caudales que estas generan poseen la misma recurrencia.

Es fundamental recalcar que la principal hipótesis que se tiene en cuenta cuando se aplica esta metodología es que una lluvia asociada a una recurrencia “X” genera un evento de caudal de igual recurrencia “X”. Asumir esto es muy discutible, dado que el hidrograma generado en

una cuenca no solo depende de la lluvia precipitada sobre ella, sino que también dependerá de las condiciones de humedad en la cuenca, de la distribución espacial y temporal de la lluvia, así como de los efectos orográficos. A pesar de esta fuerte limitación e hipótesis, en cuencas pobremente aforadas como las que se presentan en este trabajo no existe una metodología más adecuada que la que aquí se propone.

En este apartado se presentan los principales resultados alcanzados con relación al cálculo del caudal de proyecto asociado a recurrencias entre 2 y 100 años en cada una de las cuencas de estudio. El estudio hidrológico se realizó aplicando el método del hidrograma unitario (debido a que el área de la cuenca supera los 2 km²). Para el cálculo de la intensidad de precipitación se utilizaron las curvas intensidad-duración-recurrencia, calculadas a partir del modelo DIT (Caa-maño y Dasso, 2003). La definición de las cuencas y sus parámetros principales se realizó a partir de información topográfica satelital del modelo digital de elevación provisto por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

2.1 Modelos hidrológicos de transformación lluvia-caudal

Actualmente, existen modelos hidrológicos e hidráulicos para manejo de cuencas que permiten la simulación, con un muy buen nivel de detalle, de los eventos hidrológicos que ocurren.

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en la gestión sostenible de cuencas tanto urbanas como rurales (una cuenca es un territorio cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar). Por lo general, la modelación hidrológica involucra la identificación de subcuencas o unidades de respuesta hidrológica. Esto se hace con la ayuda de los sistemas de información geográfica. Típicamente, las fases del ciclo hidrológico (esto es, precipitación, infiltración, escorrentía y agua subterránea) se caracterizan para cada una de estas unidades y con ello se generan los datos de entrada de los modelos dinámicos de simulación. Estos se utilizan para simular la respuesta de los procesos hidrológicos a cambios en las condiciones ambientales, por ejemplo, el incremento de la precipitación y la escorrentía, junto con la disminución de la infiltración a causa del crecimiento urbano. Típicamente, los resultados se utilizan en la planeación y el manejo de las obras hidráulicas, así como en el diseño de protocolos de protección civil.

A su vez, la modelación de los sistemas hidráulicos como herramienta de diseño, revisión y toma de decisiones es actualmente una técnica indispensable dentro de las prácticas modernas de la ingeniería civil. Para emplearla adecuadamente es necesario considerar conceptos que permitan optimizar recursos humanos, materiales y, como consecuencia, económicos.

Es sumamente común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y la operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca —como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc.—. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante sus características y la precipitación. Las características de la cuenca se conocen por medio de planos topográficos y de uso de suelo; la pre-

precipitación, a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes, o bien usando el concepto de lluvia de diseño.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca.
2. Altura total de precipitación.
3. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
4. Distribución de la lluvia en el tiempo.
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Debido a que, por un lado, la cantidad y la calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro y a que, por otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escurrecimiento. Algunos de los métodos son:

- a) Métodos de envolventes: estos métodos toman en cuenta solo el área de la cuenca. Aunque no son métodos que analicen propiamente la relación entre la lluvia y el escurrimiento, son útiles para poder realizar estimaciones aproximadas de los gastos máximos probables, o bien cuando se carezca casi por completo de información.
- b) Método racional: la fórmula racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escurrecimiento. Su origen se remonta a los años 1851 o 1889, de acuerdo con diversos autores. Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación y es hoy en día muy utilizado, particularmente en el diseño de drenajes urbanos.
- c) Hidrograma unitario: el método fue desarrollado originalmente por Sherman en 1932, y está basado en las siguientes hipótesis:
 - Tiempo base constante. Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido. Todo hidrograma unitario está ligado a una duración de la lluvia en exceso.
 - Linealidad o proporcionalidad. Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.
 - Superposición de causas y efectos. El hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes.

Esta es la metodología que se implementó en el presente estudio. La Figura 1 muestra un esquema de las fases de proceso de transformación lluvia-caudal.

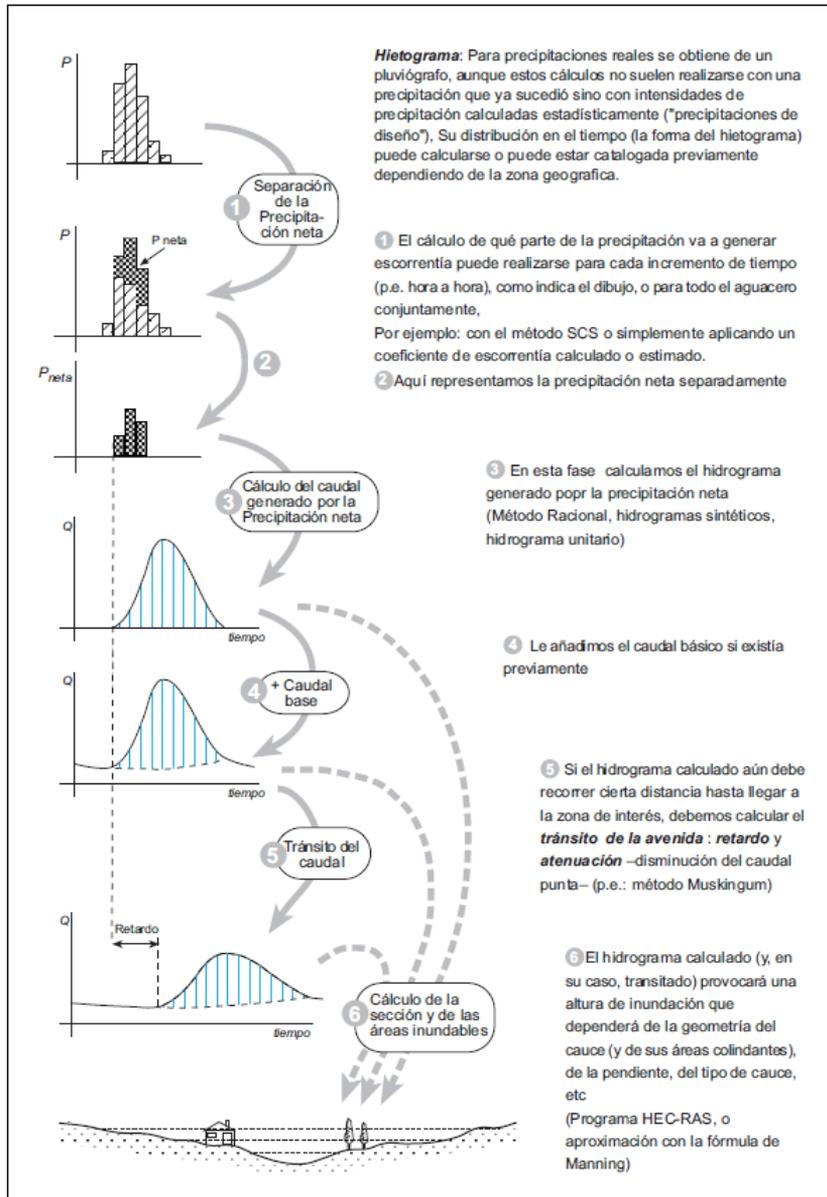


Figura 1. Esquema de la metodología de transformación lluvia-caudal empleando el método del hidrograma unitario.

2.2 Metodología empleada

A continuación, se presenta en forma sintética la metodología propuesta a aplicar para el caso de diseño hidrológico mediante un modelo de transformación lluvia-caudal cuando se cuenta con series estacionarias de precipitación máxima diaria anual (Baraquet, 2018).

- I. Delimitación de cuenca: por medio de un modelo digital de terreno (DEM) obtenido de información satelital o topografía de detalle relevada in situ se procede a delimitar la cuenca y las subcuencas.

En función del tipo de dato con que se cuente será la exactitud de la delimitación de cuenca resultante. Aunque la naturaleza digital y simbólica de los DEM permite una elevada precisión en la descripción de los procesos, no garantiza la exactitud de los resultados, principalmente en zonas de llanura.

Generalmente los DEM funcionan adecuadamente en cuencas de pendientes medias del orden de 1 %, no pasa lo mismo en cuencas de llanura. En este último caso, para la delimitación de las cuencas es necesario conocer otra información (tal como rutas existentes, vados, imágenes satelitales) la cual ayudará a conocer las posibles divisorias de aguas o escurrimientos hídricos.

- II. Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca: se definen áreas, pendientes de las cuencas, longitudes y pendientes de cauces principales, tipos de suelo y vegetación, etc.
- III. Determinación de parámetros hidrológicos del modelo: con base en la información recopilada en el lugar de estudio se definen abstracciones iniciales, tiempos de concentración, tiempos de retardo, métodos de tránsito, y parámetros de pérdidas de cada subcuenca.
- IV. Calibración de parámetros hidrológicos: se calibran los parámetros del modelo en función de la información sobre precipitaciones y caudales observados que se tenga disponible de la zona de estudio.
- V. Lluvia de diseño: se definen aquí las lluvias de diseño que serán incorporadas al modelo de transformación lluvia-caudal. Se analiza tanto la magnitud de la lámina como su distribución temporal y espacial.
- VI. Simulación hidrológica: se modela la cuenca de interés con los parámetros antes definidos para obtener los caudales de diseño.
- VII. Resultados de la simulación: se presentan los hidrogramas obtenidos para diferentes tiempos de retorno en la cuenca modelada.

3. Aplicación a la cuenca del Río Vaqueros

Se realizaron múltiples modelaciones hidrológicas en diferentes cuencas de interés de la provincia. A modo de ejemplo se presenta detalladamente una de ellas, la del Río Vaqueros.

3.1 Recopilación de información topográfica en la zona de estudio

Para la determinación de las curvas de nivel, la delimitación de las cuencas y subcuencas de la zona de estudio y de los cauces existentes en el presente trabajo se utilizó información satelital de modelos digitales de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Un DEM es una estructura numérica de datos topográficos que representa la distribución espacial de la altitud (cota) con respecto al nivel medio del mar, y que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en una determinada topografía. En este trabajo en primer lugar se recopilieron diferentes fuentes disponibles de modelos de elevación, las cuales se presentan a continuación:

1. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), presenta datos topográficos 3D del terreno en una escala global de 56° S a 60° N, para generar la base de datos topográficos digitales de alta resolución. Tiene una resolución planimétrica de 90 a 30 m según la zona de cobertura.
2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), es un instrumento de imagen a bordo de Terra, un satélite del Sistema de Observación de la Tierra (EOS, por sus siglas en inglés) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). El DEM utilizado tiene una resolución de 30 a 15 m.
3. Modelo MDEAr v2.0 del Instituto Geográfico Nacional (IGN): A partir de una combinación de datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS, el IGN llevó adelante el desarrollo del modelo MDEAr v2.0, que cubre la totalidad del territorio continental nacional, y cuya referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16).

La misión SRTM fue un proyecto internacional llevado a adelante en el año 2000 por la NASA en cooperación con el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y el National Geospatial Intelligence Agency (NGA), con el propósito de obtener un modelo digital de elevaciones global de alta resolución y calidad uniforme a partir de datos recolectados con la técnica de interferometría radar de apertura sintética (InSAR, por sus siglas en inglés).

La misión ALOS, llevada adelante por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), permitió el desarrollo de un modelo digital de elevaciones a escala global a partir de la utilización de aproximadamente 3 millones de imágenes adquiridas mediante un instrumento pancromático de teledetección para mapeo estéreo (PRISM, por sus siglas en inglés) instalado en el satélite japonés de observación terrestre “DAICHI”.

El MDEAr v2.0 que distribuye el IGN tiene una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 m.

Debido a su resolución espacial y a su precisión es que este modelo se utilizó en el presente trabajo para realizar la determinación de las curvas de nivel, la delimitación de las cuencas y la definición de los cauces existentes. En la Figura 2 se presenta el modelo digital de la zona de estudio:

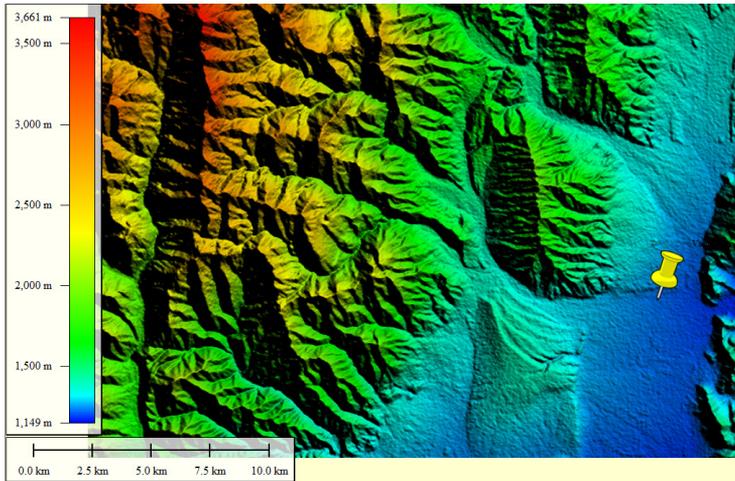


Figura 2. DEM MDEAr v2.0 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la zona de estudio.

A partir de la utilización del DEM del IGN, se determinaron las curvas de nivel con un intervalo de 100 m en la zona de estudio, las cuales se observan en la Figura 3:

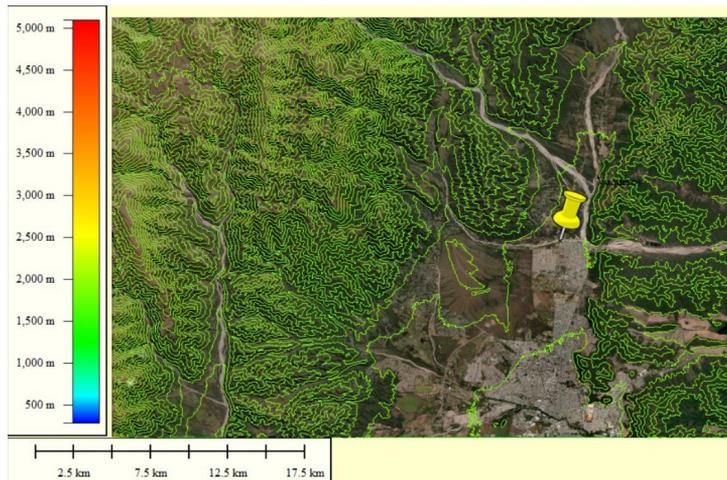


Figura 3. Curvas de nivel en la zona de estudio utilizando el modelo digital de elevación DEM MDEAr v2.0 del IGN.

3.2 Delimitación de cuencas y cauces existentes en la zona de estudio

A partir de la utilización del DEM MDE-Ar v2.0 de alta resolución del IGN, se delimitaron las cuencas y cauces existentes que aportan escurrimientos superficiales al punto de estudio donde actualmente existe el puente sobre la ruta nacional 9 (Figura 4).

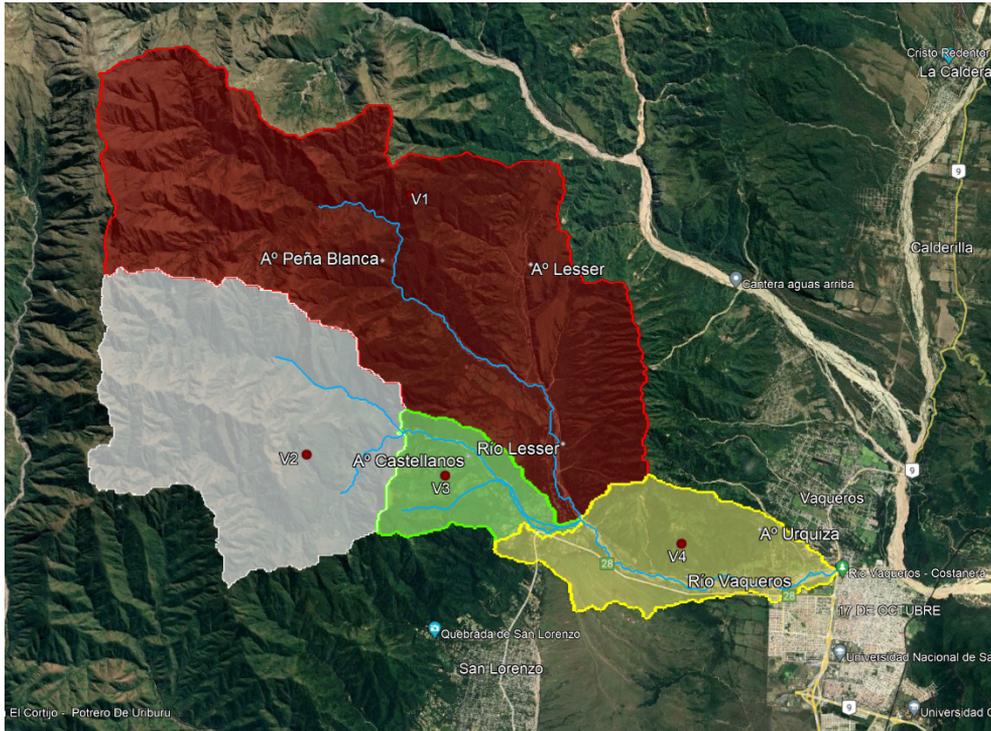


Figura 4. Principales subcuencas y cauces principales superpuestos con una imagen satelital del terreno.

3.3 Características de la cuenca de estudio

La cuenca de estudio completa tiene una superficie de 134 Km². Las subcuencas (áreas tributarias) que conforman la cuenca se definieron a partir de la información topográfica satelital provista por el modelo digital de elevación del IGN y se complementó el análisis mediante la visualización de la zona de estudio con imágenes satelitales de alta resolución. En la

Figura 5 se presentan las subcuencas y sus respectivos cauces principales, con la nomenclatura adoptada.

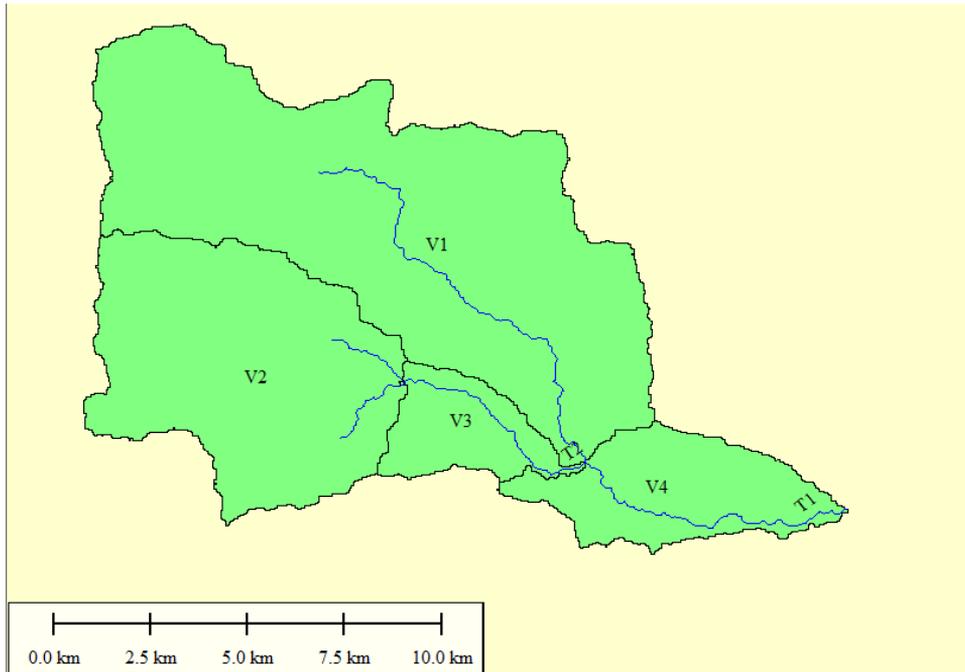


Figura 5. Principales subcuencas y cauces principales junto con la nomenclatura adoptada en cada una de las subcuencas de estudio.

Los parámetros principales de las subcuencas se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros principales de cada una de las subcuencas

Subcuenca	Área [km ²]	Cauce principal		
		L [m]	ΔH [m]	S [m/m]
V1	71.4	19438	1681	0.0865
V2	38.6	9690	1365	0.1409
V3	8.5	5050	756	0.1497
V4	15.2	7470	441	0.0590

Donde:

Área: área de las subcuencas.

L : longitud del cauce principal de las subcuencas.

ΔH : desnivel máximo del cauce principal de las subcuencas.

S : pendiente del cauce principal de las subcuencas.

Para el cálculo de los tiempos de concentración (TC) de las subcuencas; Roussel et al. (2005) concluyen que generalmente es adecuada la ecuación de Kirpich y, en particular, la ecuación de Kerby-Kirpich para estimar el tiempo de la concentración de una cuenca. Esta ecuación produce estimaciones de tiempo de concentración consistentes con valores obtenidos en cuencas que fueron calculados a partir de tormentas reales e hidrogramas de escorrentía. Al aplicar este método para el cálculo de TC , el tiempo total de concentración se obtiene sumando el tiempo de flujo superficial en lámina 1 (Kerby) y el tiempo de flujo en canal (Kirpich):

$$TC = t_0 + t_c \quad (1)$$

Donde:

$$t_0 = K_0 (L_0 \cdot N)^{0,467} S_0^{-0,235} \quad (2)$$

$$t_c = K_c L_c^{0,77} S_c^{-0,385} \quad (3)$$

K_0 : coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 1.44 para unidades del sistema internacional (SI).

K_c : coeficiente de conversión de unidades. Es igual a 0.0195 para unidades del sistema internacional (SI).

L_0 : longitud del flujo superficial (o flujo en láminas).

L_c : longitud del flujo en canal.

S_0 : pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo superficial (en el caso analizado, es igual a S).

S_c : pendiente de la cuenca adimensional en la zona de flujo en canal (en el caso analizado, es igual a S).

N : coeficiente de retardo del flujo. Su valor se obtiene de tablas.

A su vez, en cuencas hidrográficas con baja pendiente topográfica (plana), el cálculo de TC usando ecuaciones comúnmente aceptadas con el valor de pendiente de la cuenca en el denomina-

dor a menudo resulta en valores excesivamente grandes. Es decir, como la pendiente se aproxima a cero, el tiempo de concentración se aproxima al infinito. Además, debido a que la intensidad es función de la lámina de lluvia (h) dividida por la duración d (que es aproximadamente igual a TC), TC finalmente genera en la cuenca una muy pequeña intensidad y, por lo tanto, un caudal de salida de la cuenca de poca magnitud. En estos casos, Cleveland et al. (2012) recomienda un ajuste de 0.0005 a la pendiente, tanto en los métodos de Kerby como de Kirpich, para permitir resultados más realistas en las cuencas de baja pendiente topográfica.

La pendiente ajustada de la cuenca quedaría:

$$S = S_0 + 0,0005 \text{ (adimensional)} \tag{4}$$

Siendo la pendiente ajustada la que debe introducirse en las fórmulas de Kerby y Kirpich previamente desarrolladas.

Finalmente, para el caso analizado los valores de TC estimados fueron:

Tabla 2. Tiempos de concentración de cada una de las subcuencas

Subcuenca	TC [min]
V1	120
V2	58
V3	38
V4	70

Para los tránsitos se utiliza el método de Muskingum, que se vale de dos parámetros: K y X . K puede asimilarse igual al tiempo de recorrido de la onda cinemática de un extremo al otro del tramo estudiado, y X es una constante que vale entre 0 y 0.5.

A mayor valor de X menor es la amortiguación del hidrograma a lo largo del tramo del cauce. En la Figura 6 se presenta la nomenclatura adoptada para cada uno de los tránsitos:

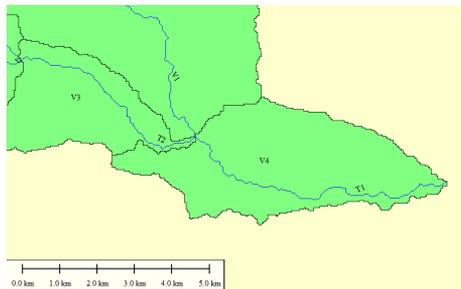


Figura 6. Principales subcuencas y cauces principales junto con la nomenclatura adoptada en cada uno de los tramos de tránsito de caudales en la cuenca de estudio.

Para cada uno de los tramos transitados se usaron los parámetros de Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del modelo de tránsito de Muskingum de cada uno de los tramos

Tramos	X	K [hs]
T1	0.3	0.46
T2	0.3	0.24

Debido a la pendiente de los tramos se adoptó un coeficiente X igual a 0.3, mientras que el valor de K se estimó en función de la longitud de los tramos y la velocidad que puede tomar una onda de crecida en cada uno de ellos.

Para el cálculo de las pérdidas en las subcuencas se utiliza el método del SCSCN. Este método utiliza dos parámetros: CN e infiltración inicial (I_a); pero este último se obtiene a partir del valor de CN con la siguiente ecuación:

$$I_a [mm] = \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)^{0.55} . \quad (5)$$

Para definir los valores de curva número (CN) de las subcuencas se necesitan datos de uso y tipo de suelo.

Para el tipo de suelo, se tiene en cuenta que según el método de pérdidas del SCSCN los tipos de suelo se dividen en cuatro categorías. A continuación se caracteriza cada una de ellas:

- Grupo A: arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: margas arcillosas, o bien arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y con alto contenido de arcilla.
- Grupo D: suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Del SIG de la base de datos “Suelos de la República Argentina - Escala 1500 000” del INTA, se extrajo la siguiente carta de suelos de la zona de estudio:

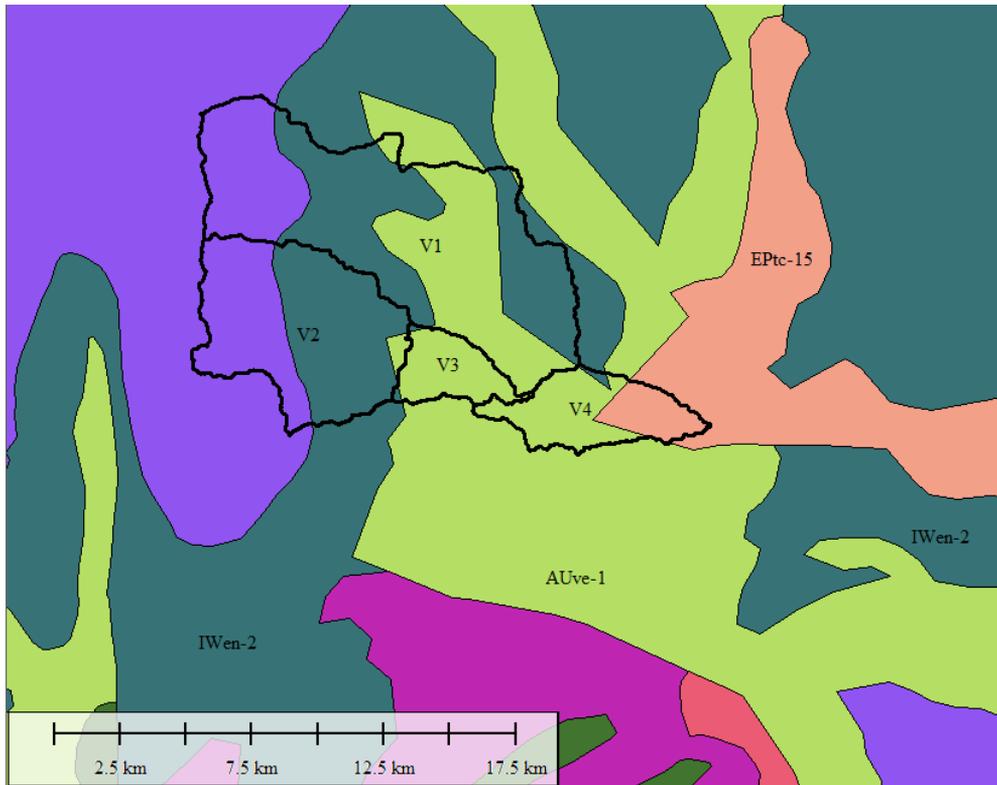


Figura 7. Tipos de suelo en el área de estudio.

Al analizar la última figura se observa que en la zona de estudio existen los siguientes tipos de suelo:

- IWen-2: está compuesto por suelos de pendiente escarpada, franco limo gravillo, bien drenado.
- EPli-25: está compuesto por suelos rocosos.
- AUve-1: está compuesto por suelos francoarcillosos.
- EPtc-15: está compuesto por suelos arenogrillosos con drenaje excesivo.

Estos suelos son de tipo B según la clasificación del SCS.

Para el uso del suelo se realizó un análisis de imágenes satelitales del terreno. Si se observa una imagen satelital de la cuenca, se observan zonas bien diferenciadas (Figura):

- En las zonas de la cuenca con mayores altitudes se observan suelos desnudos de afloramientos rocosos, los cuales coinciden con la zona de la cuenca alta.
- En la zona baja de la cuenca aparecen áreas de depósitos de suelos arenosos y médanos, las cuales coinciden con las zonas de menor pendiente y depósito de sedimentos. En ellas se observan áreas con pastizales y cultivables.

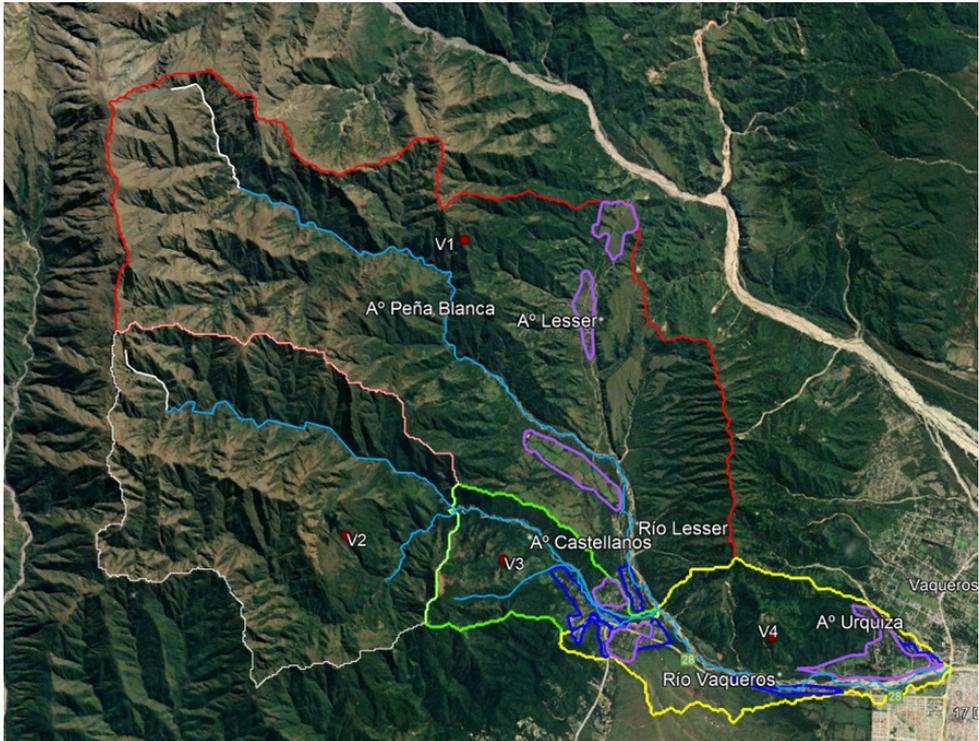


Figura 8. Uso de suelo en el área de estudio.

Los valores estimados de *CN* a partir de los usos y tipos de suelo de cada una de las subcuencas se presentan a continuación:

Tabla 4. Parámetros del modelo de pérdidas del SCSCN de cada una de las subcuencas

Subcuenca	<i>CN</i>
V1	73
V2	72
V3	66
V4	67

Vale aclarar que todas las modelaciones se realizaron considerando como referencia la condición de humedad antecedente II (condición intermedia).

3.4 Lluvia de diseño

3.4.1 Cálculo de la curva IDT

La probabilidad de ocurrencia de una lluvia depende de su persistencia o duración, por lo que hace falta establecer la relación entre tres variables: la intensidad (i), la duración (d), y el período de retorno (T , inversamente relacionado con la probabilidad de ocurrencia), las cuales requieren para su construcción de registros continuos (pluviografía), escasos en la Argentina (al igual que en muchos lugares del mundo), tanto por su cobertura espacial como por la extensión temporal de sus series. Estas curvas o relaciones están disponibles en menos de 29 localidades en Argentina, las cuales se muestran en la Figura 8:

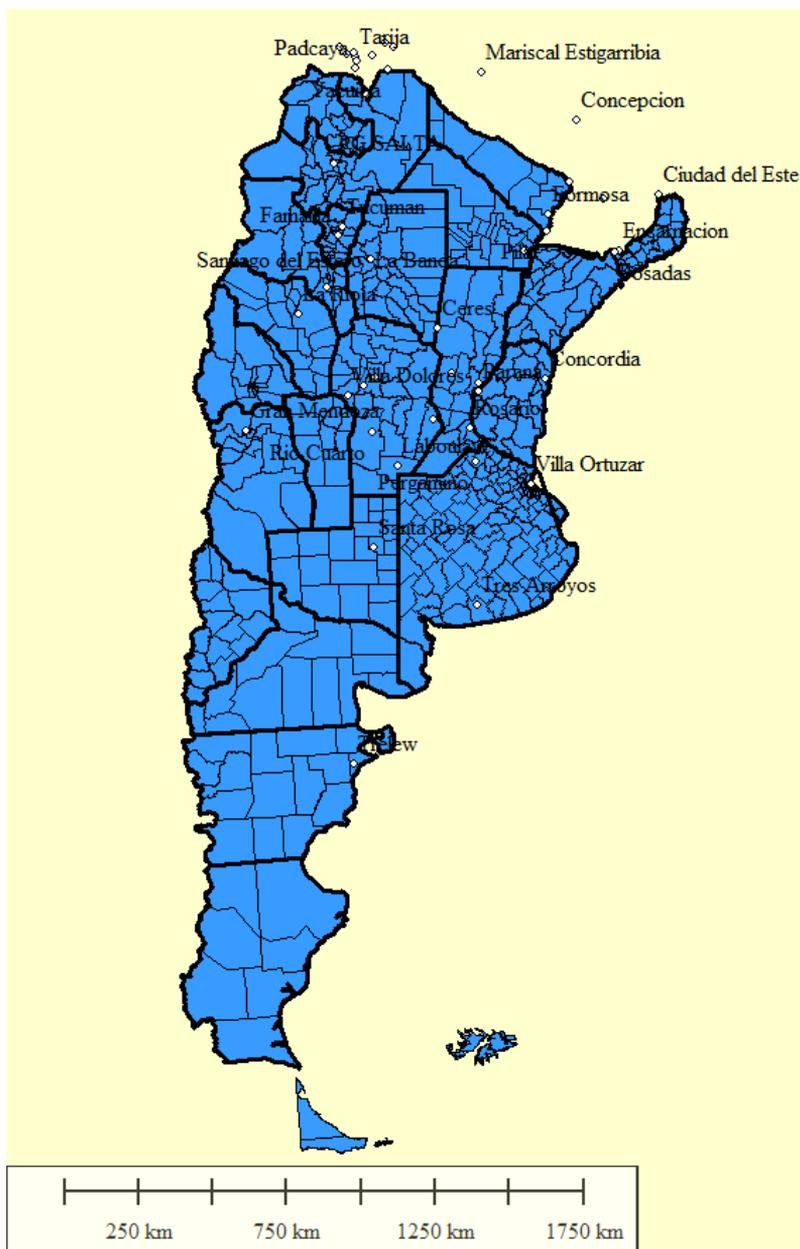


Figura 8. Localización de las estaciones pluviográficas en la Argentina y en países limítrofes.

Esta información será transpuesta a localidades más cercanas a la zona de estudio (donde se encuentren disponibles registros pluviométricos históricos) regionalizando la información pluviográfica con técnicas apropiadas, asumiendo que esta estación pluviográfica y la estación pluviométrica se encuentran en una zona meteorológicamente homogénea, de acuerdo con lo propuesto por Caamaño y Dasso, 2003.

Dentro del marco del proyecto nacional “Estimación de láminas de lluvias máximas diarias y sus parámetros estadísticos en Argentina” (Guillén et al., 2018), se han analizado más de 1500 estaciones pluviométricas en la Argentina, las cuales se presentan en la Figura 9:

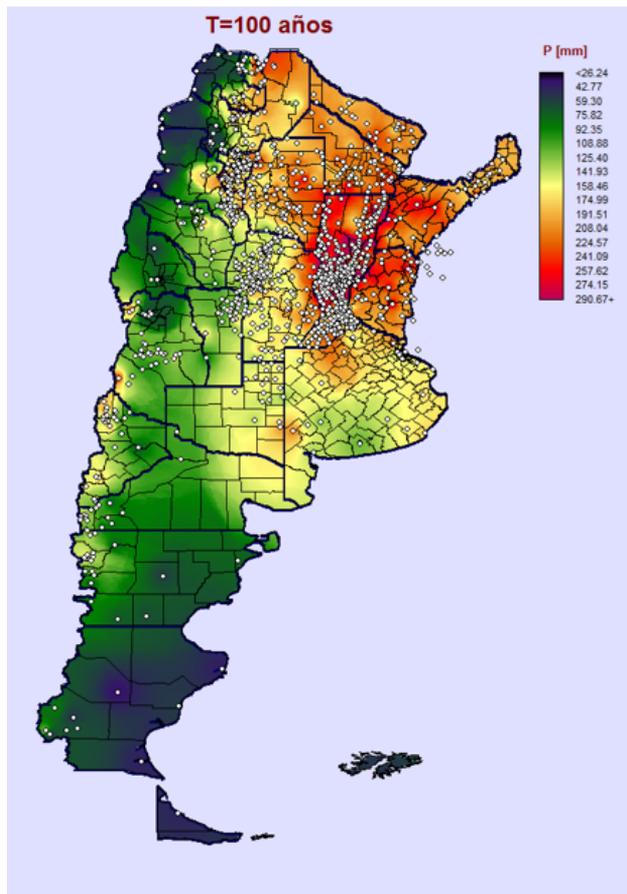


Figura 9. Localización de las estaciones pluviométricas en la Argentina superpuestas con el mapa de láminas de lluvia máximas diarias asociadas a 100 años de tiempo de retorno (Guillén et al., 2018).

Para la transposición de la información se utilizará el algoritmo denominado DIT (Caamaño y Dasso, 2003) que parametriza el rol de la lluvia diaria en el vínculo $i-d-T$ y permite transponerlo como una superficie tridimensional continua. El modelo DIT plantea al logaritmo de la intensidad como una función lineal del factor de frecuencia \mathcal{O}_y , y de un factor de persistencia δ_y , vinculados mediante dos parámetros locales, propios de la estación de medición, A y C , y uno zonal, B :

$$\ln i_{d,T} = A \cdot \mathcal{O}_y - B \cdot \delta_y + C. \quad (6)$$

Siendo:

$$\mathcal{O}_y = 2,584458 \cdot (\ln T)^{\frac{3}{8}} - 2,252573 \quad (7)$$

$$\delta_y = (\ln d)^{\frac{5}{3}} \quad (8)$$

Los parámetros de este algoritmo, llamado DIT de aquí en adelante, son A , B , C y el exponente $q=5/3$ de la ecuación (8). La estimación de este último en las estaciones de ensayo del modelo arrojó valores próximos a $5/3$, lo que será adoptado aquí como constante. Lógicamente, la bondad de ajuste decae por perder flexibilidad; pero como sigue siendo muy buena, la mejora en la parsimonia del modelo justifica suprimir un parámetro.

Más allá de su carácter conceptual y su buen desempeño numérico, la gran ventaja del DIT es la forma explícita en que los parámetros locales C y A se transforman en C' y A' , al transponer la función $i-d-T$ de un pluviógrafo cercano a un pluviómetro (estación pluviométrica cercana a la cuenca analizada), dentro de una zona meteorológicamente homogénea, donde B y q son constantes. Basta con sustituir la media, μ , y el desvío estándar, σ , de los logaritmos de la serie pluviográfica diaria por los homólogos de la pluviométrica, μ' y σ' , según las ecuaciones (4) y (5):

$$A' = A - \sigma + \sigma', \quad (9)$$

$$C' = C - \mu + \mu'. \quad (10)$$

Debido a la cercanía de la cuenca de estudio con la localidad de Salta capital, es que se procedió a utilizar la IDT estimada en esa localización en proyectos de investigación previos del grupo de trabajo (Guillén, 2016 y 2018). La estación pluviográfica más cercana a la zona de estudio se muestra en la Figura 10, y es la que se encuentra en el aeropuerto de Salta capital.

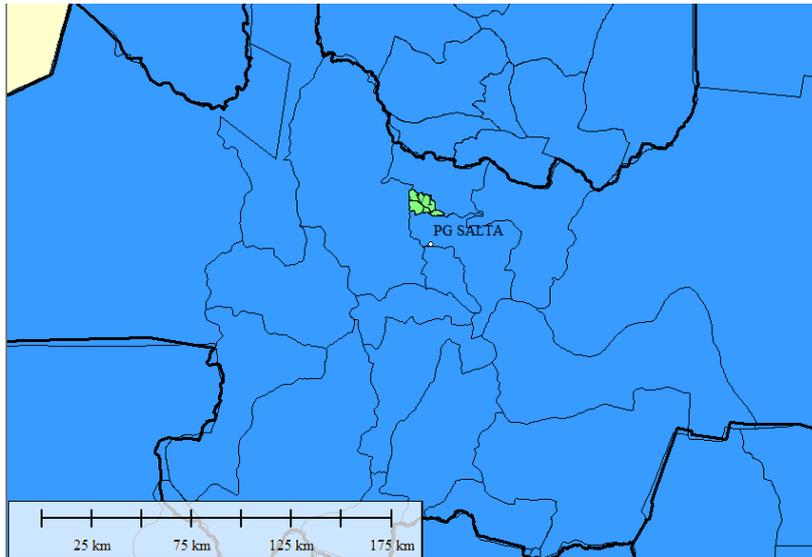


Figura 10. Localización de la estación pluviográfica de Salta capital respecto a la ubicación de la zona de estudio.

En resumen, se utilizó la información de la estación pluviográfica base de Salta capital, y se aplicó la relación IDT estimada en esa localidad en el caso de estudio.

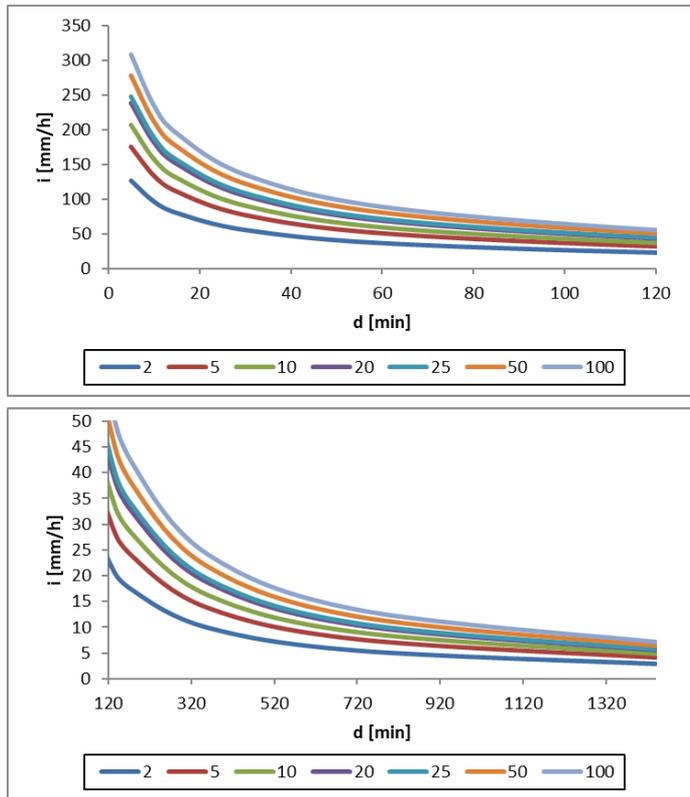


Figura 11. Curva IDT en la localidad de Salta capital para duraciones menores a 120 min (arriba) y mayores a 120 min (abajo).

3.4.2 Cálculo de la duración de la tormenta crítica sobre la cuenca

Para calcular la duración de la tormenta crítica de la cuenca analizada se modelaron, para una recurrencia de 25 años, lluvias de diferentes duraciones para encontrar cual es la duración que genera el caudal pico máximo (caso más desfavorable). Esto se hizo teniendo en cuenta aplicando el modelo del SCSCN con los valores previamente presentados. A continuación, se grafican los caudales pico obtenidos en la cuenca para cada una de las duraciones de lluvia modeladas:

Caudales de diseño en cuencas de la provincia de Salta

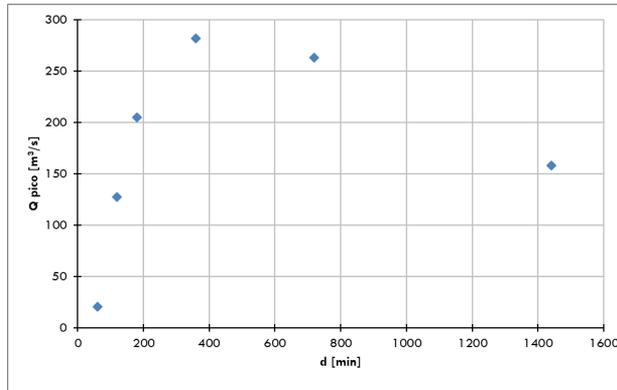


Figura 12. Caudales pico obtenidos para diferentes duraciones de lluvias modeladas sobre la cuenca.

En la Figura 12 se observa que a partir de una duración de tormenta de 360 min (6 h) la cuenca entra en régimen, es decir que los caudales pico alcanzan su valor máximo. Para duraciones mayores se obtienen caudales menores, por lo que la tormenta de duración igual a 6 horas es la crítica sobre la cuenca de estudio. Es por ello que la duración de la lluvia de diseño a ser ingresada al modelo hidrológico para la determinación de los caudales de diseño es de 360 min (y esta generará la respuesta más desfavorable sobre la cuenca).

Partiendo de la curva IDT previamente calculada, se estimaron las lluvias de diseño asociadas a las recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Las láminas de lluvia correspondientes a una duración de 360 min (duración crítica de la cuenca) y a los diferentes T son:

Tabla 5. Láminas de lluvia (en mm) caídas en 360 min para las diferentes recurrencias

T [años]	2	5	10	25	50	100
h [mm]	60	82	97	131	116	145

3.4.2 Atenuación espacial de la lámina de lluvia

Se tiene en cuenta debido a que el área de la cuenca es mayor a 25 km². Se aplicó el método CODA (Catalini, 2002). Este establece que:

$$h_{areal} = CDA \cdot h. \quad (11)$$

Donde:

h_{areal} : Lámina de lluvia media areal sobre la cuenca.

h : Lámina de lluvia puntual cuya localización coincide con la ubicación de la IDT previamente calculada.

CDA : Coeficiente de atenuación para calcular la precipitación media areal en una cuenca a partir de datos de precipitación puntuales. Depende de la duración de la tormenta (d) y del área de la cuenca (A) y, tal como se indica en Catalini (2002) se calcula como:

$$CDA = 25^{-k} A^k, \tag{12}$$

$$k = -2,1438 d^{-0,4774}. \tag{13}$$

Las láminas de lluvia medias areales correspondientes a una duración de 360 min (duración crítica de la cuenca) y a los diferentes T son:

Tabla 5. Láminas de lluvia medias areales (en mm) caídas en 360 min para las diferentes recurrencias

T [años]	2	5	10	25	50	100
h [mm]	48	66	78	94	105	117

3.4.4 Distribución temporal de la lámina de lluvia

Se aplicaron los hietogramas tipo determinados en proyectos de investigación previos a partir del análisis de la información pluviográfica de Salta capital (Guillén, 2016).

La siguiente tabla muestra los hietogramas tipo para duraciones entre 15 y 1440 min sintetizados en el aeropuerto de Salta, con el método de la mediana de la distribución empírica (técnica de Huff) y por el método del ordenamiento de intervalos (técnica de Pilgrim), expresados en sextiles. Cada bloque de las 8 series dura 1/6 de la duración.

Tabla 6. Hietogramas tipo estimados en Salta capital

d [min]	Δt [min]	n	PILGRIM				HUFF			
			tp [min]	Coeficiente	Coeficiente de picn	tp [min]	Coeficiente	Coeficiente c		
15	5	1	2.5	17%	46%	1	2.5	17%	44%	
30	5	3	12.5	42%	28%	1	2.5	8%	19%	
60	10	3	25	42%	34%	3	25	42%	25%	
120	20	2	30	25%	29%	2	30	25%	28%	
240	40	2	60	25%	42%	2	60	25%	26%	
480	80	5	360	75%	48%	4	280	58%	25%	
720	120	5	540	75%	52%	5	540	75%	37%	
1440	240	6	1320	92%	72%	6	1320	92%	45%	

Teniendo en cuenta estos resultados y la duración crítica de la tormenta en la cuenca, en este trabajo se utilizó un coeficiente de avance (es decir, una relación entre la posición del pico de la tormenta y la duración total de la precipitación) de 0.33.

3.5 Modelo de transformación lluvia-caudal

Se utilizó el HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) que es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y, por extensión, en nuestro país.

HEC-HMS está diseñado para simular el proceso de precipitaciónescurrencimiento en cuencas. Está diseñado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un rango general de problemas. Puede utilizarse en pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención; los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, etc. La versión es amigable para el usuario porque permite visualizar los resultados de las simulaciones en forma gráfica, tabulada y expeditiva.

El programa incluye una interfaz gráfica para el usuario (GUI) que le permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico por medio de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. El documento de ayuda incorporado en el programa aclara la utilización de sus opciones.

Los archivos de extensión DSS (Data Storage System) se utilizan para almacenar y trabajar con series de tiempo, funciones emparejadas y datos de grilla en una forma muy transparente para el usuario.

Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

1. Subcuencas (*subbasins*)
2. Tramos de tránsito (routing reach)
3. Uniones (*junctions*)
4. Embalses (*reservoirs*)
5. Fuentes (*sources*)
6. Sumideros (*sinks*)
7. Derivaciones (*diversions*)

Con estos siete componentes, el usuario puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que está tratando y como permita la información de campo disponible. Si se cuenta con información digital de campo, el HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo.

Los elementos anteriores se disponen en forma de redes dendríticas con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos desde las subcuencas, que conforman las cabeceras aguas arriba, hasta el punto de salida de todo el caudal, aguas abajo. El usuario debe prestar atención a este criterio, ya que los cálculos siguen rigurosamente esta secuencia (por ejemplo, si tienen en cuenta una derivación no pueden entregar las aguas derivadas en un punto aguas arriba, aunque técnicamente esto sea factible). Por tal motivo, el primer paso en la preparación de la información consiste en definir correctamente la estructura de la cuenca que se pretende simular.

El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

1. **Módulo de precipitación:** permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.

2. **Módulo de la cuenca:** permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos.

3. **Módulo de control:** incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización), y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos.

Estos tres módulos deben definirse completamente antes de iniciar la corrida de la simulación.

Se utiliza el hidrograma unitario adimensional del SCS modificado, el cual se define por la siguiente relación:

$$q_p = PRF \times A \times Q/t_p. \quad (14)$$

Donde:

q_p : Caudal pico del hidrograma unitario en ft^3/s .

A : Área de la cuenca en mi^2 .

Q : Volumen escurrido en pulgadas.

t_p : Tiempo al pico del hidrograma unitario en horas.

El porcentaje del volumen que escurre antes de alcanzar el caudal pico (PRF , por sus siglas en inglés) no es uniforme en todas las cuencas debido a que depende de la longitud del cauce principal, la cobertura del suelo y otras propiedades de la cuenca. Haciendo variar este factor, se pueden obtener diferentes hidrogramas unitarios adimensionales del SCS. Se ha encontrado que las cuencas de llanura poseen factores PRF más bajos (del orden de 100 a 300), mientras que cuencas con mayores pendientes poseen PRF más altos (del orden de 400 a más de 600).

Para poder definir el factor PRF de los hidrogramas unitarios adimensionales, Sheridan et al. (2002) desarrolló una relación entre dicho factor y dos características de las cuencas: el área de drenaje (A , en km^2) y la pendiente del cauce principal (S , en %):

$$PRF = 490,196 \times S^{0,882} \times A^{0,264}. \quad (15)$$

Caudales de diseño en cuencas de la provincia de Salta

El hidrograma unitario estándar adimensional del SCS utiliza por defecto un PRF=484; en este trabajo se analizó cada una de las subcuencas y se definió el valor del PRF para cada una de ellas.

Para poder aplicar este hidrograma unitario, es necesario además calcular el tiempo de retardo (t_{lag}) de la cuenca. Este parámetro se calcula como el 60 % del tiempo de concentración de la cuenca, es decir:

$$t_{lag} = 0,6 T. \quad (16)$$

3.6 Caudales de proyecto

En la Figura 13 se presenta el esquema de modelación adoptado en HEC-HMS para la cuenca:

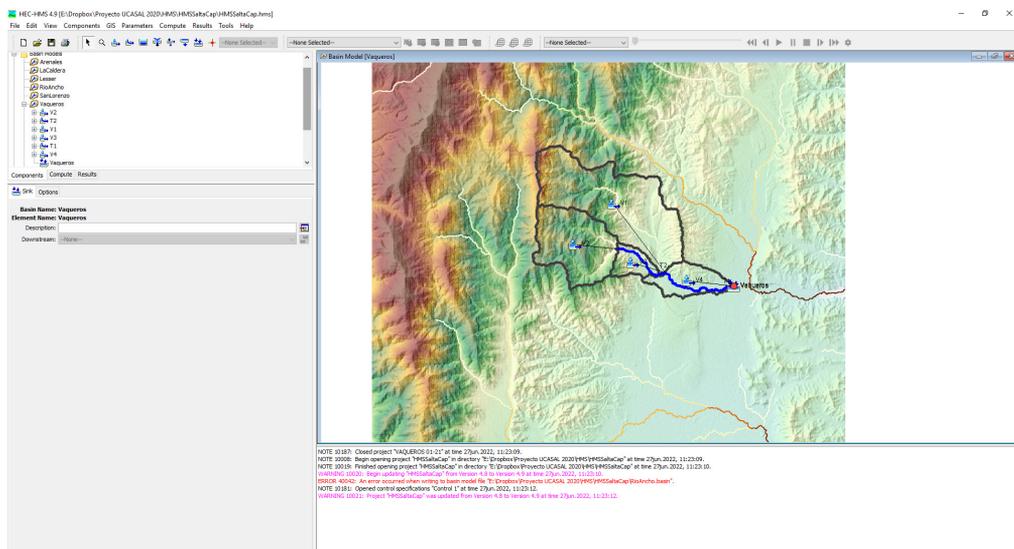


Figura 13. Esquema de modelación en HEC-HMS.

A continuación, se presentan los caudales pico de cada uno de los hidrogramas obtenidos de la modelación en dicha localización.

Tabla 7. Caudales pico asociados a las diferentes recurrencias

T [años]	Q máximo [m^3/s]
2	100
5	207
10	293
25	414
50	511
100	612

Además, se conocen los hidrogramas y los caudales de diseño asociados a las diferentes recurrencias en cada una de las subcuencas y puntos de interés dentro del área de estudio.

3.7 Validación de los resultados obtenidos

Para poder complementar el estudio hidrológico aquí presentado, se validaron los caudales de diseño estimados con los obtenidos en un estudio anterior para la misma localización.

En el Río Vaqueros se contaba con un estudio realizado en el año 2010 por el ingeniero Néstor Ilvento, denominado Proyecto Parque Urbano Bicentenario. En él se arribaba a los siguientes caudales de diseño:

- $Q=308 m^3/s$ para una recurrencia de 25 años
- $Q=477 m^3/s$ para una recurrencia de 50 años

Con el modelo hidrológico aquí desarrollado se obtuvieron los caudales de diseño 414 y 511 m^3/s para recurrencias de 25 y 50 años respectivamente, valores del mismo orden de magnitud que los obtenidos en el antecedente.

Con ello se validan los caudales de diseño y se refuerzan los resultados alcanzados en este trabajo.

4. Resultados

Siguiendo la misma metodología que la previamente explicada, se realizaron estudios hidrológicos de manera análoga en otros sitios de interés (Figuras 15, 16, 17 y 18).

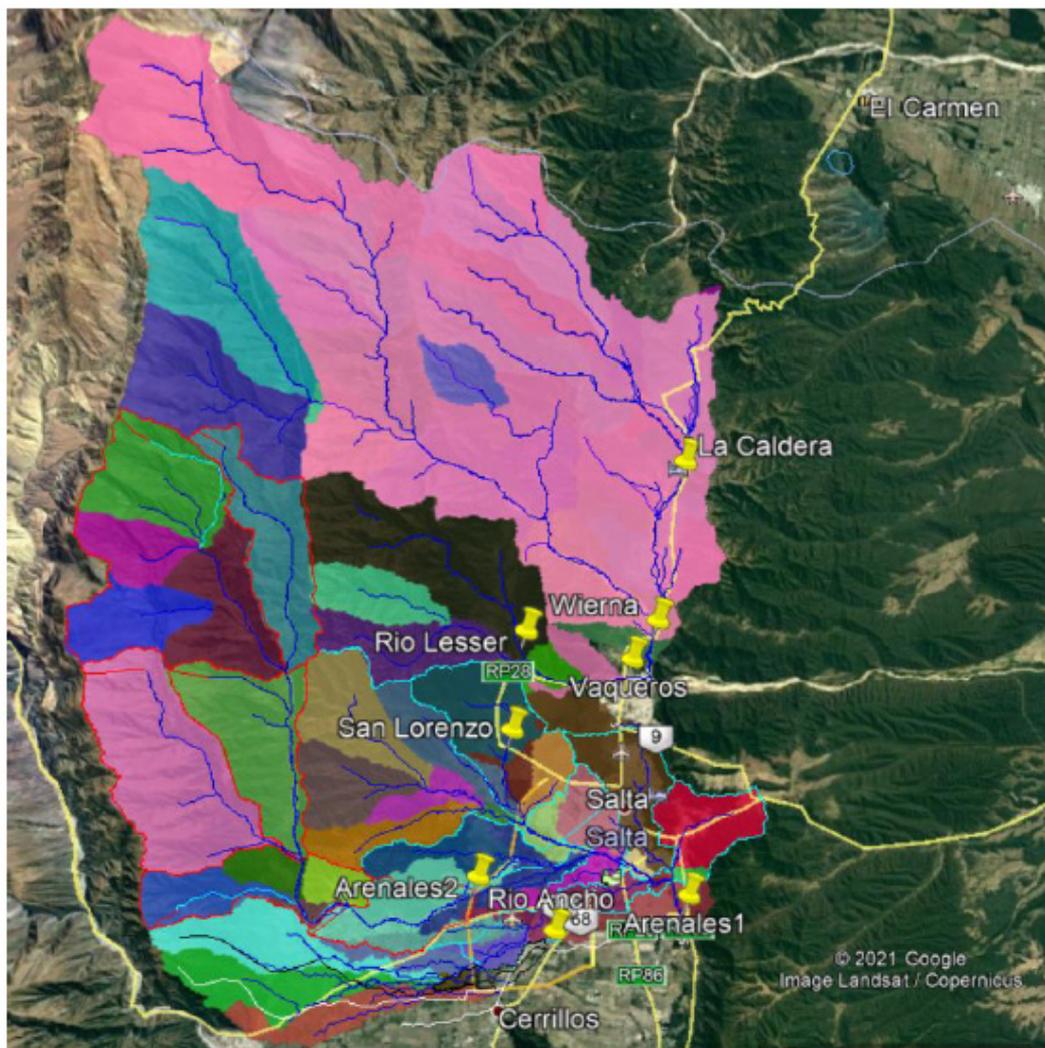


Figura 14. Cuencas cercanas a la ciudad de Salta.

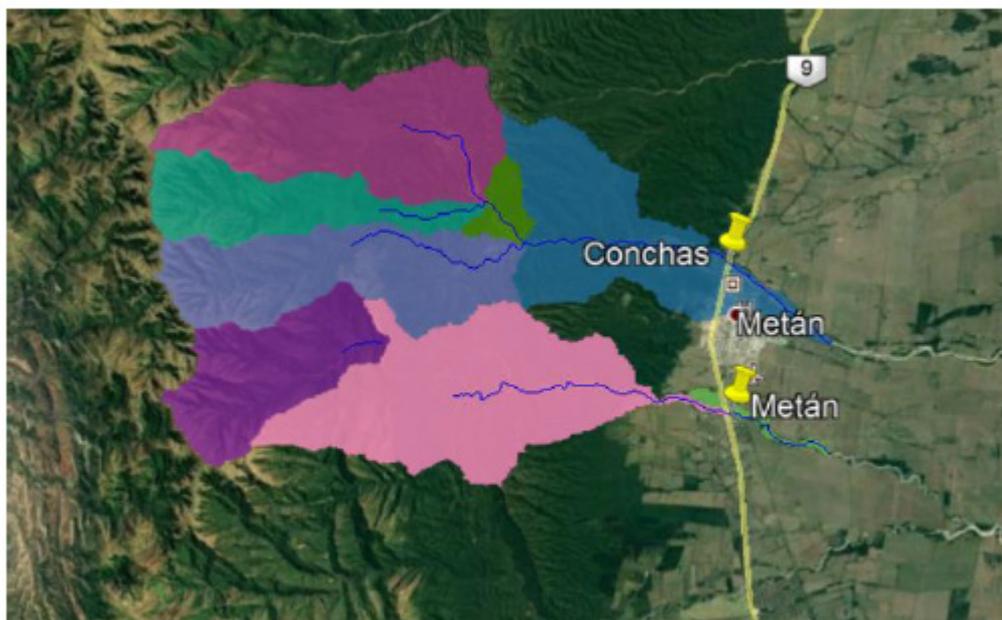


Figura 15. Cuencas cercanas a la ciudad de Metán.

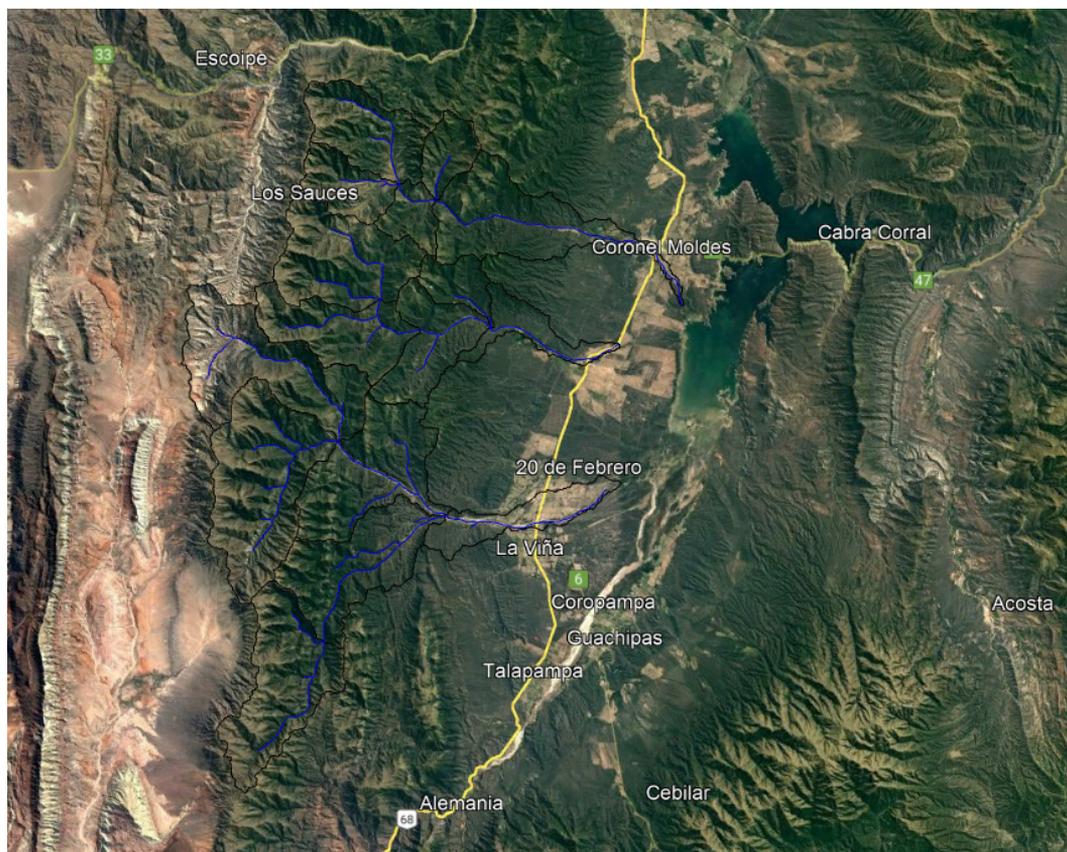


Figura 16. Cuencas cercanas al embalse Cabra Corral.

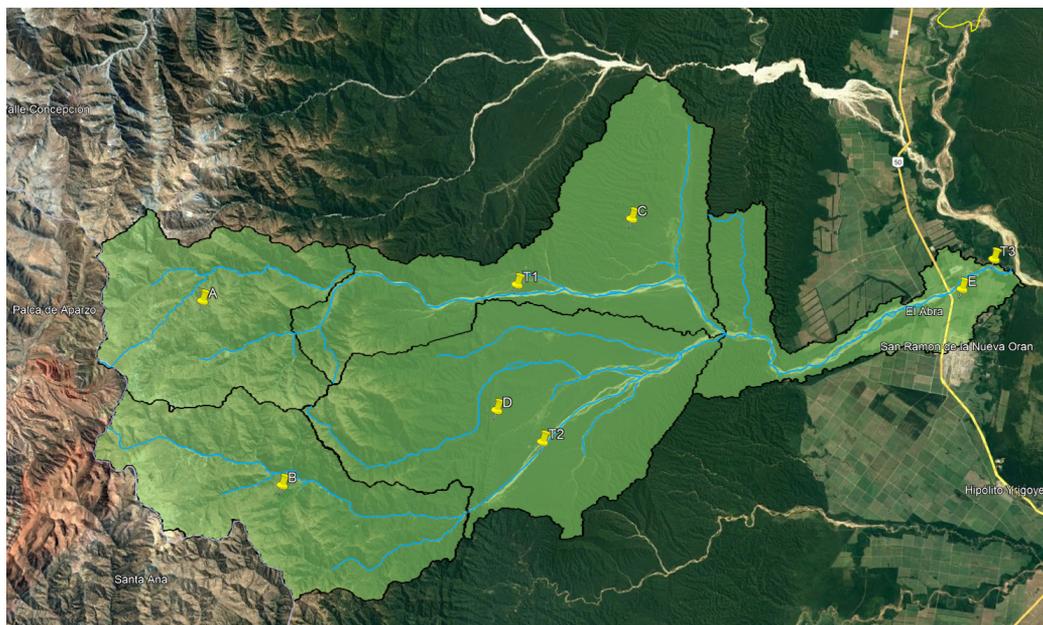


Figura 17. Cuencas cercanas a la ciudad de Orán.

Las principales características de las cuencas analizadas se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Principales características de las cuencas analizadas

Cuenca	A [km ²]	L [m]	ΔH [m]	S [m/m]	CN medio	TC [min]	d [min]
Arenales arriba	326	47 534	2336	5 %	71	269	360
Arenales abajo	643	61 786	2420	4 %	71	352	360
Río Ancho	90	25 102	1106	4 %	71	173	360
La Caldera	169	22 052	761	3 %	69	200	360
Wierna	632	55 979	3693	7 %	70	273	720
Lesser	71	18 787	1949	10 %	69	102	180
Vaqueros	134	27 514	1821	7 %	72	165	360
San Lorenzo	22	8354	815	10 %	70	67	120
Metán	74	27 623	1866	7 %	72	154	360
Conchas	132	26 610	1877	7 %	68	150	360
Chuñapampa	143	35 241	1770	5 %	69	214	360
Ampascachi	155	31 072	1649	5 %	69	192	360
La Viña	329	41 350	1985	5 %	69	243	360
Río Blanco	1709	109 368	4800	4 %	66	507	720

Donde:

A : área de la cuenca

L : longitud del cauce principal

ΔH : diferencia de altura del cauce principal

S : pendiente del cauce principal

CN medio: CN promedio de la cuenca analizada

TC : tiempo de concentración de la cuenca

d : duración crítica de la tormenta de diseño ingresada al modelo

Las láminas de precipitaciones medias areales simuladas se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Láminas de lluvia medias areales para cada una de las recurrencias

Cuenca	h [mm] para diferentes T [años]					
	2	5	10	25	50	100
Arenales arriba	43	59	70	80	84	94
Arenales abajo	39	54	64	77	86	95
Río Ancho	51	70	82	99	111	123
La Caldera	47	64	76	91	102	113
Wierna	49	68	80	96	108	119
Lesser	43	59	69	83	93	103
Vaqueros	48	66	78	94	105	117
San Lorenzo	48	65	77	93	104	115
Metán	64	79	89	101	110	118
Conchas	59	74	83	94	102	109
Chuñapampa	36	49	58	70	78	87
Ampascachi	36	49	58	70	78	87
La Viña	36	49	58	70	78	87
Río Blanco	45	62	73	87	98	109

La Tabla 10 resume los caudales pico asociados a cada uno de los tiempos de retorno estimados.

Tabla 10. Caudales pico asociados a las diferentes recurrencias

Cuenca	Q pico [m ³ /s] para diferentes T [años]					
	2	5	10	25	50	100
Arenales arriba	161	348	503	723	901	1089
Arenales abajo	231	495	712	1022	1274	1541
Río Ancho	40	75	110	164	210	260
La Caldera	98	215	309	445	555	670
Wierna	290	609	865	1226	1516	1820
Lesser	57	124	179	258	322	389
Vaqueros	100	207	293	414	511	612
San Lorenzo	31	66	93	133	165	200
Metán	119	188	235	297	343	388
Conchas	151	248	317	406	452	543
Chuñapampa	33	81	124	187	240	297
Ampascachi	38	95	145	220	282	350
La Viña	74	185	282	426	546	676
Río Blanco	352	808	1192	1749	2207	2695

Para analizar detalladamente los resultados obtenidos, lo primero que se realiza es la estimación de un parámetro hidrológico muy útil en la hidrología, el cual es el coeficiente de escurrimiento (es decir, la relación entre la lámina escurrida y la lámina precipitada o, lo que es lo mismo, la relación entre el volumen escurrido y el precipitado sobre la cuenca). La Figura 20 muestra los resultados alcanzados, en donde se observa muy claramente cómo dichos valores (tal como era de esperarse) aumentan a medida que crece el periodo de retorno. Por otro lado, en cuencas homogéneas se obtienen valores del mismo orden de magnitud, y este parámetro a futuro puede ser de suma utilidad para una estimación rápida y preliminar de escurrimientos que pudieran generarse en una cuenca cercana a las estudiadas.

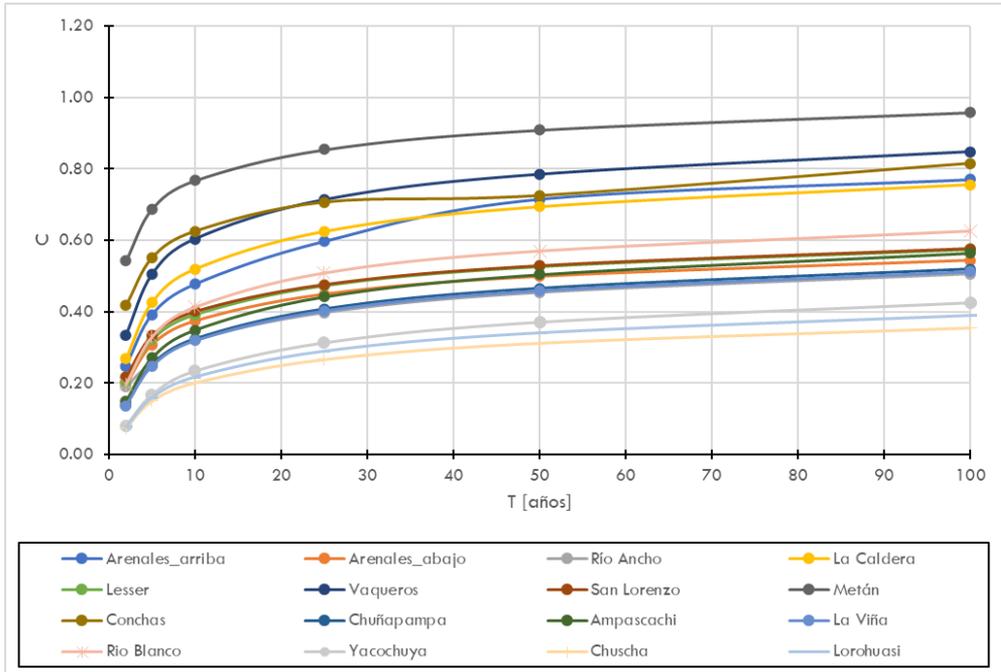


Figura 18. Coeficientes de escurrimiento de cada una de las cuencas, asociados a cada una de las recurrencias.

En la última figura se observa que las cuencas cercanas a la localidad de Cafayate presentan los valores más bajos, y esto se debe al suelo arenoso y a las menores precipitaciones que se registran en esa zona (véase Figura 9). A su vez, las cuencas del Valle de Lerma (y cercanas a Salta capital) presentan los valores intermedios de coeficientes de escurrimientos; por su parte, en las cuencas de la zona de Metán se estimaron los mayores valores (y esto se debe principalmente al mayor régimen de precipitación en la zona, donde el uso de suelo es en su mayoría para cultivos).

Asimismo, otro parámetro muy útil para analizar es la relación entre el caudal de diseño asociado a un tiempo de retorno dado y la raíz del área de la cuenca. Según las investigaciones realizadas por Asquith y Thompson (2008), en cuencas pobremente aforadas, los caudales de proyecto pueden ser estimados por transposición si se cuenta una cuenca homogénea cercana con caudales de diseño calculados. Este método dice que la relación entre los caudales y la raíz del área de la cuenca es constante en cuencas homogéneas. En este sentido, a continuación se comparan los caudales asociados a 2 y a 100 años de tiempo de retorno con la raíz del área de las cuencas de estudio (Figura 19).

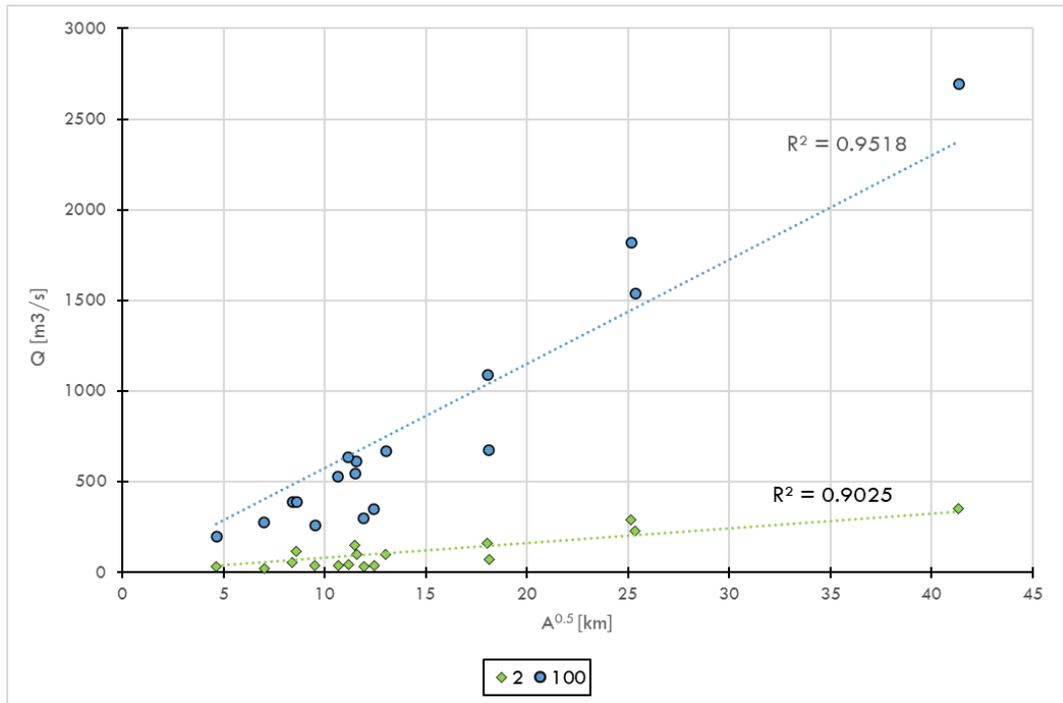


Figura 19. Relación entre los caudales asociados a 2 y 100 años de recurrencia y la raíz del área de las cuencas de estudio.

Al analizar los datos de la última figura, se observa que presentan un muy buen ajuste. A futuro, esta base de datos puede ser de sumo interés para contrastar y validar caudales de proyecto en cuencas aledañas y homogéneas.

5. Conclusiones

En este trabajo se estimaron los caudales de diseño asociados a diferentes recurrencias en diferentes cuencas y sitios de interés de la provincia de Salta, lo cual resulta fundamental para lograr un mejor diseño de infraestructura hídrica en toda la zona de estudio.

La estimación de caudales de proyecto para cuencas de interés de la provincia de Salta constituye una innovación sin precedentes para este territorio, y puede ser utilizada para diseño hidrológico y evaluación de severidad de eventos extremos de precipitación.

La disponibilidad de datos de caudales extremos de calidad y actualizados es fundamental para el manejo hidrológico, especialmente en áreas donde se asientan poblaciones de alta vulnerabili-

dad; ya que permite desarrollar las acciones necesarias para mitigar el impacto de las amenazas hidrológicas por medio de una estimación confiable.

La metodología de diseño hidrológico aplicada está homogeneizada en toda la Argentina, de modo que tanto la determinación de la lluvia de diseño como la modelación hidrológica para la determinación de los hidrogramas de diseño se realizan siguiendo un método validado y estandarizado por especialistas de nuestro país.

Se recomienda seguir trabajando en estudios futuros con el fin de incorporar nueva información de provincias vecinas que permita una mejor caracterización bajo las condiciones de los límites. Los caudales de proyecto estimados deben validarse y actualizarse periódicamente (se recomienda con un período de cinco años o cada vez que ocurra una crecida significativa en las cuencas de estudio).

Con el trabajo realizado, se deja una completa base de datos de caudales de diseño para diversos organismos de la provincia, lo cual puede resultar en información de sumo interés para revisores de los proyectos hídricos que se realicen. Esta base de datos es muy importante, ya que permitirá no solo verificar las obras existentes, sino también contar con información precisa para contrastar o dimensionar cualquier medida estructural o no estructural para mitigar el riesgo ante una amenaza hídrica. Si no se cuenta con caudales de diseño (y por ende, hidrogramas) adecuadamente estimados, las futuras obras o medidas proyectadas seguramente estarán mal diseñadas, ocasionando problemas futuros de gran magnitud.

Por último, la información que se ha presentado no pretende ser un reemplazo de las técnicas clásicas de análisis y del procesamiento hidrológico, sino un valor de referencia a nivel regional.

Referencias

- Asquith y Thompson (2008). Alternative regression equations for estimatrion of anual peak streamflow frequency for undeveloped watersheds in Texas using PRESS Minimization. USGS.
- Baraquet, M. M. (2018). Efectos de la variabilidad climática en la predicción de lluvias para diseño en la provincia de Córdoba. [Tesis de Maestría] FCEFYN, UNC.
- Caamaño, G.; Dasso, C. (2003). Lluvias de diseño. Conceptos, técnicas y experiencias. UNIVERSITAS, Editorial Científica Universitaria.
- Catalini, C. G.; Caamaño N.; García C. M. (2002). Efectos fisiográficos y climáticos sobre las curvas de reducción areal de lluvias de diseño. [Trabajo en CDROM]. XIX Congreso Nacional del Agua, CPCNA. Villa Carlos Paz, Argentina.
- Catalini, C. G.; Guillén, N. F.; García, C. M.; Bazzano, F. y Baraquet, M. M. (2021). Web mapping of extreme daily rainfall data in central and northern Argentina. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(7), 05021013.
- Cleveland, T. G.; García, A.; He, X.; Fang, X.; and Thompson, D. B. (2012). Comparison of physical characteristics for selected small watersheds in Texas as determined by automated and manual methods. Proc., Texas ASCE Section Fall Meeting, El Paso, Tex.

- Guillén, Nicolás Federico (2019). Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LS-PIV. [Tesis doctoral]. FCEFYN, UNC.
- Guillén, N. F.; García, C. M.; Catalini, C. G. y Botelli, M. C. (2018, octubre). Estimación de láminas de lluvias máximas diarias y sus parámetros estadísticos en Argentina. VI Taller sobre Eventos Hidrometeorológicos Extremos, Mendoza, Argentina.
- Guillén, N. F.; Botelli, M. C.; García, C. M. y Flores, K. (2016). Estimación de la relación IDT en Salta capital. 5.º Taller sobre Diseño Hidrológico, Salta.
- Ilvento, Botelli y Guillén (2010). Proyecto Parque Urbano Bicentenario. Secretaría de Financiamiento Internacional. Provincia de Salta.
- Roussel M.C., Thompson D.B., Fang X., Cleveland T.G., Garcia C.A. (2005). TimeParameter Estimation For Applicable Texas Watersheds. Research Report 0-4696-2. Lamar University.
- Sheridan, Joseph M. et al. (2002). Peak Rate Factors for Flatland Watersheds. Applied Engineering in Agriculture (18)65-72.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2000). HEC-HMS Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual, CPD-74B. Hydrologic Engineering Center.
- World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future, From One Earth to One World.
- World Meteorological Organization (1972). Hydrological Sciences Bulletin, 17(2),140143.

Myriam Cecilia Botelli

Perfil académico y profesional: Especialista Ingeniera Hidráulica, egresada de la Universidad Nacional de Salta (U.N.Sa). Especialista en Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión. Encargada del Gabinete de Hidráulica e Instalaciones Sanitarias de la UCASAL. Docente de las cátedras de Hidrología, y de Hidráulica Aplicada en la carrera de Ingeniería Civil de la UCASAL. Investiga sobre temas relacionados al riesgo hídrico.

Correo electrónico: cbotelli@ucasal.edu.ar

Nicolás Guillén

Perfil académico y profesional: Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Magíster en Ciencias de la Ingeniería (mención en Recursos Hídricos). Ingeniero Civil, egresado de la Universidad Nacional de Córdoba. Investiga temas de hidrología e hidráulica. Profesor visitante en el Water Science Center del estado de Illinois (United States Geological Survey, Office of Surface Water, Estados Unidos). Asesor del secretario de Recursos Hídricos y coordinador técnico del Plan Integral de Manejo de Embalses en el Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba.

Correo electrónico: nfguillen@hotmail.com

Matías Eder

Perfil académico y profesional: Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Magíster en Ciencias de la Ingeniería (mención en Recursos Hídricos). Ingeniero civil, egresado de la Universidad Nacional de Córdoba. Su campo de investigación se centra en la hidrología, la hidráulica y la hidráulica fluvial. Profesor adjunto con dedicación simple en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y profesor de carreras de posgrado en la misma universidad.

Correo electrónico: matiaseder2@gmail.com