TRABAJO FINAL DE CARRERA

Transformación del territorio e influencia en los Servicios Hidrológicos Ecosistémicos en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Tandil.

Modalidad: Investigación en cualquiera de los campos de las Ciencias Agrarias y Forestales.

Área: Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Alumna: Camila Belén Anselmino

Legajo: 27544/4

DNI: 38.560.435

Mail: camilabanselmino@gmail.com

Directora: Dra. Fernanda Julia Gaspari.

Co-Directora: Mg. Sc. Ing. Lucía de Antueno.

Fecha de entrega: 03/02/2023

ÍNDICE

RESUMEN 2

1. INTRODUCCIÓN 3

2. OBJETIVO GENERAL 4

2.1 Objetivos específicos 4

3. MATERIALES Y MÉTODOS 5

3.1 Caracterización del área de estudio 5

3.2 Caracterización morfométrica 6

3.3 Evaluación del cambio del uso del suelo actual (a) 8

3.4 Realización de encuestas 8

3.5 Planteo geoespacial de escenarios futuros (2020-2050) 8

3.6 Cuantificación de los elementos del ciclo hidrológico 9

3.7 Zonificación de la CAAN identificando el comportamiento hidrológico superficial, en los escenarios estudiados 10

3.8 Modelización hidrológica del estado actual (2020) (a) y futuro (2050) (b, c), a través del programa HEC-HMS 10

4. RESULTADOS 12

4.1 Caracterización del área de estudio 12

4.2 Caracterización morfométrica 18

4.3 Evaluación del cambio del uso del suelo actual (a) 23

4.4 Encuestas 25

4.5 Planteo de escenarios 26

4.6 Cuantificación de los elementos del comportamiento hidrológico 28

4.7 Zonificación de la CAAN identificando el comportamiento hidrológico superficial, en los escenarios estudiados 31

4.8 Modelización hidrológica 36

5. DISCUSIÓN 40

6. CONCLUSIONES 42

7. AGRADECIMIENTOS 43

8. BIBLIOGRAFÍA 43

ANEXO I 46

RESUMEN

La Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú es considerada un área experimental, debido a que desde la década de 1980 ha manifestado cambios en el uso del suelo por las transformaciones en la estructura productiva regional, derivadas de la introducción de tecnología y de la adquisición de capacidades técnicas de los productores agropecuarios. Esta transformación incide en la dinámica hídrica superficial (Senisterra et al., 2014). Ante esta situación se plantea como objetivo del trabajo final de carrera, analizar su transformación territorial e influencia en los servicios hidrológicos ecosistémicos. La caracterización de los parámetros morfométricos, la zonificación de la vegetación y uso del suelo, el análisis geoespacial del clima e hidrología se realizó mediante análisis bibliográfico y datos georreferenciados procesados con SIG y Google Earth®. La modelización hidrológica se efectuó con el modelo HEC-HMS. Posteriormente, se plantearon estrategias de manejo de cuencas para 2050, establecidas a partir de los resultados alcanzados en la evaluación y estimación del cambio del uso del suelo desde 1990 hasta la actualidad, y se definió su influencia en la dinámica hídrica superficial. La modelización hidrológica y procesamiento con SIG expone el efecto de dichas acciones de manejo sobre el territorio y los servicios hidrológicos ecosistémicos, en el futuro.

1. INTRODUCCIÓN

Para entender la importancia de estudiar las cuencas hidrográficas, se debe presentar una definición que las caracterice. Gaspari et al., (2013) las definen como una unidad morfológica integral en un territorio, donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural, delimitada por la existencia de la divisoria de aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales. Además, los autores mencionan que el manejo integral de las cuencas es un conjunto integrado de acciones en la búsqueda del desarrollo sostenible, para minimizar los efectos ambientales negativos sobre el recurso hídrico que la población utiliza.

Las cuencas no pueden estudiarse como sistemas aislados, Gaspari et al., (2013) mencionan que hay que tener una visión holística y sistemática de la relación sociedad – naturaleza, en donde el territorio no solamente es un entorno físico que enmarca la vida humana, animal y vegetal y donde están contenidos los recursos naturales, sino que comprende también la actividad del hombre, permitiendo a este, planificar sus actividades socio-económicas y productivas. Además, son generadoras de servicios hidrológicos ecosistémicos (SHE).

Si bien existen varias definiciones de los SHE, para este trabajo se optó por aquella relacionada a todos los servicios generados por un ecosistema (cuenca hidrográfica) que inciden en la regulación del ciclo hidrológico y son aprovechados por la sociedad para satisfacer diferentes necesidades (Mokondoko Delgadillo, 2018). Dentro de ese ciclo ocurren dos fenómenos: infiltración y escorrentía. El primero de ellos consiste en un movimiento vertical del agua y el otro en un movimiento horizontal, en el suelo. Ambos son objeto de estudio en este trabajo.

Por lo mencionado anteriormente, se destacan tres conceptos:

1. Las cuencas son sistemas no aislados, por donde se mueve el agua.
2. En las cuencas habitan personas que hacen uso de sus servicios hidrológicos ecosistémicos, del suelo y la vegetación, para satisfacer diferentes intereses y, básicamente, vivir.
3. Cualquier acción antrópica sin una planificación y análisis previo, puede causar una alteración de los recursos y servicios que la cuenca brinda.

Estos conceptos deben integrarse a la historia de cada sitio y, si es posible en su entorno de las cuencas hidrográficas, es decir, conocer para un período

determinado los registros climáticos y pluviográficos, si hubo cambios en el uso del suelo y su respuesta, entre otros.

En cuanto al complejo suelo-vegetación, los estudios sobre los procesos dinámicos del mismo son importantes y necesarios, porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Senisterra et al., 2014; Van Lynden & Oldeman, 1997). Es sabido que cualquier cambio de uso que se realice sobre las cuencas, ya sea, por ejemplo, deforestar para la implantación de cultivos, o el sobrepastoreo de pastizal natural, entre otros, afecta directamente en los servicios hidrológicos. Senisterra et al., (2014) mencionan que los cambios de cobertura y usos del suelo están relacionados directamente en la generación de escurrimiento superficial y a su vez, tienen influencia directa en la erosión de los suelos, aumentando la fragilidad de los sistemas ambientales e incidiendo sobre la sustentabilidad.

La sustentabilidad de sistemas biológicos es entendida como el hecho de mantenerlos productivos con el transcurso del tiempo. También se refiere al equilibrio de los recursos de su entorno, y lograr que el agua, no solo sea aprovechada por generaciones actuales, sino también por las futuras. Es por ello que debe tenerse en cuenta siempre su manejo sustentable. Por lo mencionado anteriormente, se considera importante analizar la transformación del territorio, y cómo influye sobre los servicios hidrológicos ecosistémicos de las cuencas hidrográficas. Estas transformaciones se detectan generalmente en el mediano y/o largo plazo y, por ello, en ciertas ocasiones, estudiar los impactos negativos o positivos de ciertas estrategias de manejo es una forma de dar a conocer su incidencia.

2. OBJETIVO GENERAL

Analizar la transformación territorial de la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú y su influencia en los servicios hidrológicos ecosistémicos.

2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar el ambiente identificando los suelos y el estado de la vegetación y uso del suelo.
- Cuantificar los elementos del comportamiento hidrológico (parámetros morfométricos, clima, hidrología, entre otros).

- Estimar el cambio del uso del suelo a 30 años y su efecto sobre los servicios hidrológicos ecosistémicos.
- Realizar la modelización hidrológica para el estado actual de la cuenca (2020) y para un escenario futuro (2050).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú (CAAN), ubicada al sudeste de la provincia de Buenos Aires, entre los partidos de Tandil, Lobería y Balcarce (Figura 1). La misma es considerada un área experimental, debido a que desde la década de 1980 ha manifestado cambios en el uso del suelo, producto de la introducción de tecnología y de la adquisición de capacidades técnicas de los productores agropecuarios (Senisterra et al., 2013).

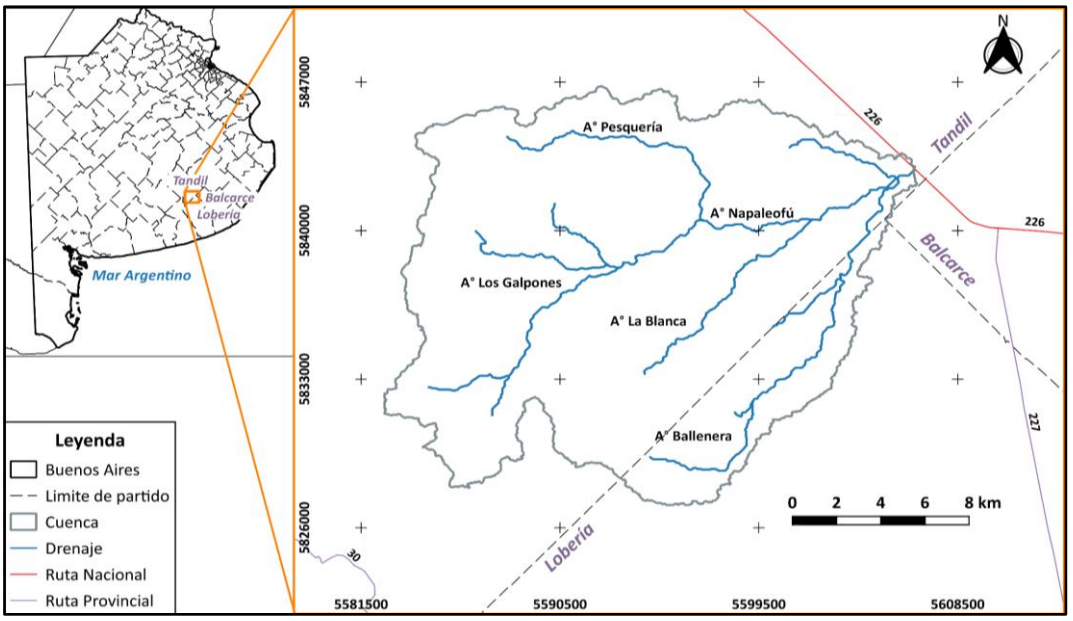

Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la provincia de Buenos Aires. Elaboración propia.

Gracias a la bibliografía antecedente, se realizó una descripción del uso de suelo de la CAAN para el período 1990-2020, tomando como referencia los años 1986, 1996, 2011 y 2016. Senisterra et al., (2014) realizaron una interpretación de la información digital y una corroboración a campo de los distintos usos para los tres primeros años mencionados, utilizando imágenes satelitales Landsat-5, cartografía antecedente del

INTA y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además calcularon la tasa de cambio del uso del suelo mediante la ecuación $P = (100 / t_2\text{-}t_1) * \ln (S_2\text{-}S_1)$ donde S_1 y S_2 (km^2) corresponden a la superficie en el tiempo t_1 y t_2 (expresado en años, respectivamente) y P es el porcentaje de cambio por año. En 2016, Rodríguez Vagaría y Gaspari, realizaron un relevamiento a campo de las coberturas presentes y mediante SIG y Google Earth® generaron un mapa de usos, que fue actualizado con este Trabajo Final de Carrera (TFC), al año 2022. La descripción de suelos de la cuenca se realizó a partir de la información provista por el INTA, en formato vectorial y carta papel, que especifican las unidades cartográficas (UC) con el tipo de textura del horizonte superficial, entre otras propiedades. A partir de esa base, se realizó el mapa de los grupos hidrológicos (GH) (Gonzalez Fuentes et al., 2022). El GH indica el tipo de textura del suelo, según cuatro clases: A (arenoso; arenoso-franco; franco-arenoso); B (franco-limoso; franco; limoso); C (franco-arcillo-arenoso; franco-arcillo-limoso; franco-arcilloso); D (arcillo-arenoso; arcillo-limoso; arcilloso). La caracterización climática se tomó de Senisterra et al., (2014) que realizaron un trabajo con los datos obtenidos de la estación Tandil Aeropuerto. Por otro lado, se trabajó con información generada a partir de datos medidos por la Estación Meteorológica INTA Balcarce. En este último caso, se consideró un período de 50 años (1970-2020) con datos de precipitación y temperatura diaria, para calcular la precipitación media mensual, precipitación anual y la temperatura media mensual en el período considerado.

3.2 Caracterización morfométrica

Se delimitó la cuenca, se definió el drenaje y se determinaron las subcuencas (Anselmino et al., 2022). Posteriormente, con ayuda del software SIG QGis 3.26® se cuantificaron los siguientes parámetros morfométricos:

- **Forma:** perímetro (P) en km, longitud axial (La) en km, área (A) en km², ancho promedio (Ap) en km, factor de forma (IF) y coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), estos últimos, adimensionales. La longitud axial se midió respecto al punto más lejos hasta la desembocadura en cada unidad hidrológica y depende de su forma. El IF es la relación entre el Ap y La; cuando su valor es 1, se trata de una cuenca redondeada con colectores cortos que favorecen crecidas de mayor magnitud. El Kc es la relación entre el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área

equivalente al de la cuenca y se calcula como Kc = P / 2 $\sqrt{(\pi A)}$. Cuando su valor es 1 representa una cuenca redonda existiendo una mayor peligrosidad a las crecidas; 1,25, oval redonda; 1,50 oblonga; e igual o mayor a 1,75 cuenca rectangular-oblonga. Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca

- **Relieve:** se determinó la curva hipsométrica (CH), la pendiente media de la cuenca (PM) y el coeficiente de rugosidad (Ra). Para cuantificar estos parámetros, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE), con resolución espacial de 30 m que se descargó del Instituto Geográfico Nacional (https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa); el mismo contiene información sobre la altura del terreno respecto al nivel medio del mar. El primer parámetro mencionado representa la distribución del área de acuerdo a su elevación y se obtuvo a partir del procesamiento del MDE, mapa de cuenca y subcuencas, en la herramienta “Curvas Hipsométricas” del QGis. Para la pendiente media se generó un mapa de pendientes y se lo procesó mediante la herramienta “Estadística de capa ráster” en dicho software; que relaciona directamente al proceso de degradación que está sometida una cuenca. El Ra es la relación entre el desnivel de la cuenca y su densidad de drenaje según Farhan et al., (2015). Se define por cuatro intervalos: menor a 0,1 (bajo), 0,1-0,4 (leve), 0,4-0,7 (moderado), mayor que 0,7 (alto).
- **Drenaje:** densidad de drenaje (Dd), longitud del cauce principal (Ln) en km, pendiente media del cauce (%) (J) y tiempo de concentración (Tc) en minutos. La Dd es la relación entre la suma de la longitud de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca y la superficie total de la misma, considerando la diferencia de conceptos entre longitud de sólo el cauce principal y longitud de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca). La J es la relación entre el desnivel del cauce principal y su longitud, y el Tc es el tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca. Con el objetivo de llegar a un valor lo más real posible, dicho tiempo se calculó a partir del promedio de cinco ecuaciones que, según el autor, toman distintas variables. Las ecuaciones son las de Bransby-Williams, Kirpich, Témez, Valencia y Zuluaga, y Pilgrim y McDermott (Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2010).

Se realizó una descripción conceptual de la hidrología superficial. Primero se definieron y digitalizaron por interpretación de imágenes satelitales a los cursos

permanentes y temporarios. Posteriormente, se identificó el número de orden del drenaje según el criterio de Schumm que asigna el primer orden a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determina o da origen a otro de orden inmediatamente superior, y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor, y así sucesivamente, hasta llegar al orden a la salida de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca (Gaspari et al., 2013).

3.3 Evaluación del cambio del uso del suelo actual (a)

Se tomaron mapas de uso del suelo como referencia en los años 1986 y 2016, generados de Senisterra et al., (2014) y Rodríguez Vagaría et al., (2015) respectivamente, los cuales fueron adaptados con corroboración geoespacial con puntos de control, mediante Google Earth®. Posteriormente, se calculó la tasa de cambio con la ecuación utilizada por Senisterra et al., (2014).

3.4 Realización de encuestas

Las encuestas fueron virtuales y dirigidas a actores locales, que incluyen productores/as que viven y/o trabajan allí e investigadores universitarios de la FCAyF - UNLP y de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN). Para la protección de identidad de los encuestados, no se solicitó información personal, es decir que las encuestas fueron anónimas.

El objetivo es conocer sus opiniones en relación con el cambio de uso del suelo en los últimos 30 años. Las mismas se realizaron mediante un formulario de Google; se plantearon diez preguntas con fotografías demostrativas. La idea fue recolectar información en función de sus experiencias en la zona y luego agrupar dichas respuestas para corroborar el uso del suelo en la cuenca en estudio.

3.5 Planteo geoespacial de escenarios futuros (2020-2050)

El planteo de escenario permitió conocer y evaluar el comportamiento hidrológico futuro de la cuenca respecto al actual (a). Esa información asiste a la toma de decisiones con carácter sostenible sobre la gestión de los recursos hídricos y, además, servirá de base para futuras investigaciones. Se plantearon dos escenarios hipotéticos futuros, uno aplicando estrategias de conservación de suelos (b) y otro donde no se

implementó ninguna medida (c). Las estrategias de conservación planteadas fueron labranza en curvas de nivel y franjas en contorno, las cuales disminuyen la erosión y el arrastre de sedimentos que provoca una tormenta cuando el agua cae al suelo en un terreno con pendiente, debido a que las mismas se hacen en sentido perpendicular a la pendiente del terreno. El primer caso se trata de líneas que unen puntos de igual altura en el terreno. El cultivo en franjas es un tipo de práctica agronómica en la que los cultivos ordinarios se plantan y/o crecen en forma de franjas de cultivos densos y cultivos menos protectores en curvas a nivel para servir de barreras vegetativas contra la erosión provocada por el viento y el agua. Dicho planteo geoespacial se realizó con QGis, procesando y modificando el mapa de uso de suelo actual como base, con la información vectorial de vegetación correspondiente al año 2016 y actualizada en el 2022 (año que se toma como referencia para inicio del período analizado).

3.6 Cuantificación de los elementos del ciclo hidrológico

Es sabido que, en el ciclo hidrológico, la entrada principal de agua es mediante la precipitación, y la salida por evaporación-evapotranspiración hacia la atmósfera, infiltración-percolación hacia el suelo y escurrimiento, que es un movimiento casi continuo del agua en la superficie del suelo. La cuantificación de los elementos infiltración y escorrentía, se realizó con el método del Número de Curva (NC) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service - S.C.S, 1972). Requiere información referida a la cobertura vegetal y/o uso de suelo, textura edáfica (GH) y condición de humedad antecedente (CHA) del suelo, después de 5-10 días de ocurrida una tormenta. Existen tres CHA: I (seca: si la tormenta fue menor a 12,5 mm), II (media: si fue entre 12,7 mm - 38,1 mm) y III (húmeda: si fue mayor a 38,1 mm) (Gaspari et al., 2013; Muñoz Cárpena & Ritter Rodríguez, 2005;). Como se mencionó en la caracterización del área de estudio, la textura hace referencia al porcentaje de arena, limo y arcilla la cual no es modificada a lo largo del desarrollo del presente estudio, mientras que, la cobertura vegetal varió en función del escenario espacio-temporal planteado. Con la herramienta de geoproceso en QGis se interceptó, en cada uno de los tres escenarios, el mapa de cobertura con el de GH. Allí se obtuvieron tres mapas con información de cada complejo suelo-vegetación y con ayuda de bibliografía (ver Anexo I, Tabla I.1) se

asignaron valores de NC, según la CHA II. Finalmente, para organizar mejor los resultados, se establecieron rangos de NC para toda la cuenca.

3.7 Zonificación de la CAAN identificando el comportamiento hidrológico superficial, en los escenarios estudiados

Para cumplir con este objetivo, se recurrió a una herramienta de procesamiento automático geoespacial denominada GeoQ, ubicada en el repositorio oficial de complementos de QGis®. La misma permitió calcular la escorrentía a partir de la combinación del grupo hidrológico del suelo según clase textural (GH), tipos de cobertura y/o usos de suelo, la condición de humedad antecedente, determinada por un valor de tormenta definido para el área de estudio. El modelo GeoQ utiliza el Método de Número de Curva (NC) para calcular la transformación lluvia-escorrentía siendo que del total que precipita, una parte se evapotranspira, otra escurre por la superficie, y otra infiltra en el terreno. Por último, se obtienen tres coeficientes porcentuales correspondientes a Escorrentía (CE), Abstracciones Iniciales (CIo) e Infiltración (CF). Procesa capas vectoriales con información sobre GH y tipos de cobertura y/o usos de suelo, para lo cual se le asignó un código, Cod_Sue y Cod_Veg respectivamente, que mediante un procedimiento de adición genera el Cod_NC, para definir el Número de Curva correspondiente (Montealegre Medina & Gaspari, 2020). Los datos de precipitación fueron tomados de una Estación Meteorológica propia, ubicada en la Estancia “La Esperanza”, en el interior de la cuenca, específicamente en el año 2013. Se consideraron tres tormentas de distinta intensidad y duración:

1. 40,2 mm acumulados en 10 hs.
2. 74,4 mm acumulados en 3 hs.
3. 149,4 mm acumulados en 5 hs.

Se corroboró que los NC determinados en el ítem anterior de cuantificación de elementos del ciclo hidrológico, sean los mismos que los del GeoQ para que el comportamiento hidrológico no varíe y que esto sólo dependa del escenario analizado.

3.8 Modelización hidrológica del estado actual (2020) (a) y futuro (2050) (b, c), a través del programa HEC-HMS

La modelización hidrológica se realizó con el software HEC-HMS (versión 4.2.1). Para ejecutar la simulación hidrológica se indicó el modelo de cuenca, el modelo

meteorológico y las especificaciones de control. El primero contiene información sobre las subcuencas, tránsitos o ríos, conexiones y salida o desembocadura de la cuenca. El segundo consiste en datos meteorológicos e información requerida para procesarlos y, por último, las especificaciones de control tienen que ver con el tiempo que tarda en correr la simulación. Para cada subcuenca se determinó su área, conexión con el resto de la cuenca, el tiempo de retraso en minutos, calculado a partir del Tc como Tlag = 0,6 x Tc y, por último, el Número de Curva ponderado en función de la superficie de cada una. En cuanto a los tránsitos, se definió el elemento hacia el cual fluye el hidrograma de salida, largo total (m), pendiente (m/m) y los números de Manning del margen derecho, izquierdo y lecho (ver Anexo I, Tabla I.5). Además, se consideraron las secciones transversales (x;y) con el Método Muskingum-Cunge Eight Point, el cual define la geometría del canal utilizando ocho puntos de una sección transversal. Estos puntos se toman como cota sobre el nivel del mar (msnm). Se realizaron tres modelaciones lluvia-escorrentía con los valores de las tormentas mencionadas en el ítem anterior. En las especificaciones de control se detalló el día y horario de inicio de la simulación a partir del cual comenzaron a realizarse los cálculos, y el día y horario de finalización, y en los tres casos duraron 24 hs.

- Control 1: inició el 5 de febrero a la 01:00 hs y finalizó el 6 de febrero a la 01:00 hs.
- Control 2: inició el 2 de febrero a la 01:00 hs y finalizó el 3 de febrero a la 01:00 hs.
- Control 3: inició el 7 de marzo a la 01:00 hs y finalizó el 8 de marzo a la 01:00 hs

En la Figura 2 se observa, de manera resumida, los datos que necesita el software para realizar la simulación.

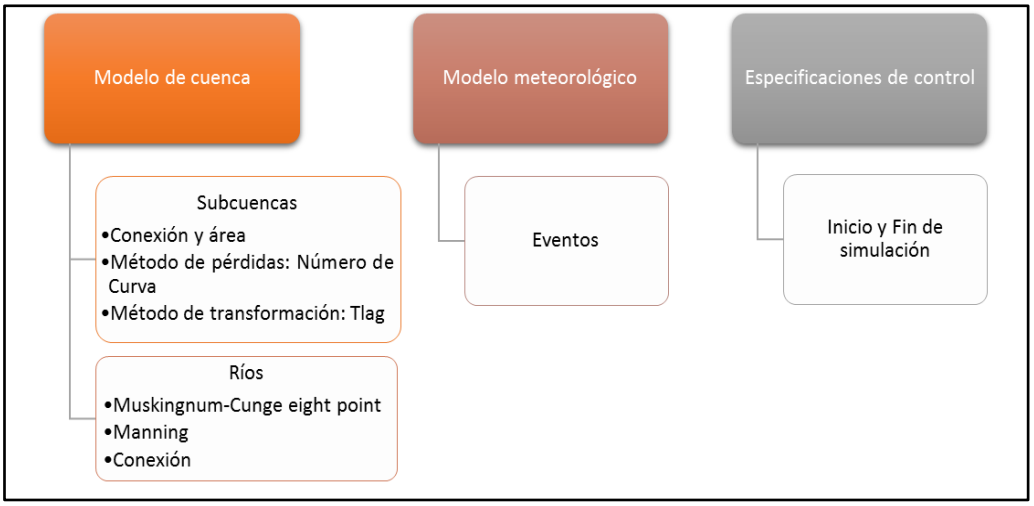

Figura 2: Esquema de modelización del HEC-HMS. Fuente: Anselmino et al., 2022.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización del área de estudio

La cuenca abarca una superficie de 331 km^2. En el año 2016 se identificaron seis clases de coberturas (Figura 3), y las mismas fueron actualizadas al 2022, con una nueva corroboración a campo. El 89,7% de la superficie corresponde a cultivos con suelos con buena infiltración y dentro de este uso hay tres tipos:

- Cultivos con Riego: ocupando una superficie de 0,8%. El sistema de riego es mediante pívots (en el mapa se observan círculos rojos) y realizan labranza en curvas de nivel;
- Cultivos densos: ocupando 73,5% de la superficie, que si bien realizan labranza en curvas de nivel, cabe aclarar que no en toda la superficie;
- Cultivos no alineados: ocupando 15,4% de la superficie, donde se realizan labranza en curvas de nivel.

Además, se distribuyen zonas con 1,5% de superficie destinada a Montes con pastos (también con buena infiltración), 1,1% Vegas de ríos (o llanura de inundación) y 7,6% con presencia de Suelos pedregosos con una condición de infiltración pobre.

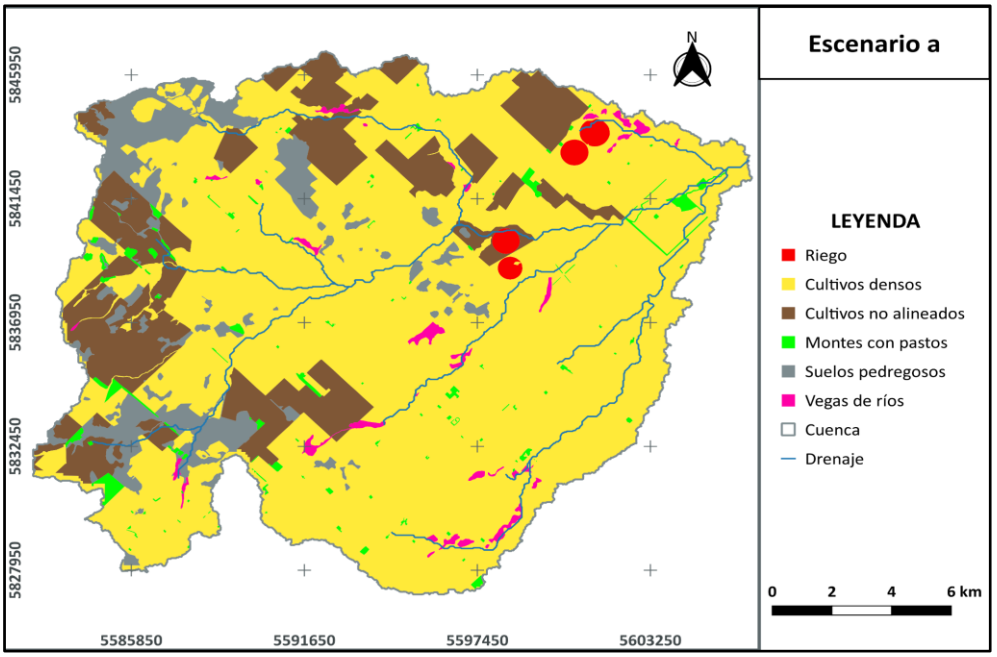

Figura 3: Coberturas vegetales en el año 2016, actualizadas al 2022. Fuente: datos provistos por la Cátedra Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Senisterra et al., (2014) realizaron un relevamiento en distintos puntos de la cuenca, y determinaron 5 categorías de uso del suelo considerando la clasificación del INTA (1986): agrícola (A), ganadero-agrícola (GA), agrícola-ganadero (AG), ganadero (G3b) y monte (M).

- El uso A se realiza en suelos profundos, medianamente o bien provistos de materia orgánica, neutros, bien drenados, bien estructurados, con buena disponibilidad de nutrientes minerales, desarrollados en terrenos relativamente altos y de pendientes suaves y con adecuada disponibilidad de agua. En la loma se siembra soja y en los bajos maíz; con modalidad de siembra directa y cultivos en fajas y terrazas.
- El uso GA se realiza en tierras con severas limitaciones que restringen la elección de cultivos y/o requieren la aplicación de prácticas de conservación para mantener su productividad. La ganadería centralmente es bovina de cría e invernada, con participación marginal de la actividad ovina.
- El uso AG se realiza principalmente en tierras con moderadas limitaciones edáficas y/o climáticas, que restringen la elección de los cultivos y/o requieren la aplicación de prácticas de conservación, del suelo y el agua, para mantener su nivel productivo. Las unidades de este sistema destinan alrededor del 60% de su tierra a la agricultura en la que se destacan los cultivos de trigo, girasol y

maíz, al tiempo que en determinadas áreas, se cultiva papa. El sector ganadero se compone de vacunos y ovinos.

- El uso G3b se lleva a cabo en tierras con importantes limitaciones de suelos y que generalmente no permiten la implantación de pasturas cultivadas, salvo casos excepcionales, de sitios donde es posible el mejoramiento de la vegetación natural mediante intersiembras de especies adaptadas a las condiciones desfavorables. El relieve quebrado, la pedregosidad, la baja retención de humedad, la salinidad, la escasa profundidad efectiva, la hídrica, son las características que hacen posible la actividad ganadera; la principal producción que se realiza es bovina de cría.
- El uso M se presenta en forma de cortinas y montes para reparo de animales y se encuentran también vegetación forestal en las márgenes de los cursos de agua, compuesta principalmente por sauce criollo.

Como se observa en la Figura 4, la tendencia espacio temporal de uso del suelo fue disminuir la superficie ganadero-agrícola y ganadero, mientras aumenta el área agrícola-ganadero. Además, recién en el 2011 se incorporó el uso agrícola. En cuanto al monte, ha manifestado un leve aumento de superficie, estando compuesto principalmente por especies de pino y eucalipto, destinados a reparo para animales y cultivos.

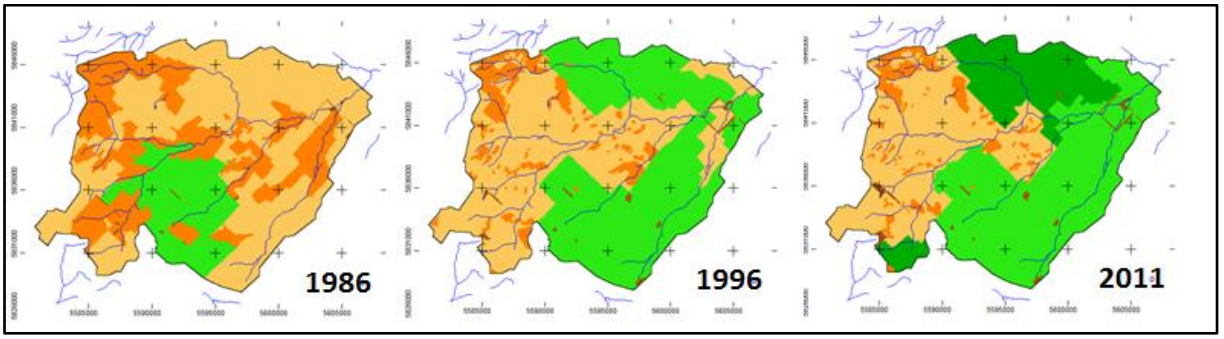

Figura 4: Evolución del cambio del uso del suelo en CAAN. Fuente Senisterra et al., 2014. Adaptación propia. **A; GA; G3b; AG; M.**

Los suelos característicos del área de estudio están representados en un 90% por el orden Molisoles. Presentan un color negro o pardo debido a la incorporación sistemática de residuos vegetales y su mezcla con la parte mineral, además, de una estructurar granular o migajosa moderada y fuerte que facilita el movimiento del agua y aire. Estos suelos son utilizados por el hombre para la producción de alimentos

(Senisterra et al., 2014). En la Figura 5 se observa el mapa de suelos con las 18 unidades cartográficas (UC) identificadas en el área de estudio.

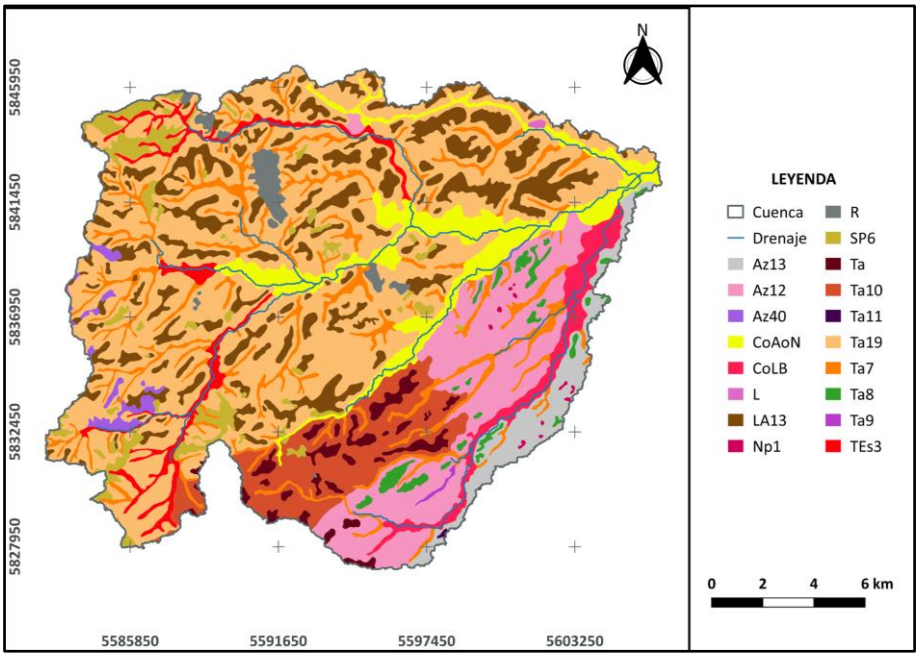

Figura 5: Zonificación de los suelos de CAAN, escala 1:50.000. Adaptado del mapa de suelos del INTA, con actualización 2022.

En la Tabla 1 se especifican las UC con sus respectivas texturas y el GH definido a partir de las mismas.

Tabla 1: Unidades cartográficas presentes en la CAAN con el GH definido en función de la textura. Elaboración propia.

UC	Textura	GH
Az13	Franco arcillosa	C
Az12	Franco arcillosa	C
Az40	Franco arcillosa	C
CoAoN	-	C
CoLB	-	C
L	-	D
LA13	Franco	B
Np1	Franco arcillo limosa	C
R	-	D

UC	Textura	GH
SP6	Franco arcillosa	C
Ta	Franco arcillosa	C
Ta10	Franco arcillosa	C
Ta11	Franco arcillosa	C
Ta19	Franco arcillosa	C
Ta7	Franco arcillosa	C
Ta8	Franco arcillosa	C
Ta9	Franco arcillosa	C
TEs3	Franco arcillo limosa	C

Como se muestra en la Tabla 1, las UC CoAoN y CoLB son indiferenciados, sin embargo, se pudo asignar el GH debido a otras características relacionadas al suelo.

Situación similar sucede con R y L, roca y laguna respectivamente, en donde las características de infiltración se asemejan a las de un suelo D (baja o nula). El resto de la UC se determinaron en dos grupos hidrológicos (B y C).

En la Figura 6 se observa el mapa con la distribución de los grupos hidrológicos determinados en la cuenca, expresando el 83,6% de la superficie que corresponde al grupo C, luego sigue el grupo B con 15% y la menor superficie es D con sólo 1,3%. Por lo tanto, en la cuenca predomina la textura Franco arcillosa, es decir, suelos poco profundos que presentan poca permeabilidad al estar saturados. Además, contienen abundante arcilla y coloides.

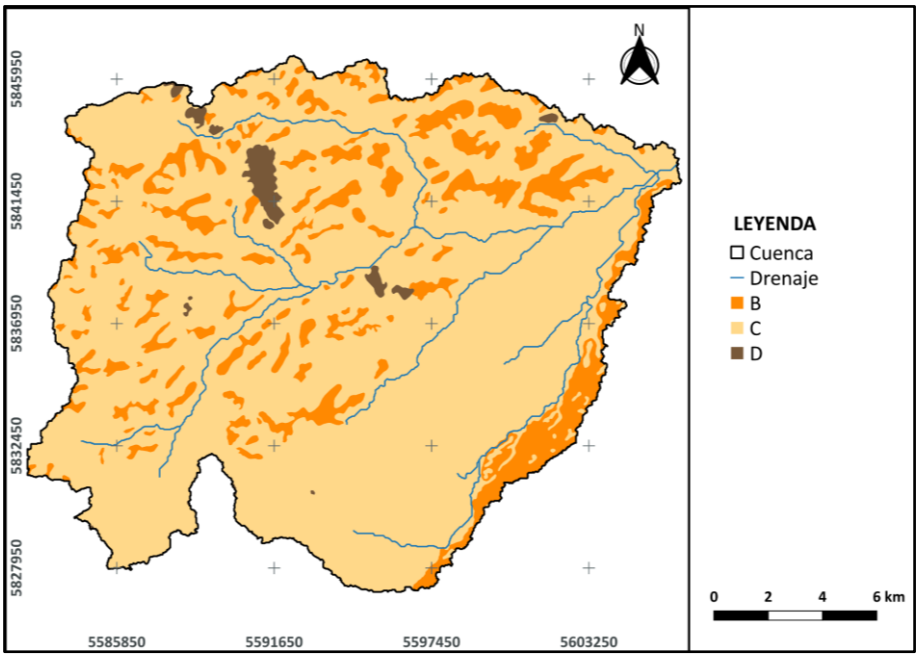

Figura 6: GH identificados en CAAN. Fuente: Gonzalez Fuentes et al., 2022.

La región de Tandilia se ubica dentro del dominio de la dinámica de dos sistemas de circulación atmosférica diferentes. Por un lado, se encuentran los climas fríos y secos característicos de la acción de los vientos provenientes del SO. Por otro lado, se desarrollan los climas húmedos y cálidos que son característicos de la acción de los vientos provenientes del anticiclón del Atlántico sur y que entran a la región por el N y NE. Con menor intensidad aparecen los vientos húmedos y fríos del SE. Los vientos del oeste predominan en invierno, mientras los vientos del norte y noreste son predominantes en verano (Senisterra et al., 2014; Tchilinguirian et al., 2004).

Senisterra et al., (2014) mencionan que, según la clasificación climática de Thornthwaite, se trata de un clima mesotermal subhúmedo-húmedo, con nula o

pequeña deficiencia de agua. Además, estos autores generaron información sobre la distribución de la temperatura y precipitación para el período 1968-2011. La temperatura media anual es de 13,9° C, y la precipitación media anual es de 901 mm. Las máximas precipitaciones se presentaron en picos durante los meses de marzo y de octubre a febrero; asimismo, las precipitaciones tendieron a disminuir en el período estudiado 1968-2011. Por otro lado, la temperatura media anual para el período 1970-2020 fue de 14,2 °C, y la precipitación media anual fue de 908 mm. A partir de los datos obtenidos de la Estación Meteorológica INTA Balcarce, se generó un climograma que permitió visualizar la distribución de la temperatura y precipitación para el período 1970-2020 (Figura 7). Se observa que las máximas precipitaciones se presentaron en los meses de enero y diciembre, con valores de 102 mm y 98 mm respectivamente.

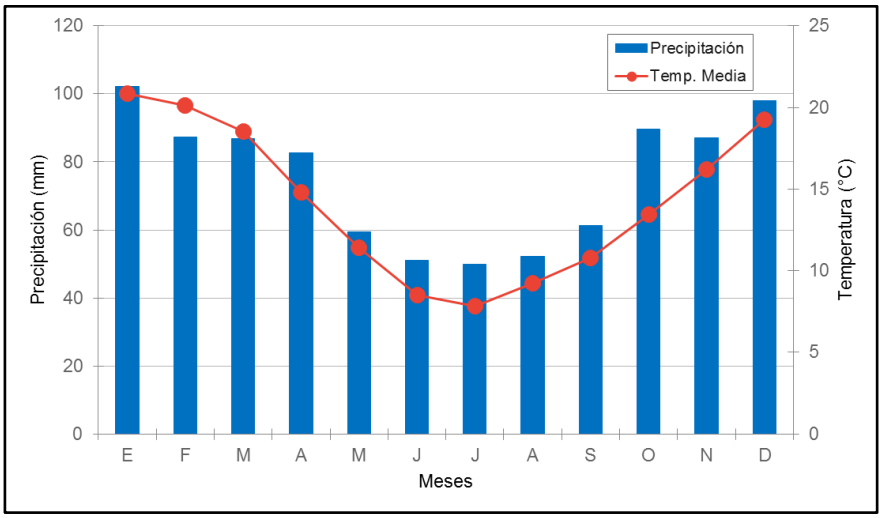

Figura 7: Evolución de la precipitación mensual en el período 1970-2020. Elaboración propia.

Si se observa la evolución de las precipitaciones en el período considerado (Figura 8), se concluye que existe un crecimiento en el tiempo. Aquellas barras que quedan por debajo de la media (considerada como el promedio de tres años), significan que en esos años se produjo sequía.

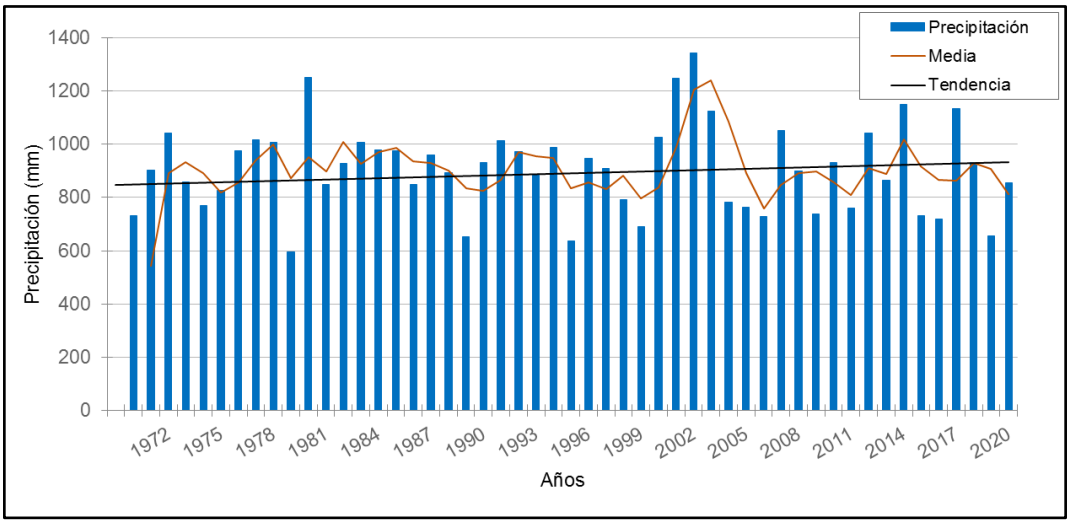

Figura 8: Evolución de la precipitación anual en el período 1970-2020. Elaboración propia.

4.2 Caracterización morfométrica

La CAAN está definida por trece subcuencas y un sistema de drenaje. Cuando ocurre una tormenta, en las partes altas o cabecera, comienza el caudal líquido con el posible arrastre de sedimentos (subcuencas 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10 y 11); luego en la garganta o parte media, los sedimentos son transportados (subcuencas 4, 6, 8 y 12) hacia la desembocadura, que es la parte más baja (subcuenca 13) donde se depositan los sedimentos (Figura 9).

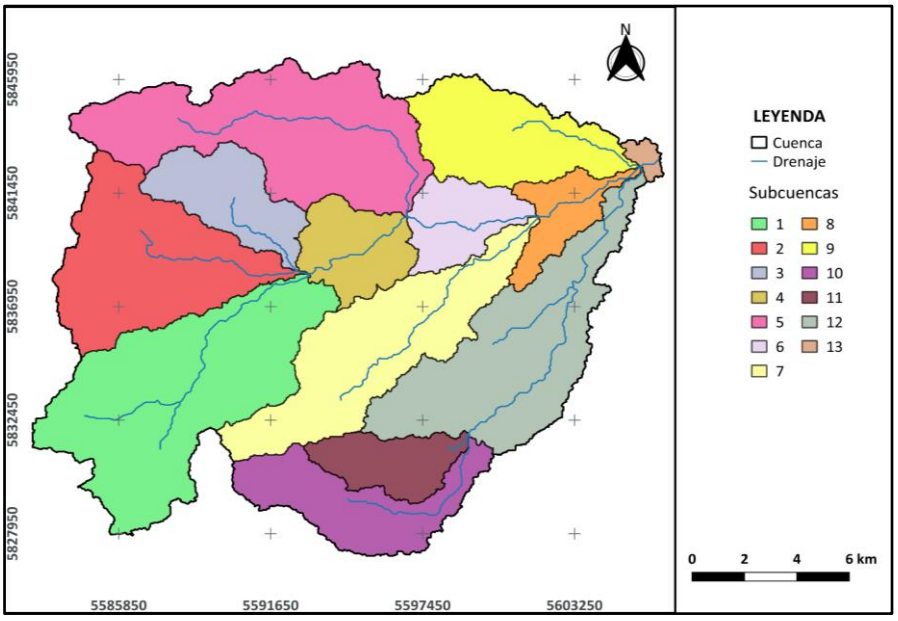

Figura 9: Mapa de subcuencas que conforman a la CAAN. Elaboración propia.

La cuantificación de los elementos del comportamiento hidrológico se hizo sobre la cuenca y para cada subcuenca, como se muestra a continuación.

- **Forma**

En la Tabla 2 se observan los parámetros de forma de la cuenca con sus respectivos símbolos y unidades. Se trata de una cuenca del tipo alargada, con forma rectangular-oblonga, es decir que la peligrosidad a las crecidas es baja y sus colectores son más largos que la totalidad de sus tributarios.

Tabla 2: Parámetros de Forma de la CAAN. Elaboración propia.

Forma	Símbolo	Unidad	Valor
Perímetro	P	km	131,22
Longitud axial	La	km	26,57
Área	A	km²	331
Ancho promedio	Ap	km	12,45
Índice de forma	IF	Adimensional	0,47
Coef. de compacidad de Gravelius	Kc	Adimensional	2,03

La subcuenca más grande es la 1 y la de menor superficie es la 13. Cuando se analiza su forma (Tabla 3), la subcuenca 10 tiene un valor cercano a 1, y si se observa el mapa de subcuencas, se asemeja a un semicírculo, mientras que la subcuenca 7 es la más alargada. Todas tienen un Kc mayor a 1,75 y por lo tanto, son rectangulares-oblongas.

Tabla 3: Parámetros de Forma de las subcuencas. Elaboración propia.

Subcuenca	P (km)	La (km)	A (km²)	Ap (km)	IF	Kc
1	55,36	12,82	56,14	4,38	0,34	2,08
2	42,02	9,82	37,35	3,80	0,39	1,94
3	27,71	6,71	16,08	2,40	0,36	1,95
4	23,24	4,66	13,72	2,94	0,63	1,77
5	54,68	11,88	48,19	4,06	0,34	2,22
6	22,75	4,92	12,06	2,45	0,50	1,85
7	53,07	15,17	37,17	2,45	0,16	2,46
8	26,74	5,09	9,36	1,84	0,36	2,47
9	34,63	9,42	24,33	2,58	0,27	1,98
10	40,73	4,80	20,97	4,37	0,91	2,51
11	22,64	5,17	11,42	2,21	0,43	1,89
12	58,85	13,30	42,56	3,20	0,24	2,54
13	8,09	2,07	1,56	1,84	0,89	1,83

- **Relieve**

La cuenca presenta un relieve con lomadas, con una pendiente media que se encuentra dentro del intervalo 3-12%. En cuanto a su Ra, se la clasifica como rugosidad alta ya que supera el valor de 0,7 (Tabla 4).

Tabla 4: Parámetros de Relieve de CAAN. Elaboración propia.

Relieve	Símbolo	Unidad	Datos de la Cuenca
Pendiente media	PM	%	4,01
Coeficiente de Rugosidad	Ra	Adimensional	0,82

Las subcuencas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 presentan un relieve con lomadas, mientras que las restantes tienen un relieve más suave. En cuanto a la rugosidad, es alta en las subcuencas 1, 2, 5 y 11, moderada en las subcuencas 4 y 7, leve en las subcuencas 3, 9, 10 y 12 y baja en las subcuencas 6, 8 y 13 (Tabla 5).

Tabla 5: Parámetros de Relieve de las subcuencas. Elaboración propia.

Subcuenca	PM (%)	Ra
1	5,40	0,86
2	5,19	0,81
3	5,06	0,37
4	3,60	0,45
5	5,50	0,70
6	2,64	0,09
7	3,35	0,42
8	2,63	0,06
9	2,48	0,27
10	2,90	0,31
11	2,72	0,77
12	2,29	0,17
13	1,75	0,02

En cuanto al relieve, el 100% de la cuenca está por encima de los 140 m.s.n.m. Aproximadamente un 15% de la superficie presenta una variación de 160 m.s.n.m. y es la mayor variación observada, mientras que el 85% restante es de 100 m.s.n.m. En la Figura 10 se muestra la curva hipsométrica y, además, se observa un gráfico

frecuencia de alturas en barras, que indica la altura que aparece con mayor frecuencia, siendo para la cuenca, 190 m.s.n.m.

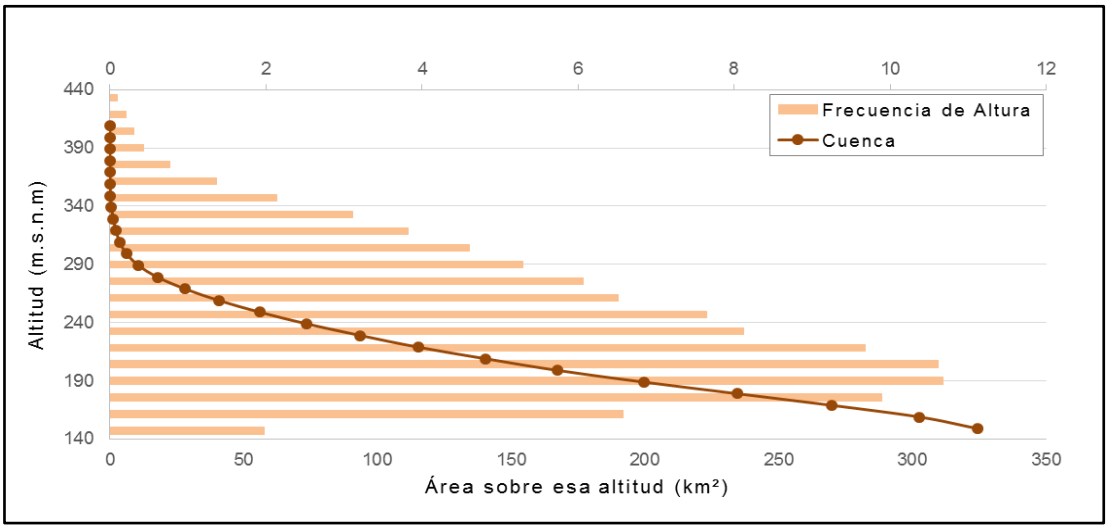

Figura 10: Curva hipsométrica de CAAN (línea naranja) y frecuencia de altura (barras laterales naranjas). Elaboración propia.

Las subcuencas de mayor altitud son la 1, 2 y 5 con toda su superficie sobre los 150 m.s.n.m. Las mismas presentan más del 50 % de la misma por encima de los 220 m.s.n.m. Por el otro lado, las subcuencas 6, 8, 9 y 13 cuentan con toda su superficie por debajo de los 220 m.s.n.m. (Figura 11).

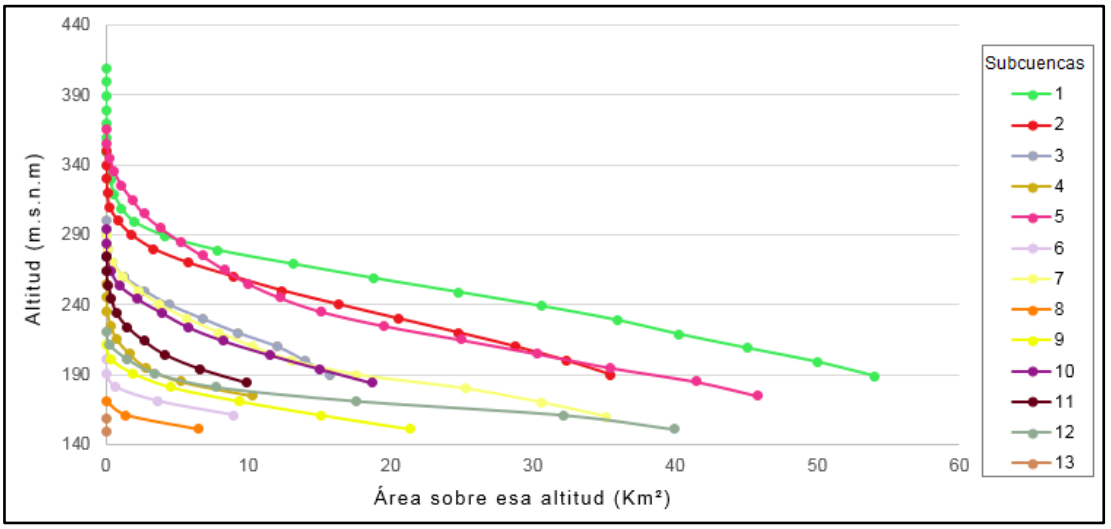

Figura 11: Curvas hipsométricas de las subcuencas. Elaboración propia.

- **Drenaje**

Como se observa en la Tabla 6, la cuenca presenta una densidad de drenaje baja, por lo que es esperable que la respuesta hidrológica frente a una tormenta sea

lenta. La pendiente está indicando que en 100 m hay un desnivel de 0,40 m, lo cual se considera baja.

Tabla 6: Parámetros de Drenaje de CAAN. Elaboración propia.

Drenaje	Símbolo	Unidad	Datos de la Cuenca
Densidad de drenaje	Dd	Adimensional	0,32
Longitud del cauce principal	Ln	km	29,51
Pendiente media del cauce	J	%	0,40
Tiempo de concentración	Tc	minutos	886

En el análisis por subcuenca de la Tabla 7 se observa que las subcuencas 8 y 13 son las de mayor densidad de drenaje, debido a que tienen la menor superficie, si se las compara con otras subcuencas. Las subcuencas 4 y 11 presentan la menor densidad de drenaje y, por lo tanto, son las que más tardan en dar una respuesta hidrológica frente a una tormenta. En cuanto al tiempo de concentración, la subcuenca 12 es la que más tarda en contribuir al flujo de salida, y la 11, por el contrario, la que menos tarda porque tiene una pequeña longitud y pendiente del cauce.

Tabla 7: Parámetros de Drenaje de las subcuencas. Elaboración propia.

Subcuenca	Dd	Ln (km)	J (%)	Tc (min)
1	0,26	12,70	0,62	287
2	0,21	7,88	0,43	236
3	0,30	4,78	0,48	166
4	0,18	5,30	0,26	191
5	0,28	13,68	0,50	307
6	0,48	5,76	0,24	202
7	0,33	12,34	0,36	306
8	0,52	4,87	0,21	188
9	0,25	6,01	0,27	221
10	0,37	7,67	0,40	220
11	0,12	1,34	0,37	115
12	0,47	15,55	0,21	396
13	0,56	0,88	0,01	159

En la Figura 12 se observa el drenaje digitalizado en forma manual sobre imágenes satelitales de la CAAN, con los nombres de los arroyos, diferenciando los cursos de agua permanentes y los temporarios. Los cursos temporarios se encuentran en las zonas más altas y aparecen cuando comienza una tormenta y si no llueve por

un tiempo prolongado, estos cursos estarán sin agua. Además, se muestra el orden de los cursos, a mayor número mayor es el potencial erosivo, y en el caso de CAAN, el nivel erosivo es bajo ya que presenta orden 3.

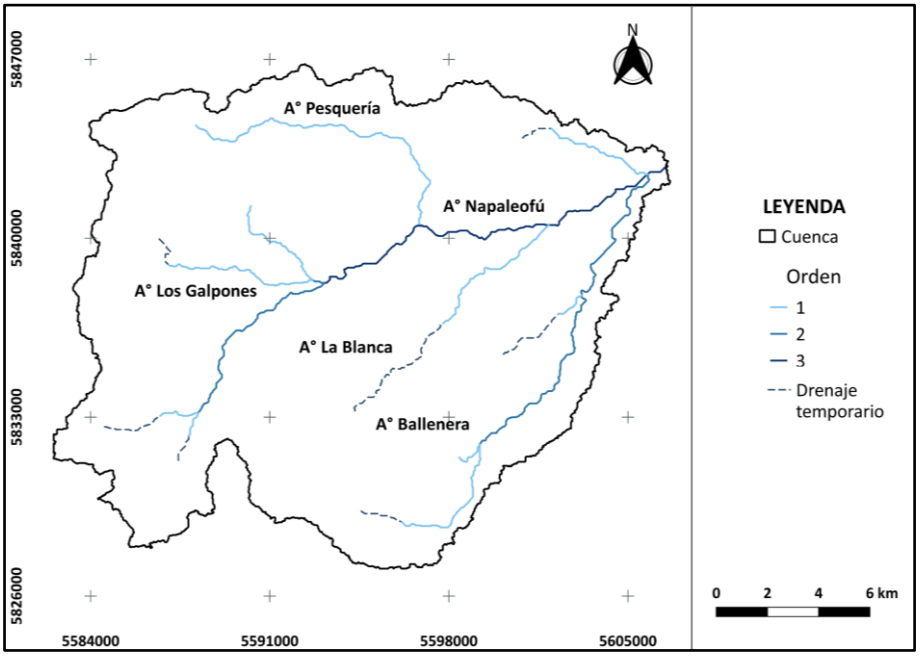

Figura 12: Mapa de drenaje. Elaboración propia.

4.3 Evaluación del cambio del uso del suelo actual (a)

Las coberturas vegetales que mayor porcentaje de cambio presentaron fueron Cultivos con Riego y Vegas de ríos, debido a que no se encontraban presentes en la cuenca hace 30 años y sí están en la actualidad; esto se asocia a que no fueron consideradas en el mapeo de 1986. Los Cultivos alineados presentaron una tasa de cambio negativa, siendo la cobertura que más disminuyó (-44%) en dicho período, mientras que los Cultivos no alineados, si bien disminuyeron, fue en menor porcentaje (-0,27%). Las coberturas Montes con pastos y Cultivos densos tuvieron una tasa de cambio similar, siendo ese valor cercano al 4%, y los Suelos pedregosos no variaron en el tiempo (Figura 13).

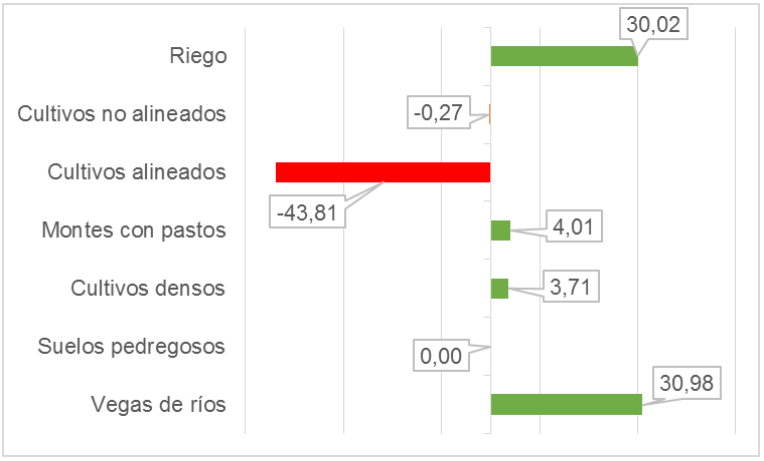

Figura 13: Tasa de cambio anual (en %) de cobertura en CAAN. Elaboración propia.

En la Figura 14 y 15 se encuentra representado el mapa de coberturas de 1986 y un gráfico de barras con la superficie de ocupación de cada una (en km²) en forma comparativa con el año 2016, respectivamente. La cobertura de mayor superficie de ocupación en 1986 fue Cultivos alineados, mientras que en 2016 fueron los Cultivos densos, como se presentó en la Figura 3.

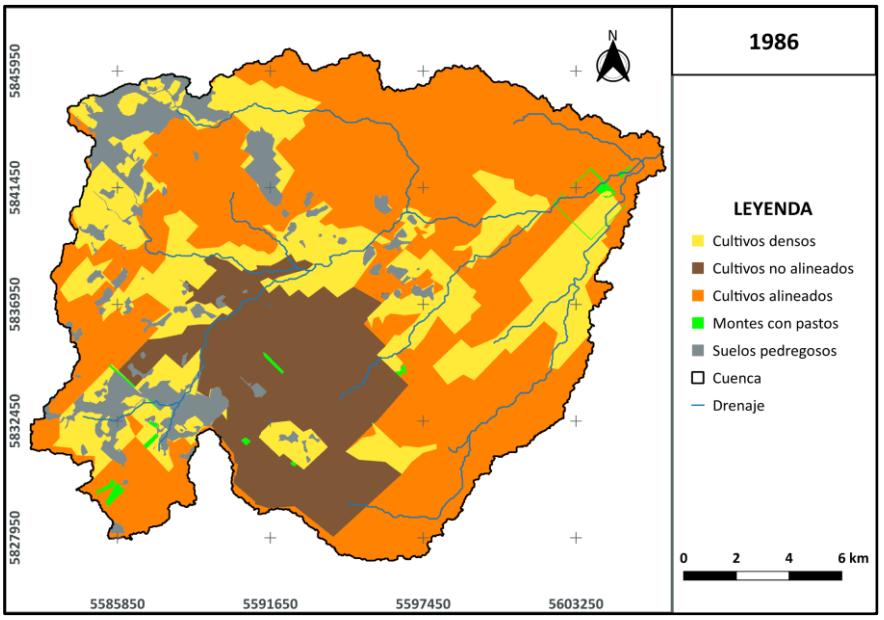

Figura 14: Coberturas vegetales en 1986. Elaboración propia.

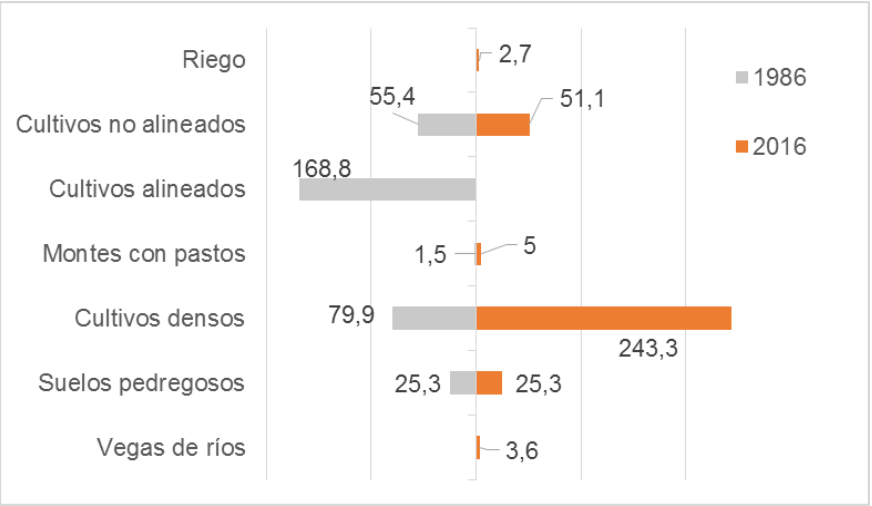

Figura 15: Comparación de la superficie ocupada por cada cobertura vegetal en km² (1986-2016). Elaboración propia.

4.4 Encuestas

Se realizaron diez preguntas (link de acceso a la encuesta: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSe7VsNk731idOjDQ9A6r1TvhZQDQKxO0GXrWbHTRPq7011OJA/viewform?usp=pp_url). Las mismas fueron respondidas por nueve actores.

El 88,9% de los encuestados reconoció que el uso de suelo que predomina en el territorio es la agricultura, y uno de ellos mencionó el pastizal. Los cultivos identificados en la actualidad fueron trigo, centeno, cebada, soja, maíz, alfalfa y girasol; también mencionaron que antes se cultivaba papa. En cuanto a las medidas de conservación, un 66,7% mencionó las curvas de nivel, 22,2% a las terrazas y 22,2% a las fajas. Los restantes no supieron la respuesta. Cuando se les preguntó por algún caso puntual de cambio del uso, mencionaron el de pastizal a agricultura; cambios entre ganadería y agricultura de acuerdo a contextos económicos; reducción de ganadería extensiva. Y uno menciona que reconoció ese cambio en una "ventana espacial de varias décadas". En cuanto a la opinión de si el cambio del uso del suelo es un proceso de impacto negativo, cuatro respondieron que no, ya que puede presentar un beneficio, mejorar en algunos casos, o siempre y cuando no se pierda el hábitat natural. Por el otro lado, hay cinco que respondieron positivamente:

- Si, se agotan los suelos por cultivar todos los años seguidos.
- Si. Porque se cambian las condiciones naturales del suelo y su cobertura y eso impacta en la dinámica hídrica.

- Si, si no se realiza de forma adecuada o en amplias superficies. El cambio del uso del suelo suele traer aparejado, además de cambios en las coberturas, otras actividades o procesos que pueden generar impactos ambientales en la zona (aplicación de agroquímicos, fertilizantes, movimientos de suelo, etc).
- Si, modifica la flora y fauna. Además produce erosión y cambios en los cursos de agua
- En zonas aptas para ganadería se cambiaron a agricultura/agricultura intensiva. Se requieren medidas adicionales para transformar la productividad de los suelos, que podrían generar impactos negativos en el ambiente (particularmente excesos de fósforo y compuestos nitrogenados en agua superficial).

Para conocer las restantes respuestas brindadas (ver Anexo I, Figura I.1), se realizaron cinco gráficos de torta agrupados. La pregunta referida al riego aplicado, no era obligatoria ya que no todos los encuestados cuentan con campo. Se destaca el hecho de que parte de los actores reconoció problemas en cuanto a la cantidad y la calidad del agua; además de la pérdida de los primeros centímetros del suelo o capa arable.

4.5 Planteo de escenarios

En el escenario b (Figura 16) se propuso aumentar la superficie correspondiente a cultivos con estrategias de conservación, sobre terreno con pendientes en el rango del 2-7%, debido a que por fuera del mismo disminuye la eficiencia de dichas medidas. El aumento correspondió a 14,5% de la superficie de Cultivos no alineados en toda la cuenca, y disminución de Cultivos densos en la misma proporción, respecto del escenario actual (a); las otras coberturas no se modificaron.

- Cultivos no alineados ocupaba 15,4% en a mientras que en b ocupa 29,9%;
- Cultivos densos ocupaba 73,5% y en b ocupa 59,1%.

En función de ese porcentaje de aumento (14,5%) se calculó la diferencia de superficie con estrategias entre el escenario a y b, por subcuenca (Tabla 8).

Tabla 8: Superficie de Cultivos no alineados, en %. Elaboración propia.

Subcuencas	Diferencia (%)
1	22,85
2	11,74
3	2,75
4	0,00
5	12,43
6	2,40
7	25,16
8	0,00
9	7,43
10	0,23
11	9,71
12	5,31
13	0,00

El mayor aumento se identificó en las subcuencas 1 y 7 superando el 20% de diferencia, mientras que en las subcuencas 2, 5, 9, 11 y 12 el aumento estuvo entre el 5-12%, y en las subcuencas 3 y 6 cerca del 2%. Por último, en la subcuenca 10 si bien se aumentó la superficie, este valor se encuentra por debajo del 1%, y en las subcuencas 4, 8 y 13 no se modificó la superficie con estrategias.

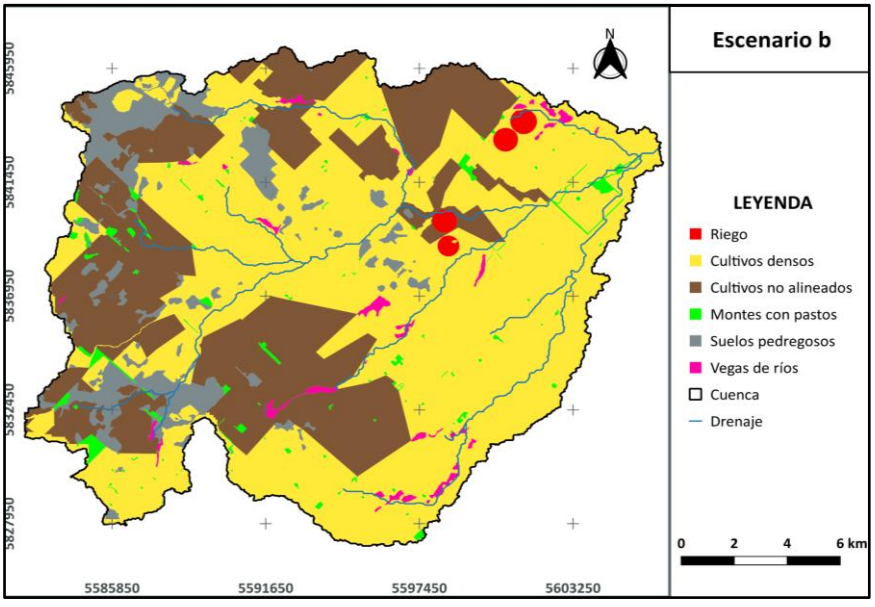

Figura 16: Superficie de coberturas con estrategias de conservación del escenario b. Elaboración propia.

Por otro lado, con el objetivo de generar un escenario contrastante respecto de a y b, se planteó unificar las superficies correspondientes a Cultivos densos y Cultivos no alineados por una superficie ocupada por cultivos sin prácticas de conservación y con condición de infiltración pobre. Esta superficie corresponde al 88,9% del total de la cuenca y para que los mapas sean similares y más fácil de comparar un escenario con otro, esa superficie quedó denominada Cultivos densos. Se definió, así, el nuevo escenario denominado c con cinco clases de coberturas (Figura 17).

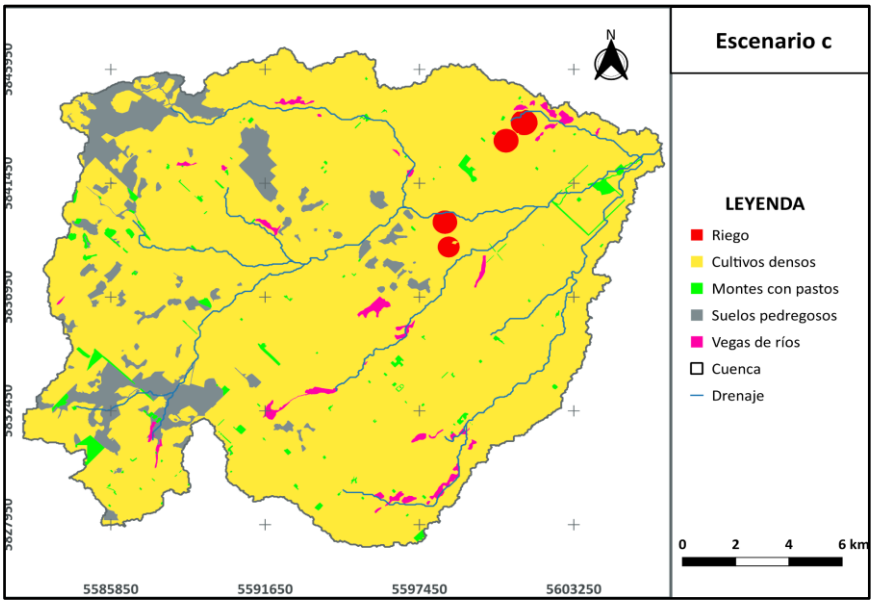

Figura 17: Superficie modificada de coberturas sin estrategias de conservación del escenario c. Elaboración propia.

4.6 Cuantificación de los elementos del comportamiento hidrológico

A continuación, se presentan las Tablas 9, 10 y 11 correspondientes a los NC de los complejos suelo-vegetación en cada escenario. Dichos valores corresponden a un comportamiento hidrológico diferente relacionado a la textura, cobertura vegetal, presencia o no de estrategias de conservación, e infiltración del suelo y, por lo tanto, para asignarlos se consideró que:

- En los tres escenarios las coberturas Suelos pedregosos, Vegas de ríos y Riego, al no tener un valor NC como tal, en la tabla de bibliografía mencionada en Materiales y Métodos, se consideraron como Pastizal P con condición de infiltración pobre, Matorral, mezcla de matorral y maleza cubierta 50% y Cultivos alineados CB en curvas de nivel con buena condición de infiltración, respectivamente.

- Cultivos densos son de leguminosas y junto con los no alineados, están en curvas de nivel y la condición de infiltración es buena. Esto último también se cumple para la cobertura Montes con pastos.
- En el escenario b, la superficie aumentada de Cultivos no alineados se consideró un valor de NC correspondiente a Cultivos densos de leguminosas en curvas de nivel y terrazas, con buena infiltración.
- En el escenario c, la superficie de Cultivos densos y no alineados se unificó y su comportamiento se asemeja al de Cultivos alineados sin prácticas de conservación y con una condición de infiltración pobre. Se denominó Cultivos densos igual que en el escenario a y b, pero cambió en número de curva.

El complejo suelo D - vegetación Riego no se encuentra en la cuenca, por lo tanto, no tiene asignado un valor de NC.

Tabla 9: NC para cada complejo suelo-vegetación en el escenario a. Elaboración propia.

GH	**Cobertura y/o uso de suelos**					
	Riego	Cultivos densos	Cultivos no alineados	Montes con pastos	Suelos pedregosos	Vegas de ríos
B	75	69	73	55	79	67
C	82	78	81	70	86	77
D	-	83	84	77	89	83

Tabla 10: NC para cada complejo suelo-vegetación en el escenario b. Elaboración propia.

GH	**Cobertura y/o uso de suelos**					
	Riego	Cultivos densos	Cultivos no alineados	Montes con pastos	Suelos pedregosos	Vegas de ríos
B	75	69	67	55	79	67
C	82	78	76	70	86	77
D	-	83	80	77	89	83

Tabla 11: NC para cada complejo suelo-vegetación en el escenario c. Elaboración propia.

GH	Cobertura y/o uso de suelos				
	Riego	Cultivos densos	Montes con pastos	Suelos pedregosos	Vegas de ríos
B	75	81	55	79	67
C	82	88	70	86	77
D	-	91	77	89	83

La cobertura con menor número de curva es Montes con pastos y, si se la compara con el GH, aumenta de B a D. Esto quiere decir que predomina la infiltración sobre el escurrimiento. Caso similar pero opuesto sucede con los Suelos pedregosos donde los altos valores de NC indican que predomina el escurrimiento sobre la infiltración. Si se comparan Cultivos no alineados en el escenario a, con el escenario b donde se plantean estrategias de conservación, los NC disminuyen y eso favorece la infiltración del agua; mientras que en el escenario c, al estar la cuenca ocupada en mayor porcentaje por Cultivos densos sin medidas de conservación, se favorece al fenómeno de escurrimiento, en detrimento de la infiltración.

En la Figura 18, se observa la distribución espacial de los rangos de NC para cada escenario, distribuidos en la cuenca y en la Tabla 12 se presenta el porcentaje de ocupación. En los escenarios a y b predomina el rango 3 con 63,7% y 75,7% respectivamente. Los rangos 5 y 6 mantienen el mismo porcentaje de ocupación, mientras que en b disminuyen los rangos 2 y 4, y aumenta el 1, es decir el de menor NC. En el escenario c, la situación es diferente ya que el rango que predomina es el 6 con 82,1 % de ocupación y el 1 es el que menor superficie presenta con sólo 0,3%. La única coincidencia es que mantiene el mismo porcentaje de ocupación con el rango 2 del escenario b (1,5%).

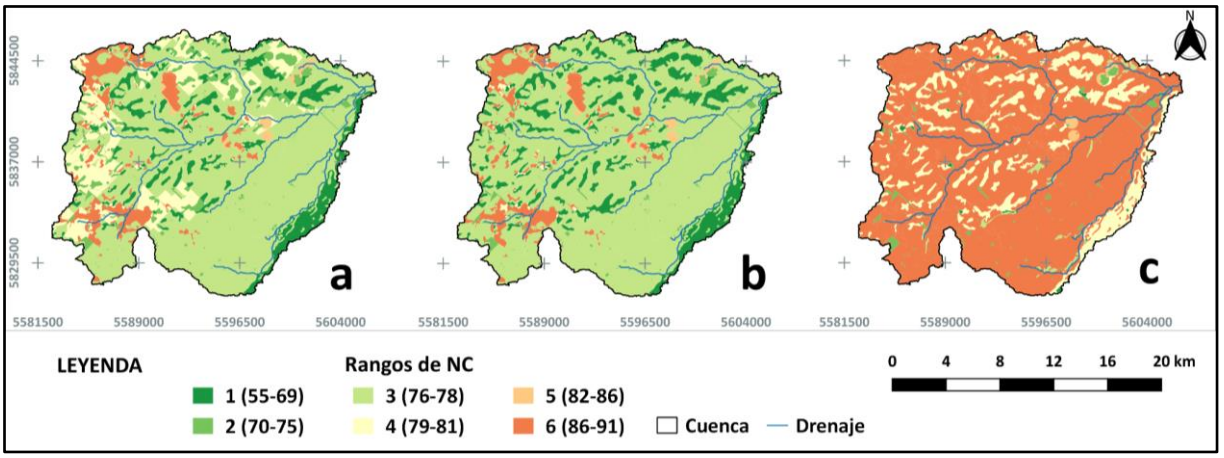

Figura 18: Rangos de número de curva según escenario a (izquierda), escenario b (medio) y escenario c (derecha). Elaboración propia.

Tabla 12: Superficie de ocupación de rangos de NC por escenario, en %. Elaboración propia.

	Escenarios		
Rangos	a	b	c
1	10,7	14,2	0,3
2	5,0	1,5	1,5
3	63,7	75,7	1,0
4	12,5	0,6	14,5
5	0,9	0,9	0,6
6	7,1	7,1	82,1

4.7 Zonificación de la CAAN identificando el comportamiento hidrológico superficial, en los escenarios estudiados

Parte de la información arrojada por GeoQ es la superficie que ocupa cada NC, en hectáreas (ver Anexo I, Tablas I.2., I.3. y I.4). En la cuenca de estudio los números de curva más altos corresponden al escenario c y es por ello que en la Figura 19 se observan todas las barras violetas, que representan dicho escenario, del lado derecho. Del lado izquierdo, predominan las barras rosas y verdes, correspondiendo al escenario a y b respectivamente, y esto significa que ambos tienen menores valores de NC respecto de c.

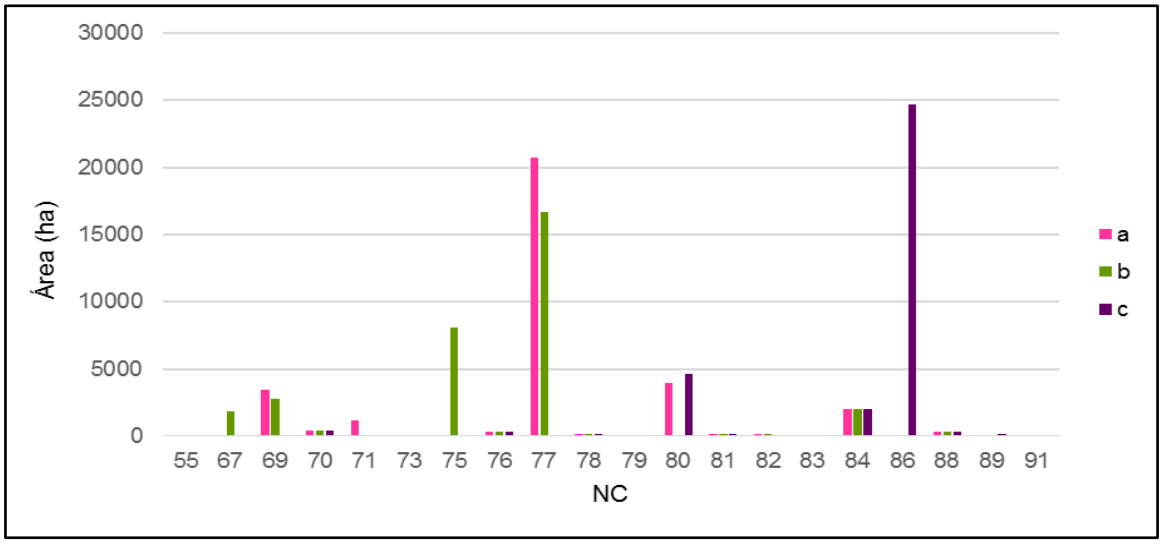

Figura 19: Superficie ocupada por NC según cada escenario. Elaboración propia.

A continuación, se presentan tres figuras con el comportamiento hidrológico superficial de la cuenca según el escenario actual a (Figura 20), y los dos escenarios hipotéticos, con estrategias b (Figura 21), y sin estrategias c (Figura 22). Cada fila, representada con un número, indica las tres tormentas estudiadas (1: 40,2 mm; 2: 74,4 mm: 3: 149,4 mm); y cada columna, indica el CE, CF y Clo.

En general, para los tres escenarios, con la menor tormenta hay más abstracciones iniciales, es decir que el agua es interceptada por la vegetación y posteriormente, se infiltra en el suelo. Por otro lado, con la mayor tormenta, ocurre lo contrario, hay más escurrimiento y menos infiltración. Con la tormenta media, se observan diferencias entre los tres escenarios y en aquel donde se plantean estrategias, hay un mayor porcentaje de abstracciones. En el escenario c, donde no se plantean medidas, tanto en la tormenta 2 como en la 3, se observa toda la cuenca en color azul y prácticamente la vegetación no llega a interceptar el agua, ni tampoco el suelo a infiltrarla.

Estos resultados demuestran la importancia de implementar estrategias de conservación de suelos, sobre todo cuando las tormentas descargan mucha cantidad de agua en determinado tiempo que, si bien no son frecuentes, cuando ocurren generan mucho caudal superficial de agua que arrastra sedimentos y se pueden perder los primeros centímetros de suelo o capa productiva por erosión hídrica.

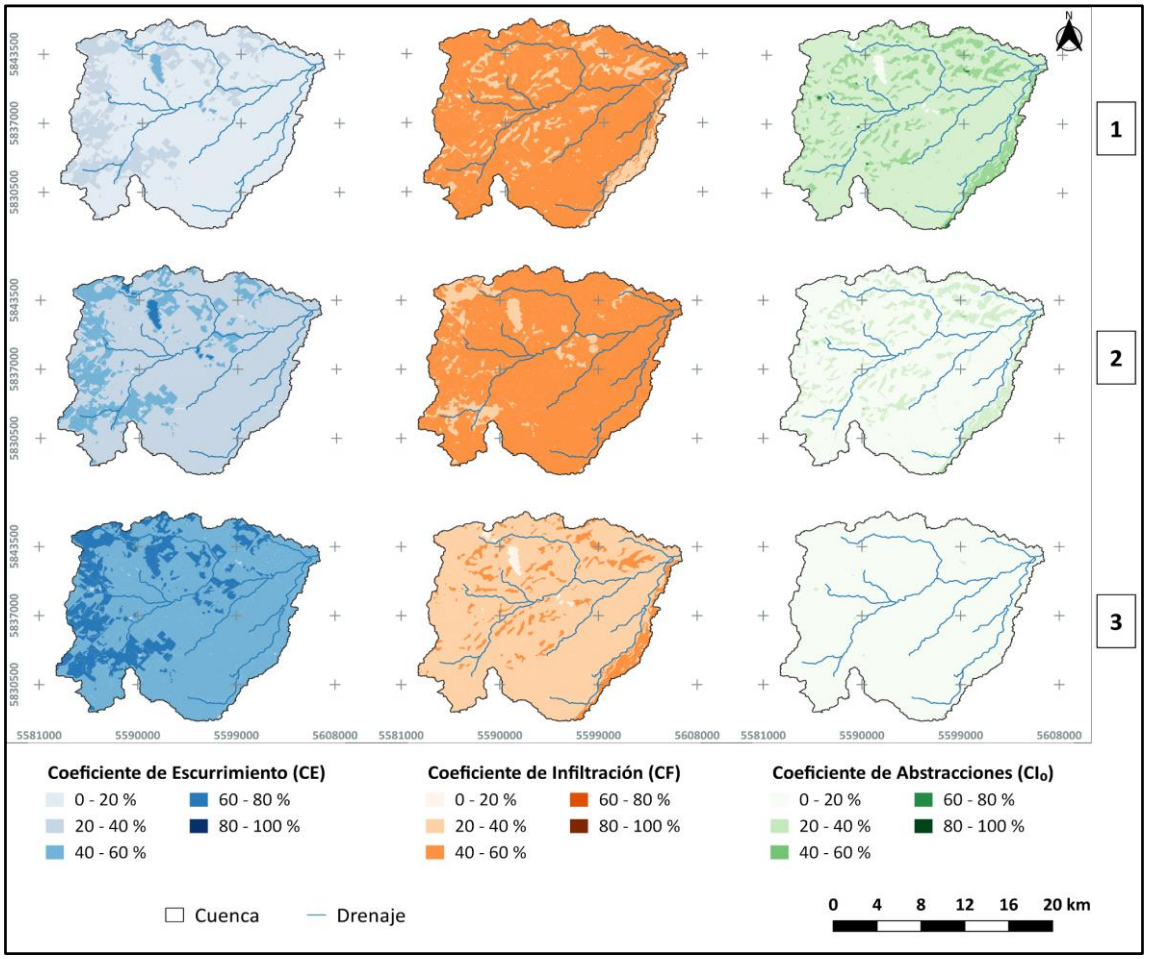

Figura 20: Comportamiento hidrológico del escenario a según las tres tormentas. Elaboración propia.

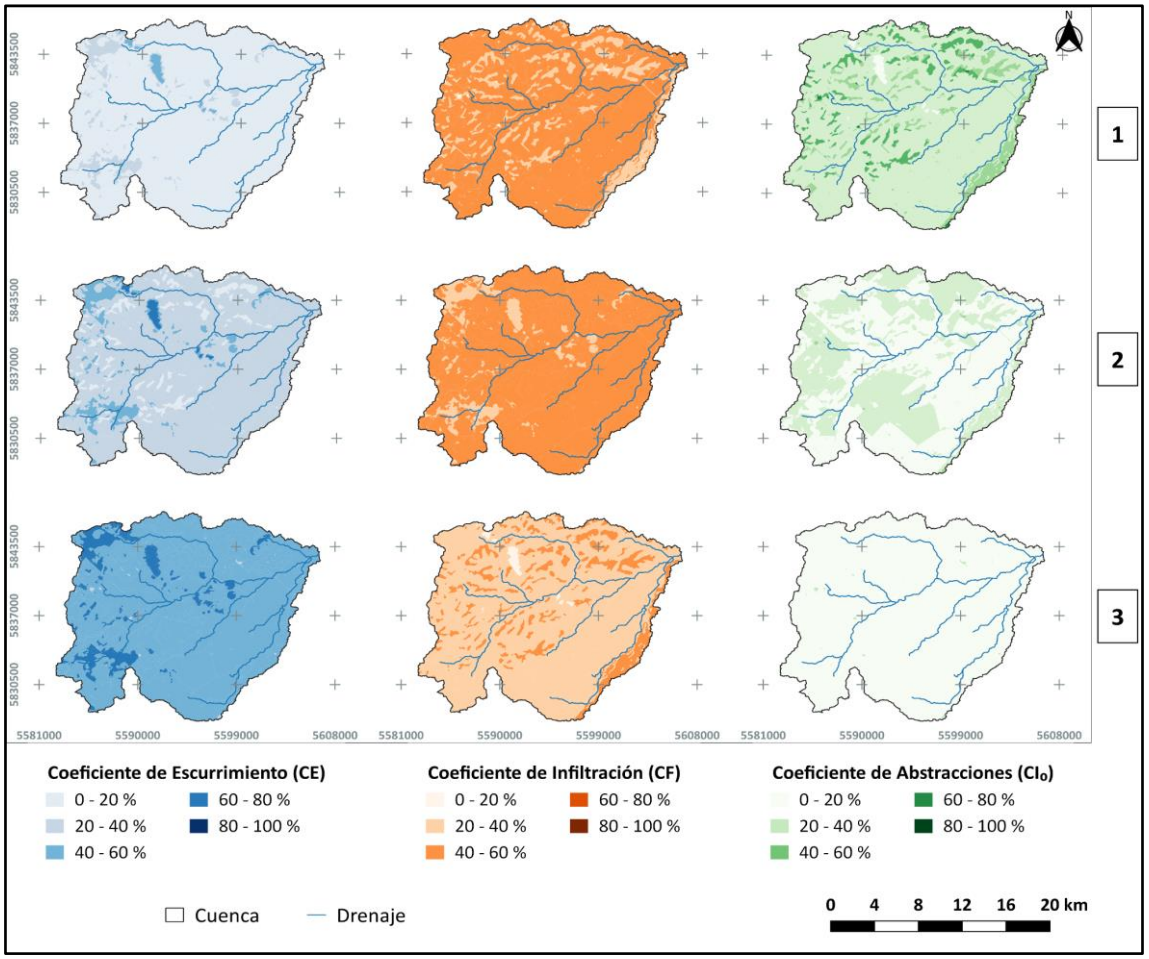

Figura 21: Comportamiento hidrológico del escenario b según las tres tormentas. Elaboración propia.

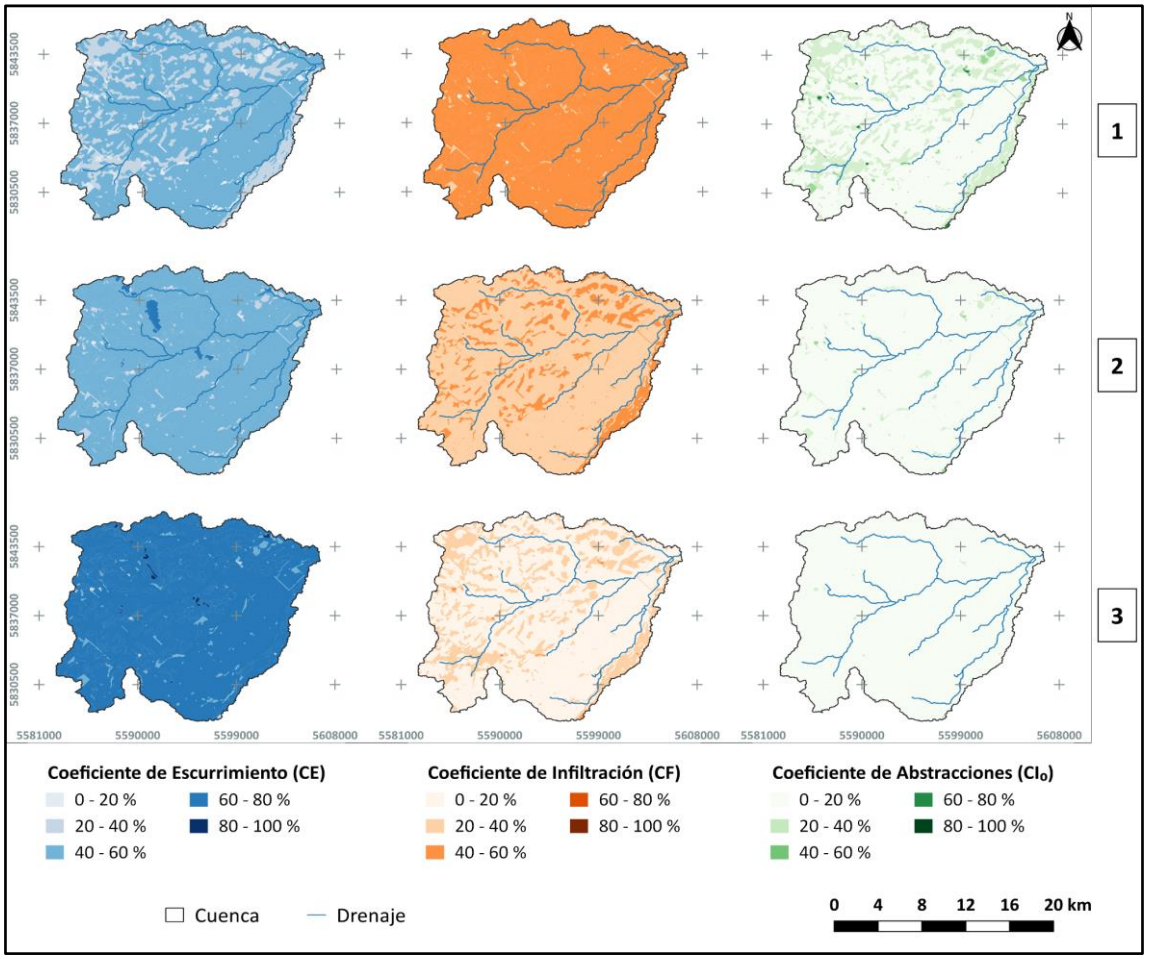

Figura 22: Comportamiento hidrológico del escenario c según las tres tormentas. Elaboración propia.

La información mostrada anteriormente mediante mapas también se presenta como gráficos de barras (Figura 23). Allí se observa, además, que a medida que aumenta el NC, aumenta el escurrimiento y disminuye la infiltración y las abstracciones iniciales. Esto es más notorio en la tormenta mayor y para los tres escenarios. La diferencia es que en el escenario c, existen NC más altos que en a y b y, por lo tanto, hay un porcentaje mayor de escurrimiento respecto de los otros dos.

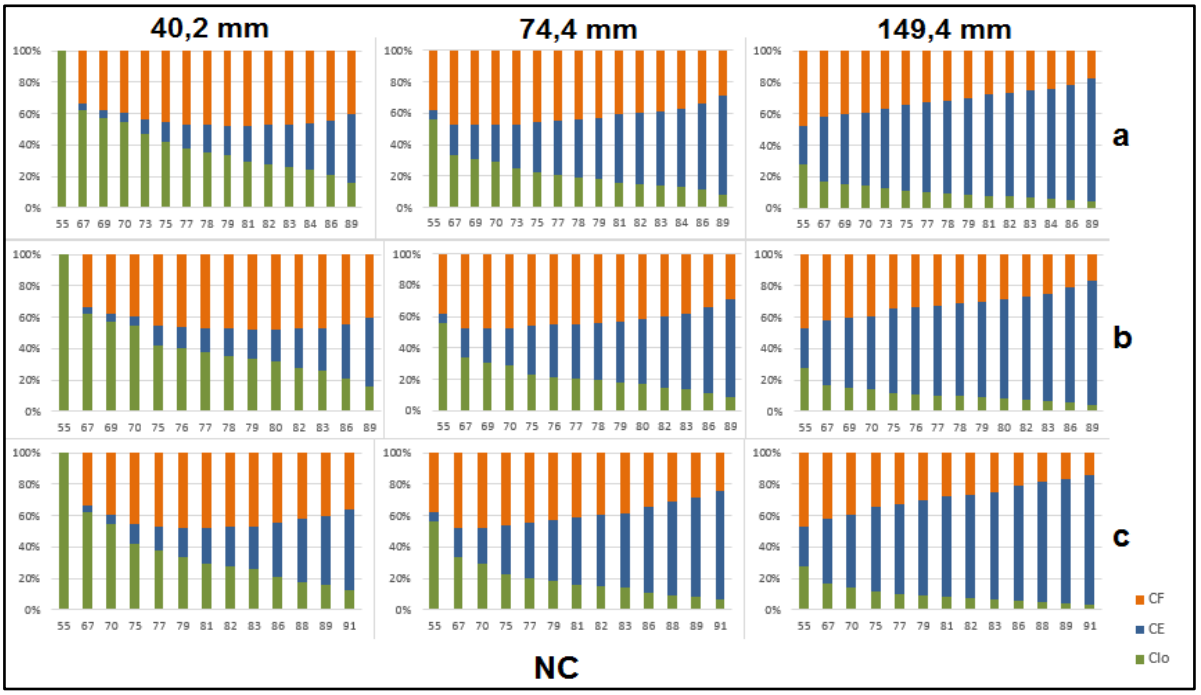

Figura 23: Porcentaje de ocupación de cada coeficiente en función del NC, según escenario y tormenta modelada. Elaboración propia.

4.8 Modelización hidrológica

El modelo de cuenca generado a partir del HEC-HMS se muestra en el Anexo I Figura I.2. Para la elección del número de Manning (ver Anexo I, Tabla I.6) se observaron fotos de los puntos de muestreo (ver Anexo I, Figuras I.3 a la I.8).

Los resultados alcanzados por la modelización hidrológica con HEC-HMS, muestran que la disminución del valor de NC en las subcuencas 1, 2, 5, 6, 7, 9 y 11 dentro del escenario b, se explican por el aumento de la superficie con estrategias, detallado en la Tabla 8 dentro del objetivo “planteo de escenarios”. Dicho porcentaje, que depende, además, de la superficie de cada subcuenca, permitió modificar el comportamiento hidrológico de las mismas y donde el NC se mantuvo con el mismo valor, es porque el aumento de superficie no llegó a ser suficiente.

En el escenario c, el aumento del valor de NC se dio en todas las subcuencas debido a que los Cultivos densos están distribuidos en toda la cuenca. En la Tabla 13 se muestran los valores de NC por subcuenca para cada escenario.

Tabla 13: NC ponderado por subcuencas, entre los tres escenarios. Elaboración propia.

	NC por escenario		
Subcuencas	**a**	**b**	**c**
1	79	77	86
2	79	76	86
3	77	77	86
4	78	78	87
5	79	77	86
6	78	77	86
7	78	77	87
8	77	77	86
9	76	74	85
10	77	77	87
11	78	77	88
12	76	76	87
13	77	77	87

Los eventos de precipitación modelados corresponden a tres tormentas registradas en la estación meteorológica ubicada en la cuenca. Se realizó un gráfico de barras (Figura 24) para mostrar el comportamiento de las tormentas a lo largo del tiempo; en el mismo se consideraron los milímetros llovidos en un intervalo de treinta minutos.

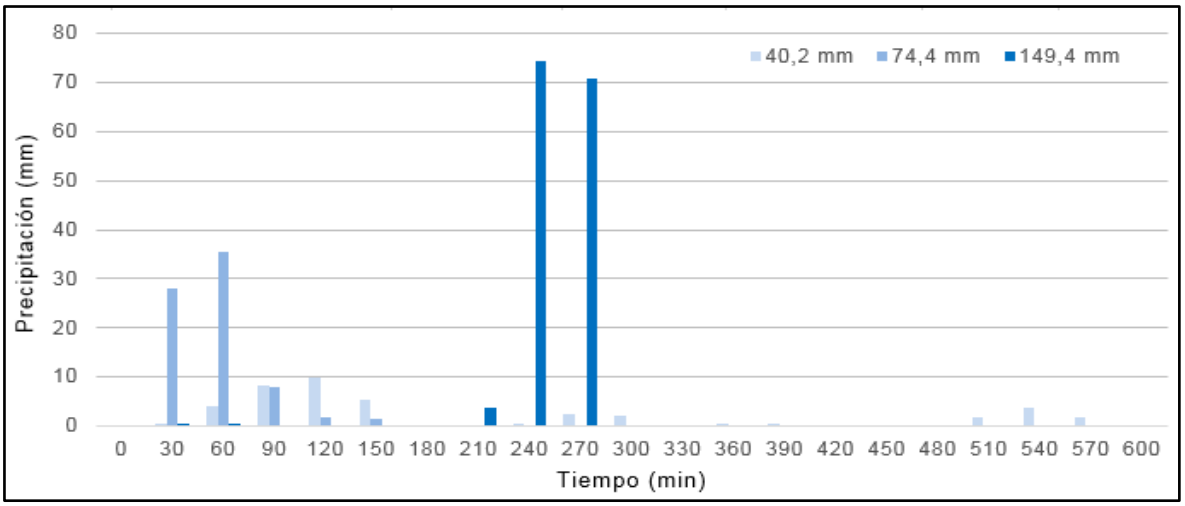

Figura 24: Comparación entre las tres tormentas usadas en la modelación. Elaboración propia.

Como resultado se obtuvieron nueve modelaciones hidrológicas, es decir una modelación por cada combinación escenario-tormenta. En la Tabla 14 se comparan los caudales erogados a la salida de la cuenca. Los mayores valores se encuentran en el escenario c, y dentro del mismo, con la mayor tormenta.

Tabla 14: Caudal erogado a la salida de la cuenca, según los escenarios planteados y tormentas analizadas. Elaboración propia.

	Caudal (m^3/s)		
Escenarios	**40,2 mm**	**74,4 mm**	**149,4 mm**
a	62,7	538,2	1857,1
b	54,6	458,0	1655,5
c	137,5	830,3	2315,9

El análisis de los valores obtenidos se realizó mediante la comparación entre los tres escenarios con una misma tormenta (Tabla 15), y dentro de un mismo escenario con las tres tormentas (Tabla 16). En el primer caso, se compararon los escenarios b y c (hipotéticos), respecto de a (actual); mientras que, en el segundo caso, se compararon las tormentas extremas (40,2 mm y 149,4 mm) respecto de la media (74,4 mm).

En la Tabla 15 existe una disminución del porcentaje erogado a la salida de la cuenca en el escenario b. Esto se debe a las estrategias de mejora aplicadas sobre una mayor superficie, y esto permitió modificar el NC (Tabla 13) y el comportamiento hidrológico de la cuenca, predominando la infiltración por sobre la escorrentía. Por el otro lado, en el escenario c, al no tener estrategias, aumentó el NC y por lo tanto la escorrentía.

Tabla 15: Porcentaje de cambio del caudal del escenario b y c respecto de a. Elaboración propia.

	Tormentas		
	40,2 mm	**74,4 mm**	**149,4 mm**
Escenarios	**Porcentaje de cambio de caudal**		
b	-12,9	-14,9	-10,9
c	119,3	54,3	24,7

En la Tabla 16 se observa que el escenario a y b tienen una disminución de caudales similares cuando se compara la tormenta menor con la media, en la comparación de la media con la mayor, varía y es mayor en el escenario b, es decir que aumentando el doble la tormenta, la diferencia de caudales es 261,5% mayor. Por otro lado, en c, la diferencia entre el caudal erogado con 149,4 mm y con 74,4 mm es

menor que en a y b. Si bien el volumen de agua que se está moviendo sobre la superficie del suelo, en un determinado tiempo, es mayor por la falta de estrategias de conservación, tiene una menor diferencia que en a y b.

Tabla 16: Porcentaje de cambio del caudal de la tormenta 40,2 mm y 149,4 mm respecto de la de 74,4 mm. Elaboración propia.

	Escenarios		
	a	**b**	**c**
Tormentas	**Porcentaje de cambio de caudal**		
40,2 mm	-88,4	-88,1	-83,4
149,4 mm	245,1	261,5	178,9

En las Figuras 25, 26 y 27 se observan los hidrogramas de salida de la cuenca, donde coincide que el mayor caudal se encuentra en el escenario c para las tres tormentas. Además, con la tormenta menor se generan dos picos por las características propias de distribución temporal de la tormenta, y esto es más notorio en c; las otras dos tormentas, existe un solo pico.

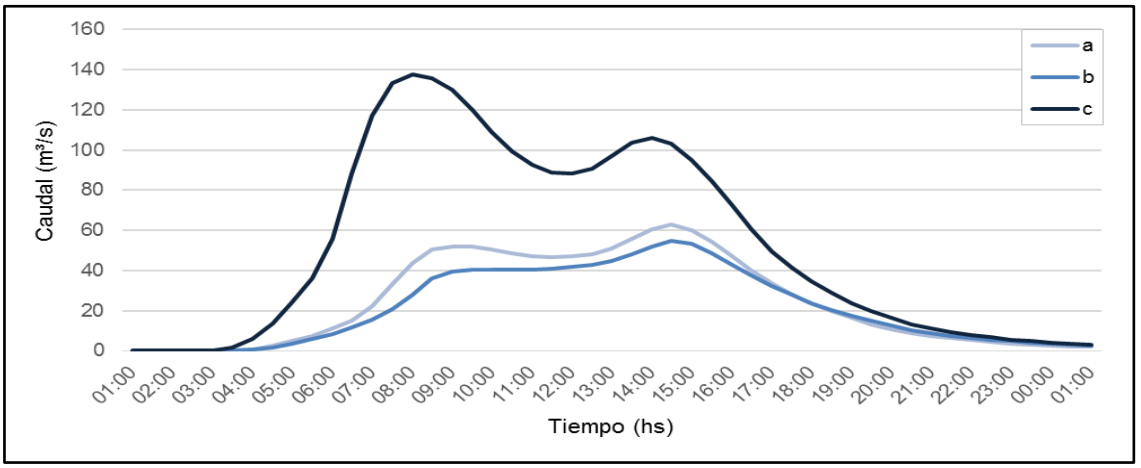

Figura 25: Caudal erogado a la salida de la cuenca para los tres escenarios según la tormenta de 40,2 mm.

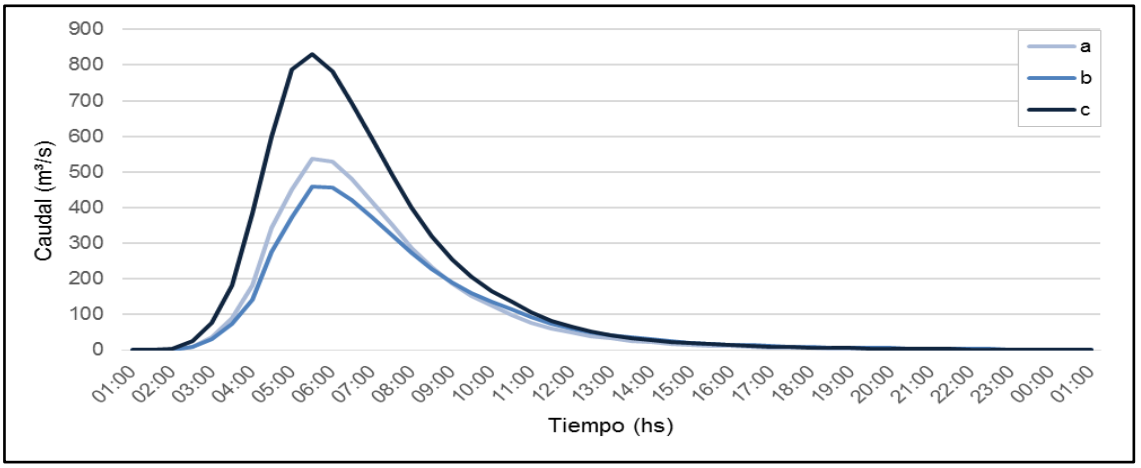

Figura 26: Caudal erogado a la salida de la cuenca para los tres escenarios según la tormenta de 74,4 mm.

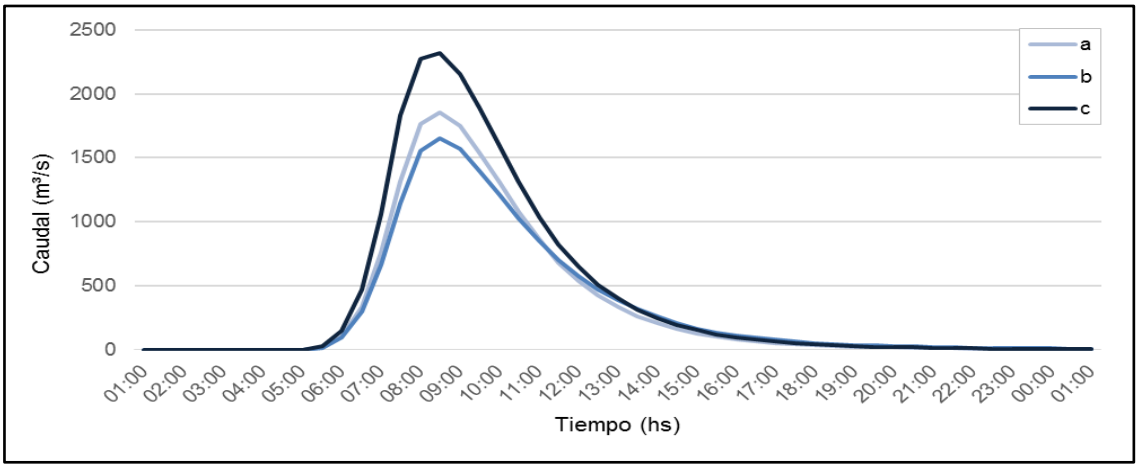

Figura 27: Caudal erogado a la salida de la cuenca para los tres escenarios según la tormenta de 149,4 mm.

Los resultados de las corridas se observan en el Anexo I mediante las Tablas I.7, I.8 e I.9. Allí se encuentran los resultados de caudal y volumen de las subcuencas, los ríos y la salida para los tres escenarios y las tres tormentas.

5. DISCUSIÓN

El cambio del uso del suelo planteado mediante los dos escenarios futuros e hipotéticos generó un cambio en los servicios hidrológicos de la cuenca. De Antueno et al., (2020) mencionan que uno de los más notables impactos ambientales del reemplazo de coberturas naturales por coberturas semi-impermeables, se corresponde con el aumento de la escorrentía superficial. Cuando se planteó aumentar la superficie con estrategias (escenario b) y por ende, disminuir el número

de curva, se observó un menor caudal erogado a la salida de la cuenca correspondiendo al 12,9% para la tormenta 1; 14,9% para la tormenta 2; y 10,9% para la tormenta 3.

El aumento de la agricultura sobre los pastizales naturales analizado en el período de 1986-2011 por Senisterra et al., (2014), trajo aparejado no sólo problemas de aumento del caudal erogado sino aquellos asociados a la contaminación, ya que se utilizan plaguicidas para el control de plagas. Es decir que además de analizar la cantidad de agua que escurre por la cuenca, es necesario hacer un análisis de la calidad del agua porque se ve igualmente afectada. La agriculturización en la cuenca estuvo favorecida por los paquetes tecnológicos que han pasado de un moderado consumo de insumos y rendimientos medios hacia un nuevo umbral de producción intensiva en capital, maquinaria y agroquímicos, elevando su productividad (Ruiz et al., 2015). Cuando esa agriculturización no está acompañada por estrategias de conservación, como ser cultivos en curvas de nivel, fajas o en terrazas, y por el contrario, se plantean alineados sin tener en cuenta la topografía del lugar, el escenario se modifica negativamente. Se observó en c un aumento del caudal erogado correspondiente a 119,3% para la tormenta 1; 54,3% para la tormenta 2; y 24,7% para la tormenta 3.

La morfometría influye en la dinámica del ciclo hidrológico de la cuenca (Senisterra et al., 2013), sin embargo, fue un parámetro que no varió entre los escenarios. Presenta forma alargada, el relieve se compone de lomadas suaves y una rugosidad alta, y en cuanto al drenaje, la densidad es baja. Todo eso, sumado al tiempo que tarda una gota en recorrer la mayor distancia presente en la cuenca, se considera que la misma presenta un potencial erosivo bajo, y las crecidas son menos peligrosas. Si se analiza por subcuenca, aquellas con mayor superficie de drenaje son las que más aportan al caudal de salida, sin embargo tienen una densidad de drenaje baja y por lo tanto, un mayor tiempo de concentración.

La intensidad de la tormenta, es decir, los milímetros llovidos en un tiempo determinado, también inciden en la respuesta hidrológica de la cuenca. Cuando se inicia una tormenta, primero se satura la vegetación y el escurrimiento es nulo. Este va en aumento hasta alcanzar un porcentaje en relación a la intensidad de la tormenta que es constante. Tanto el porcentaje como la intensidad del escurrimiento derivan de la intensidad de la tormenta. El escurrimiento se inicia cuando el suelo y la vegetación

están saturados o cuando la intensidad de la tormenta es muy superior a la intensidad o capacidad de la infiltración y además la generación de escurrimiento depende de que antes se complete el agua de almacenamiento superficial (Gaspari et al., 2013). Con la mayor tormenta existió un mayor porcentaje de escurrimiento en los tres escenarios ya que el suelo se saturó rápidamente; esto correspondió a 245,1% para el escenario a, 261,5% para el escenario b, y 178,9% para el escenario c. Por el otro lado, con la menor tormenta, las abstracciones iniciales e infiltración, primaron por sobre el escurrimiento, disminuyendo 88,4% en a, 88,1% en b y 83,4% en c. La situación intermedia ocurrió con la tormenta media, donde los tres fenómenos tuvieron lugar en la respuesta mencionada. Es decir, existen situaciones donde se genera erosión hídrica y esto no sucede solamente por las características morfométricas, del suelo y cobertura vegetal de la cuenca, sino porque la intensidad de la tormenta supera su capacidad de retención hídrica.

6. CONCLUSIONES

Se logró el objetivo general de la tesis que fue analizar la transformación del territorio de la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú y su influencia sobre los servicios hidrológicos ecosistémicos. Las herramientas utilizadas fueron los SIG y HEC-HMS, visitas a la cuenca, encuestas a personas que habitan y conocen la zona, y bibliografía antecedente.

Se corroboró que el cambio del uso del suelo incide directamente en el comportamiento hidrológico de la cuenca. En este trabajo, el cambio de uso significó, por un lado, un aumento de superficie con estrategias que generaron un impacto positivo en la respuesta hidrológica para las tres tormentas; y por el otro, un impacto negativo ya que al no plantear medidas de conservación, el escurrimiento fue mayor existiendo un mayor caudal erogado a la salida de la cuenca.

Por último, es importante un análisis más profundo de las actividades que se plantean y de las características tanto de la cuenca como de los eventos de precipitación para lograr una sostenibilidad en el tiempo de los recursos naturales.

7. AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Fernanda Gaspari, mi directora, por sus consejos y orientación y por su paciencia al explicarme tanto en la cursada de Manejo de Cuencas Hidrográficas, como en el desarrollo de esta tesis.

A la Mg. Lucía de Antueno, mi co-directora, por sus explicaciones del Sistema de Modelamiento Hidrológico y consejos en cuanto al armado de la tesis.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, universidad pública y gratuita que me permitió realizar mis estudios y recibirme de Ingeniera Forestal.

A mis evaluadores, María Isabel Delgado y Daniel Giménez, por sus aportes enriquecedores a esta tesis.

Al Dr. Sebastian Besteiro por ser parte del equipo de cuencas y participar de los viajes de campaña y obtención de datos a campo.

A mi familia por el apoyo incondicional y emocional, ya que sin ellos no habría podido llegar hasta acá.

A Eve, mi compañera de estudios y amiga, por su contención en estos años facultativos.

8. BIBLIOGRAFÍA

Anselmino, C. B.; de Antueno L.; Gaspari, F. J. 2022. Determinación de la respuesta hidrológica en una cuenca hidrográfica a partir de un modelo de simulación lluvia-escorrentía, preservando los servicios hidrológicos ambientales. Curso de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. 31 pp

Anselmino, C. B.; Gonzalez Fuentes, E. A.; Montealegre Medina, F. A.; Gaspari, F. J. 2022. Delimitación y caracterización morfométrica de una cuenca serrana bonaerense con SIG. Curso de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. 9 pp.

De Antueno, L., Gaspari, F. J.; Guzmán Guaraca, A. 2020. Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. Revista Estudios Ambientales, 8(1), 20-42.

Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Senisterra G. E.; Delgado M. I.; Besteiro S. I. 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Curso

de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. 188 pp.

Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Montealegre Medina, F. A. 2019. Manejo de cuencas hidrográficas: herramientas de sistemas de información geográfica. Curso de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. 120 pp.

Gonzalez Fuentes E. A.; Anselmino C. B.; Dabadie M.; Gaspari F. J. 2022. Análisis del Grupo Hidrológico en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires. Curso de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP y CEIDE. 9 pp.

Hassan, R.; Scholes, R.; Ash, N. (eds.). 2005. MA Conceptual Framework: Ecosystem and human well-being. Millennium ecosystem assessment: 25-36. Island Press. Washington DC.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN). Visto en: https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA) - Instituto de Suelos - CIRN. (2022). Cartas de Suelos República Argentina - Provincia de Buenos Aires (1.0) [Conjunto de datos]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.6353509

Karra, Kontgis, et al. "Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning." IGARSS 2021-2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2021.

Mazzucchelli, M. G.; Gaspari, F. J. 2015. Caracterización del Agua Superficial de la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Buenos Aires, Argentina. Agua y gestión del recurso. 3 pp.

Mokondoko Delgadillo, P.; Flores Díaz, A.; González Mora, I.; González Terrazas, D.; I.; Machorro Reyes, J.; Ríos Patrón, E. 2018. Servicios ecosistémicos. Fundamentos desde el manejo de cuencas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México. 52 pp.

Montealegre Medina, F. A.; Gaspari, F. J. 2020. GeoQ: Automatización del procesamiento de cálculo de la escorrentía superficial bajo entorno QGis 3.18®. Curso

de manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. 15 pp.

Nimnim, H. T.; Farhan, B. A. 2015. Evaluation of Manning's coefficient of ferrocement trapezoidal and semicircle canals strengthened by CFRP sheets. *International Journal of Energy and Environment*, v. 6, n. 5, p. 461-470.

Rodríguez Vagaría, A.; Gaspari, F. J. 2015. Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, Provincia de Buenos Aires-Argentina. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 56, N° 1: 105-119. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Ruíz, D.; Somoza, A.; Vázquez, P.; Zulaica, L. 2015. Transformaciones en el uso de la tierra e impactos ambientales en el Partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, en el Período 1988-2015. MEMORIAS DEL V CONGRESO LATINOAMERICANO DE AGROECOLOGÍA. La Plata, Argentina.

Senisterra, G. E.; Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M. 2014. Influencia del cambio de uso del suelo sobre el escurrimiento superficial. Estudio de caso: Cuenca del Arroyo Napaleofú, Provincia de Buenos Aires, Argentina. 132 pp.

Senisterra, G. E.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Gaspari, F. J.; Mazzucchelli, M. G. 2013. Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 55, N° 2: 287-303.

Van Lynden, G. W. J.; L. R. Oldeman. 1997. The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.

Vélez Upegui, J. J.; Botero Gutiérrez, A. 2010. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada de San Luis, Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 11 pp.

Ven te chow, Ph. D. 1994. Hidráulica de canales abiertos. McGRAW-HILL. 667 pp.

ANEXO I

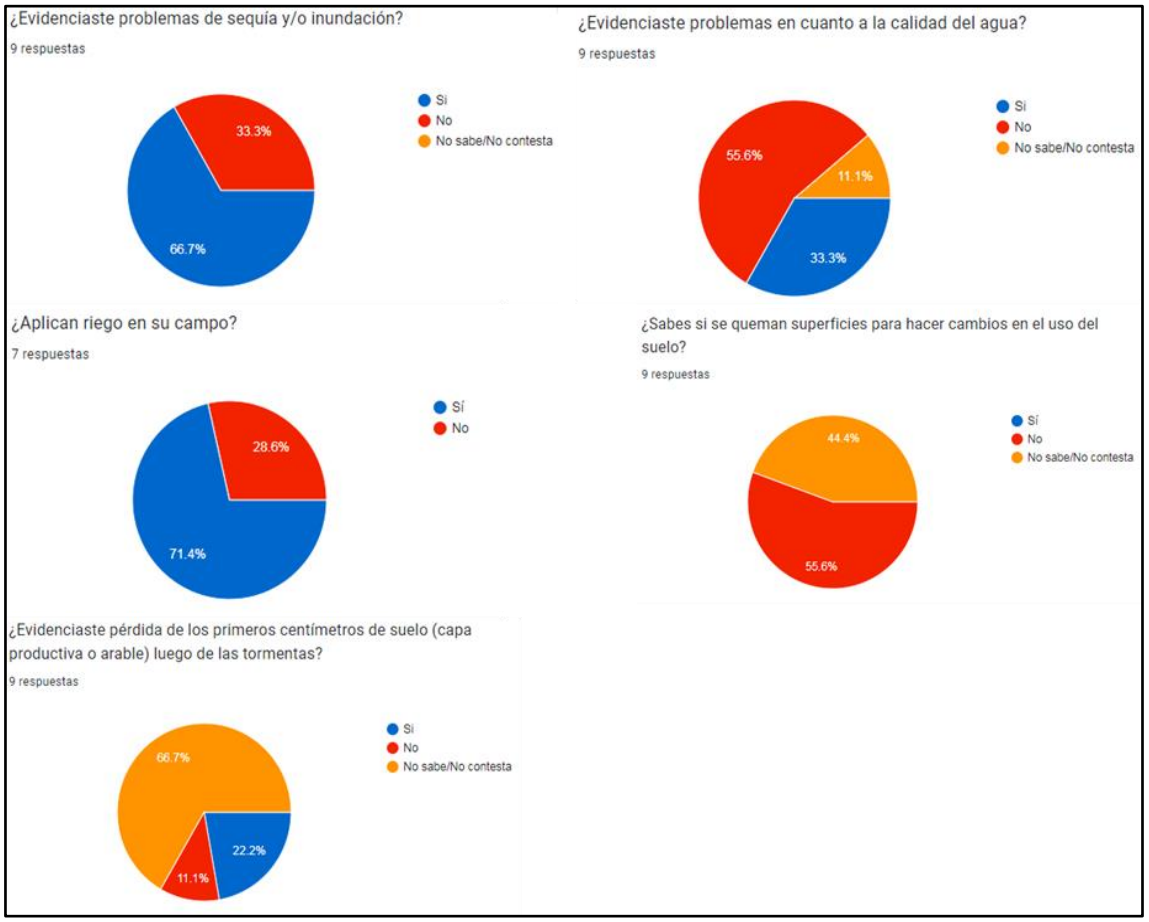

Figura I.1: Gráficos de torta mostrando las respuestas en %. Elaboración propia.

Tabla I.1: Número de curva según Grupo hidrológico y Cobertura vegetal y/o uso del suelo. Fuente: Gaspari et al., 2013.

Cobertura vegetal y/ó uso del suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94
Cultivos alineados R P	72	81	88	91
Cultivos alineados R B	67	78	85	89
Cultivos alineados C P	70	79	84	88
Cultivos alineados C B	65	75	82	86
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%	48	67	77	83
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%	35	56	70	77
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
Montes con pastos P	45	66	77	83
Montes con pastos R	36	60	73	79
Montes con pastos B	25	55	70	77
Bosques MP	56	75	86	91
Bosques P	46	68	78	84
Bosques R	36	60	70	76
Bosques B	26	52	63	69
Bosques MB	15	44	54	61
Prados permanentes	30	58	71	78
Pastizal P	68	79	86	89
Pastizal R	49	69	79	84
Pastizal B	39	61	74	80
Pastizal C P	47	67	81	88
Pastizal C R	25	59	75	83
Pastizal C B	6	35	70	79
Residencial baja densidad	54	70	80	85
Residencial alta densidad	77	85	90	92
Superficies impermeables	98	98	98	98
Espejos de agua	0	0	0	0

R: Laboreo sin prácticas de conservación
C: Curvas de nivel
C-T: Curvas de nivel y Terrazas abiertas
MP: Condición de infiltración muy pobre

P: Condición de infiltración pobre
M: Condición de infiltración regular
B: Condición de infiltración buena
MB: Condición de infiltración muy buena

Tabla I.2: Números de curva del Escenario a según GeoQ - tormenta 1 (40,2 mm). Elaboración propia.

GH	Cod_Sue	Vegetación	Cod_Veg	PP(mm)	Area_ha	Cod_NC	NC
B	2	Montes con pastos	250	40,2	77,2	252	55
B	2	Vegas de ríos	200	40,2	16,55	202	67
B	2	Cultivos densos	170	40,2	3449,9	172	69
C	3	Montes con pastos	250	40,2	425,52	253	70
B	2	Cultivos no alineados	110	40,2	1151,97	112	73
B	2	Riego	50	40,2	82,67	52	75
D	4	Montes con pastos	250	40,2	0,43	254	77
C	3	Vegas de ríos	200	40,2	343,46	203	77
C	3	Cultivos densos	170	40,2	20741,96	173	78
B	2	Suelos pedregosos	320	40,2	192,76	322	79
C	3	Cultivos no alineados	110	40,2	3956,1	113	81
C	3	Riego	50	40,2	184,18	53	82
D	4	Vegas de ríos	200	40,2	4,34	204	83
D	4	Cultivos densos	170	40,2	120,41	174	83
D	4	Cultivos no alineados	110	40,2	2,07	114	84
C	3	Suelos pedregosos	320	40,2	2020,85	323	86
D	4	Suelos pedregosos	320	40,2	313,35	324	89

Tabla I.3: Números de curva del Escenario b según GeoQ - tormenta 1 (40,2 mm). Elaboración propia.

GH	Cod_Sue	Vegetación	Cod_Veg	PP(mm)	Area_ha	Cod_NC	NC
B	2	Monte con pastos	250	40,2	76,82	252	55
B	2	Cultivos no alineados	190	40,2	1841,19	192	67
B	2	Vegas de ríos	200	40,2	16,55	202	67
B	2	Cultivos densos	170	40,2	2779,54	172	69
C	3	Monte con pastos	250	40,2	425,52	253	70
B	2	Riego	50	40,2	82,67	52	75
C	3	Cultivos no alineados	190	40,2	8048,39	193	76
C	3	Vegas de ríos	200	40,2	343,46	203	77
D	4	Monte con pastos	250	40,2	0,43	254	77
C	3	Cultivos densos	170	40,2	16652,79	173	78
B	2	Suelos pedregosos	320	40,2	192,76	322	79
D	4	Cultivos no alineados	190	40,2	6,05	194	80
C	3	Riego	50	40,2	184,18	53	82
D	4	Cultivos densos	170	40,2	116,47	174	83
D	4	Vegas de ríos	200	40,2	4,34	204	83
C	3	Suelos pedregosos	320	40,2	2020,84	323	86
D	4	Suelos pedregosos	320	40,2	313,35	324	89

Tabla I.4: Números de curva del Escenario c según GeoQ - tormenta 1 (40,2 mm). Elaboración propia.

GH	Cod_Sue	Vegetación	Cod_Veg	PP(mm)	Area_ha	Cod_NC	NC
B	2	Montes con pastos	250	40,2	77,2	252	55
B	2	Vegas de ríos	200	40,2	16,55	202	67
C	3	Montes con pastos	250	40,2	425,52	253	70
B	2	Riego	50	40,2	82,67	52	75
C	3	Vegas de ríos	200	40,2	343,46	203	77
D	4	Montes con pastos	250	40,2	0,43	254	77
B	2	Suelos pedregosos	320	40,2	192,76	322	79
B	2	Cultivos densos	20	40,2	4601,88	22	81
C	3	Riego	50	40,2	184,18	53	82
D	4	Vegas de ríos	200	40,2	4,34	204	83
C	3	Suelos pedregosos	320	40,2	2020,85	323	86
C	3	Cultivos densos	20	40,2	24698,06	23	88
D	4	Suelos pedregosos	320	40,2	313,35	324	89
D	4	Cultivos densos	20	40,2	122,48	24	91

El modelo de cuenca se observa en la Figura I.1. Allí se detallan los ríos (líneas azules más gruesas), conexiones (líneas grises) y la salida. Las subcuencas 1, 2 y 3 desembocan en el Río 1; las subcuencas 4 y 5 lo hacen en el Río 2; las 6 y 7 en el Río 3; las subcuencas 10 y 11 desembocan en el Río 4 y las subcuencas 8, 9 y 12 lo hacen en el Río 5, y por último, la subcuenca 13 lo hace en la salida.

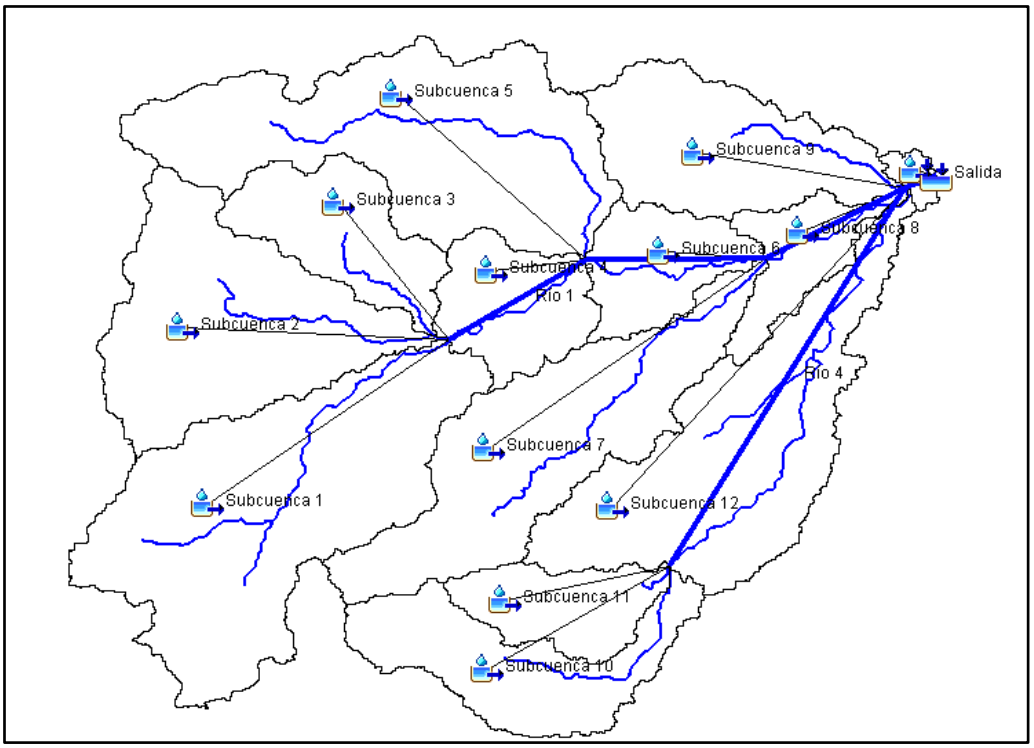

Figura I.2: Modelo de cuenca realizado en HEC-HMS. Elaboración propia.

Tabla I.5: Valores de Manning. Fuente VEN TE CHOW, 1994.

D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	**0.030**	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de *n* es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	.....	0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035	.....	0.100

Con la tabla anterior se determinó el número de Manning de cada río. Hay tres valores ya que dos corresponden al margen izquierdo y derecho, mientras que el valor del medio corresponde al lecho. Además se encuentran los datos de longitud (en metros) y pendiente (en metro/metro) de los ríos y la subcuenca por la cual corren (Tabla I.6).

Tabla I.6: Valores de Manning asignados a los ríos. Elaboración propia.

			Manning		
	Longitud (m)	**S (m/m)**	**Izquierda**	**n**	**Derecha**
Río 1 (subcuenca 4)	5300	0,00264	0,1	0,05	0,1
Río 2 (subcuenca 6)	5760	0,00243	0,03	0,05	0,03
Río 3 (subcuenca 8)	4870	0,00205	0,03	0,04	0,03
Río 4 (subcuenca 12)	15550	0,00212	0,05	0,04	0,05
Río 5 (subcuenca 13)	885	0,00011	0,1	0,05	0,1

Para determinar la sección transversal de los ríos, se tomaron datos de profundidad y ancho del cauce, en distintos puntos de la cuenca (Figura I.3). Cada punto tiene el mismo número que el río establecido mediante el software, es decir, el Punto 1 corresponde al Río 1 y se encuentra en la subcuenca 4, y así con todos los demás.

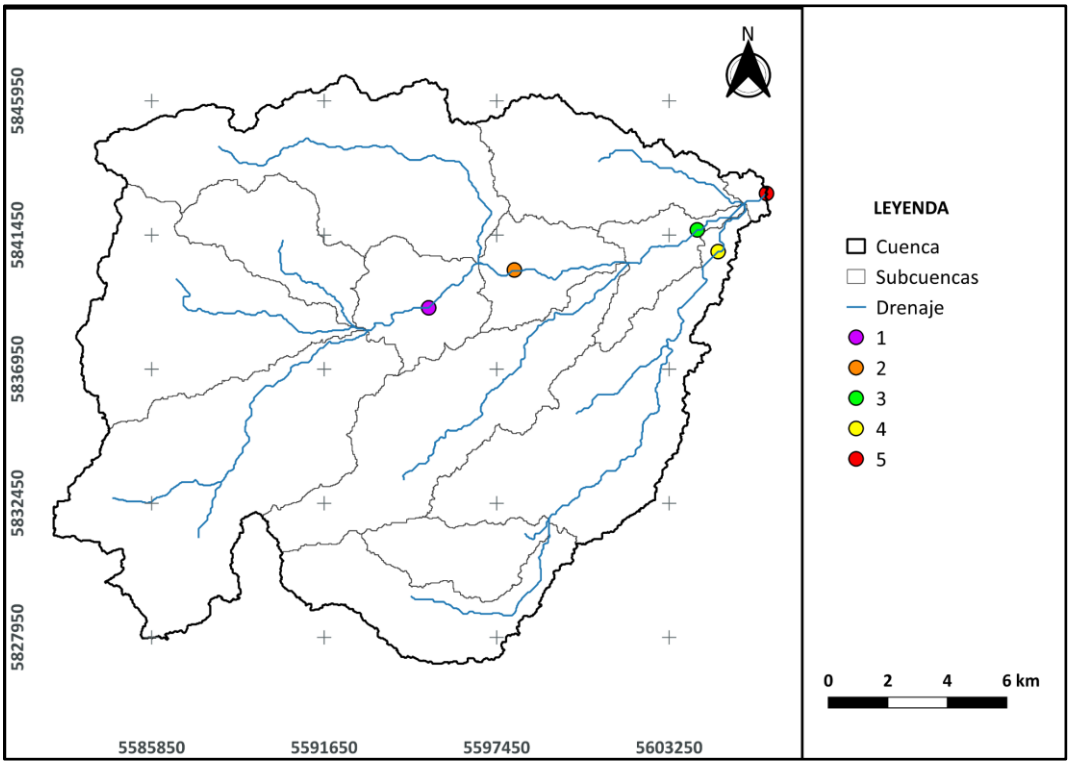

Figura I.3: Puntos de muestreo analizados. Elaboración propia.

Para entender la elección de los valores de Manning a continuación se muestran fotos de los ríos con características en cuanto a su rugosidad, junto a la sección

transversal de los mismos ya que es otro dato necesario a cargar en el software (Figuras I.4 a I.8).

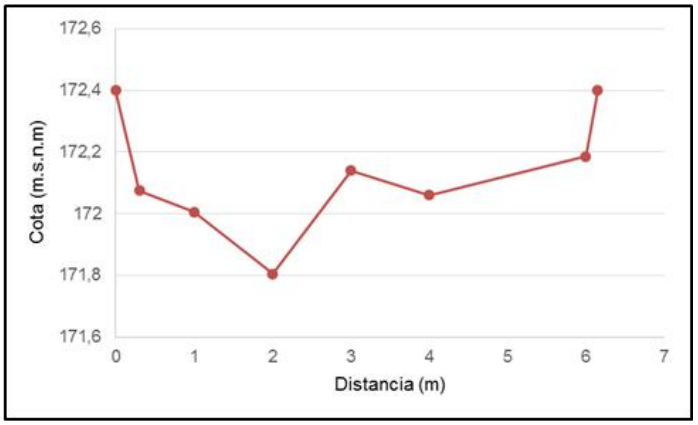

Figura I.4: A la derecha, Río 1, Naciente A° Napaleofú. Fuente: Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, año 2022. A la izquierda, sección transversal del río. Fuente: Anselmino et al., 2022.

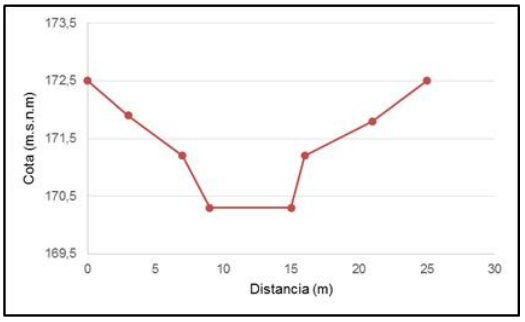

Figura I.5: A la derecha, Río 2, Naciente A° Napaleofú. Fuente: Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, año 2022. A la izquierda, sección transversal del río. Fuente: Anselmino et al., 2022.

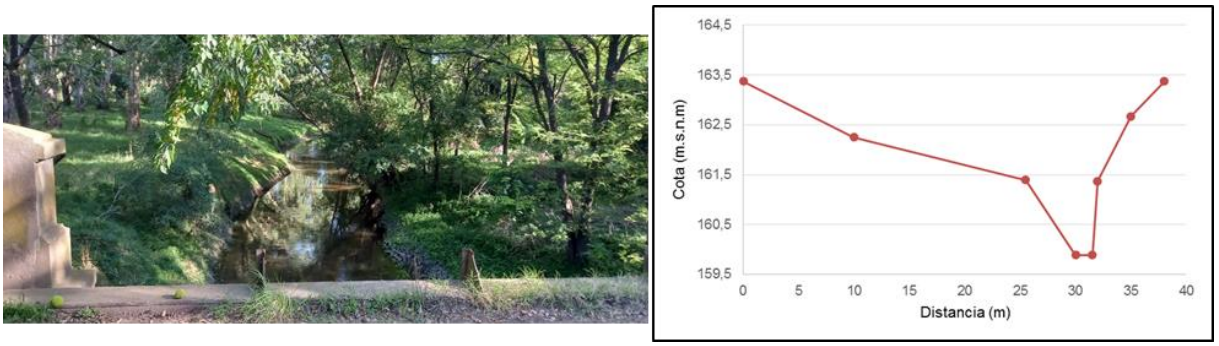

Figura I.6: A la derecha, Río 3, A° Napaleofú. Fuente: Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, año 2022. A la izquierda, sección transversal del río. Fuente: Anselmino et al., 2022.

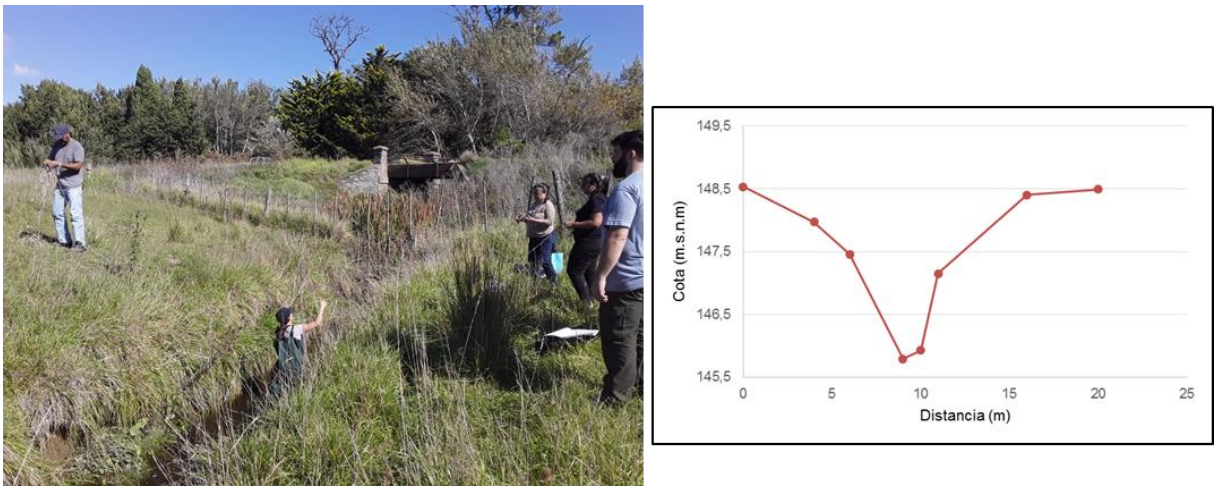

Figura I.7: A la derecha, Río 4, A° Ballenera. Fuente: Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, año 2022. A la izquierda, sección transversal del río. Elaboración propia.

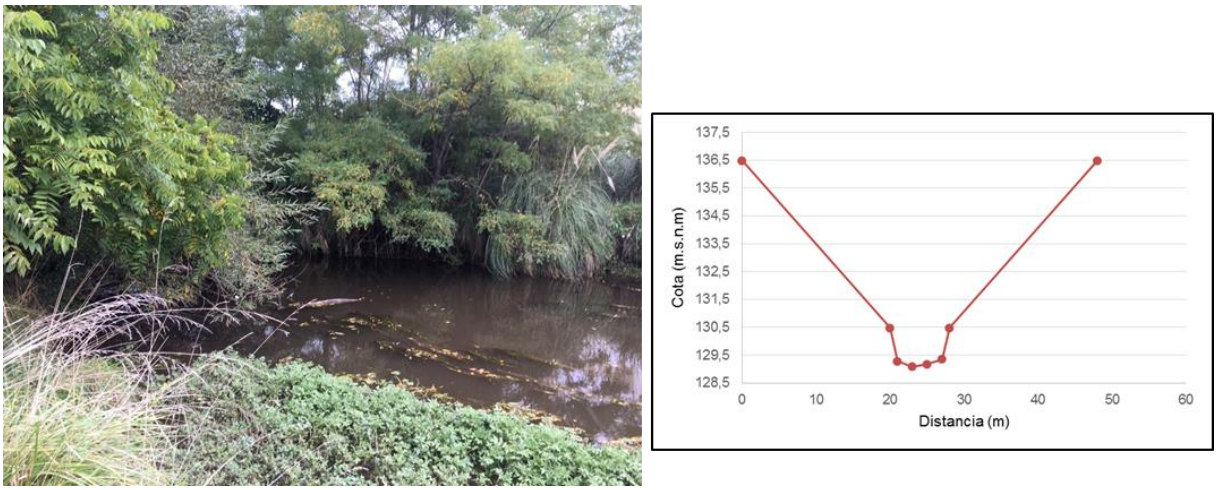

Figura I.8: A la derecha, Río 5, A° Napaleofú, Ruta 226. (Fuente: Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, año 2022). A la izquierda, sección transversal del río. Fuente: Anselmino et al., 2022.

En las Tablas I.7, I.8 y I.9 se observan los caudales (m^3/s) y volúmenes (1000 m^3) erogados en cada subcuenca, río y salida para cada combinación tormenta-escenario. Además se detalla la superficie de cada elemento hidrológico y el NC ponderado por subcuenca.

Tabla I.7: Corrida con HEC-HMS para la tormenta de 40,2 mm. Elaboración propia.

		Escenario a			Escenario b			Escenario c		
Elemento hidrológico	**Área (km²)**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**
Subcuenca 1	56,1	79	13,5	424,3	77	11,8	348,2	86	24,6	780,5
Subcuenca 2	37,3	79	10,1	282,2	76	8,2	208,6	86	18,3	519
Subcuenca 3	16,1	77	4,8	99,9	77	4,8	99,9	86	10,3	224
Río 1	109,5		26,6	806,5		23,2	657		48,8	1522,7
Subcuenca 5	48,2	79	11,2	364,5	77	7,8	295,3	86	20,5	670,4
Subcuenca 4	13,7	78	3,9	94,0	78	3,9	94	87	8,8	206,5
Río 2	171,4		40,1	1264,4		33,1	1043,2		75,4	2401,6
Subcuenca 7	37,2	78	8,1	255,3	77	7,5	230,8	87	17,5	560,4
Subcuenca 6	12,1	78	3,3	83,1	77	3,1	75,1	86	6,7	168,3
Río 3	220,7		48,7	1602,4		41	1345		97,6	3130,4
Subcuenca 12	42,6	76	6,9	237,1	76	6,9	237,1	87	17,6	640
Subcuenca 10	21	77	5,2	130,4	77	5,2	130,4	87	12	316,5
Subcuenca 11	11,4	78	4,6	78,3	77	4,3	70,8	88	11,9	185,8
Río 4	32,4		8,1	207,9		7,9	199,9		18,4	497,5
Subcuenca 9	24,3	76	5,6	135,9	74	4,8	108,8	85	11	311,7
Subcuenca 8	9,4	77	2,6	58,3	77	2,6	58,3	86	5,4	130,8
Río 5	329,4		62,6	2155,6		54,5	1870,2		136,9	4603,3
Subcuenca 13	1,6	77	0,5	9,9	77	0,5	9,9	87	1,2	24,1
Salida	331		62,7	2165,5		54,6	1880,1		137,5	4627,4

Tabla I.8: Corrida con HEC-HMS para la tormenta de 74,4 mm. Elaboración propia.

		Escenario a			Escenario b			Escenario c		
Elemento hidrológico	**Área (km²)**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**
Subcuenca 1	56,1	79	104,2	1620	77	93,8	1456,6	86	146	2282,6
Subcuenca 2	37,3	79	80,9	1077,1	76	69	916,7	86	113,5	1517,7
Subcuenca 3	16,1	77	41,7	418,0	77	41,7	418	86	65,4	655,1
Río 1	109,5		211,8	3110,1		189,7	2786,7		303,8	4451,1
Subcuenca 5	48,2	79	85	1391,9	77	51,6	1250,6	86	119,6	1961,2
Subcuenca 4	13,7	78	33,4	375,3	78	33,4	375,3	87	51,4	583,7
Río 2	171,4		318,5	4873,4		248,8	4411,8		452,2	6987,6
Subcuenca 7	37,2	78	62,6	1019,2	77	59,3	965,9	87	97	1584,9
Subcuenca 6	12,1	78	28,6	331,5	77	27,2	314,2	86	42,3	492,3
Río 3	220,7		397,3	6218,4		321,5	5682,4		580,9	9058,6
Subcuenca 12	42,6	76	51,1	1047,0	76	51,1	1047	87	88,2	1815
Subcuenca 10	21	77	43,6	545,3	77	43,6	545,3	87	71,8	894,7
Subcuenca 11	11,4	78	40,5	312,3	77	38,4	296	88	65,9	508,3
Río 4	32,4		68	864,5		66,8	850,8		112,8	1413,6
Subcuenca 9	24,3	76	47,4	597,2	74	42,2	533	85	75,2	943,7
Subcuenca 8	9,4	77	21,9	244,1	77	21,9	244,1	86	34,1	382,5
Río 5	329,4		536,3	8818,7		456,1	8226		827,4	13398,9
Subcuenca 13	1,6	77	4,3	41,5	77	4,3	41,5	87	7,1	68,2
Salida	331		538,2	8860,3		458	8267,5		830,3	13467,1

Tabla I.9: Corrida con HEC-HMS para la tormenta de 149,4 mm. Elaboración propia.

		Escenario a			Escenario b			Escenario c		
Elemento hidrológico	**Área (km²)**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**	**NC**	**Caudal**	**Volumen**
Subcuenca 1	56,1	79	337,6	5093,2	77	319	4810,8	86	405,5	6123,4
Subcuenca 2	37,3	79	266	3386,4	76	244,1	3106,1	86	319,2	4071,3
Subcuenca 3	16,1	77	142,8	1380,6	77	142,8	1380,6	86	181,2	1757,3
Río 1	109,5		690,6	9860,8		650,3	9299,5		840,6	11954,7
Subcuenca 5	48,2	79	272,9	4376,0	77	172	4115,5	86	328,3	5261,1
Subcuenca 4	13,7	78	114,3	1209,2	78	114,3	1209,2	87	144,5	1532,6
Río 2	171,4		1036,4	15448,8		845,3	14620,4		1254,2	18753,3
Subcuenca 7	37,2	78	205,9	3283,3	77	200,1	3190,1	87	261,1	4161,5
Subcuenca 6	12,1	78	96,5	1067,9	77	93,7	1037,6	86	119,4	1320,7
Río 3	220,7		1307,3	19814,2		1106,8	18855,8		1601,1	24243,2
Subcuenca 12	42,6	76	175,5	3546,0	76	175,5	3546	87	235,7	4763,8
Subcuenca 10	21	77	148,6	1800,8	77	148,6	1800,8	87	193	2349,2
Subcuenca 11	11,4	78	136,2	1006,2	77	132,6	977,6	88	175,4	1306,6
Río 4	32,4		234,3	2792,5		232,1	2756,3		312,3	3661,9
Subcuenca 9	24,3	76	166,3	2023,5	74	156,7	1904,6	85	211,3	2586,9
Subcuenca 8	9,4	77	77,2	806,1	77	77,2	806,1	86	98	1026
Río 5	329,4		1850	28644,9		1648,4	27560,6		2307	35918,6
Subcuenca 13	1,6	77	15	137,2	77	15	137,2	87	19,6	179
Salida	331		1857,1	28782,1		1655,5	27697,8		2315,9	36097,6