



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería
DEPTO. DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEO

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA
LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Análisis de los caudales de diseño en relación a
los parámetros de modelación en el área
hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la
Sierra Negra

Alumno: Ortiz, Lautaro Maximiliano

Legajo: ING – 8637

DNI: 41591242

Director: Lic. Gatica, José Ricardo

Co-directora: Dra. Dufilho, Ana Cecilia

Neuquén, abril 2024

RESUMEN

En los últimos años la actividad relacionada a la extracción de hidrocarburos ha crecido rápidamente en la provincia del Neuquén. Si bien son recursos vitales para el desarrollo de la humanidad, es cierto que las actividades son generadoras de impactos ambientales significativos. El área hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra ubicada en el sector Nororiental de la provincia y dentro de la denominada Región Extrandina, se encuentra sometida a la generación de grandes caudales por lluvias intensas y esporádicas y debido a la presencia de cuencas aluviales de gran tamaño. El objetivo principal de este trabajo final de licenciatura consiste en determinar la influencia que tienen los parámetros de escorrentía sobre los caudales de diseño generados por las cuencas aluviales que abarcan los yacimientos de interés, a través de la caracterización de las mismas, estimación de caudales máximos para periodos de retorno de 100 años, modelaciones hidrológicas y cálculos de sensibilidad.

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo involucró el uso de un Modelo de Elevación Digital con una resolución espacial de 30 m por pixel, delimitación y caracterización de cuencas aluviales mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica, confección de mapas base para la generación de un mapa de Curva Número, estimación de caudales máximos a través del *software* HEC – HMS y la utilización de cálculos de índices y tasas para el análisis de sensibilidad.

Se delimitaron un total 18 cuencas, eligiendo para el estudio de detalle a la Cuenca Mayor por ser la cuenca de mayor área (701, 43 km²) y por presentar el mayor impacto de movimiento de suelo debido a la existencia de instalaciones relacionadas a la extracción de hidrocarburos como locaciones, plantas industriales, pistas de ductos y caminos que desequilibran la dinámica natural, con el consecuente aumento de los escurrimientos superficiales.

Se proponen cuatro modelos meteorológicos en la cuenca para estimar los caudales máximos. Las tormentas de diseño tienen 20 km de diámetro, son de forma circular y cada una tiene una posición distinta de la otra. Gracias a este método se determina que sector de la cuenca provoca la situación más desfavorable.

Los resultados indican que la tormenta ubicada en el sector Sureste de la cuenca provoca la situación más desfavorable debido a la generación de grandes caudales. Los cálculos del índice ROV muestran que la variación del CN influye más en el sector Suroeste que en el resto de la cuenca. Los valores de las tasas de cambio reflejan que la cuenca presenta un comportamiento diferente ante aumentos y disminuciones de este parámetro. Se concluye que los parámetros morfométricos, de relieve y relativos a la red de drenaje de las cuencas controlan los caudales generados a pesar de las variaciones en el CN.

En función del análisis del comportamiento de la cuenca, se realizaron las recomendaciones pertinentes para la disminución de los caudales generados y para la atenuación de los mismos.

Palabras claves: cuenca mayor, modelación hidrológica, curva número, sistemas de información geográfica, sensibilidad.

ABSTRACT

In recent years, the activity related to oil extraction has grown rapidly in the Neuquén province. Although they are vital resources for the development of humanity, it is true that their activities generate significant environmental impacts. The site “Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra” located in the northeastern sector of the province and within the “Extrandina” región, is subject to the generation of large flows during extreme rainfall events and due to the presence of large alluvial basin. The main objective of this final degree project is to determine the influence of runoff parameters on the design flows generated by the alluvial basins covering the sites of interest, through their characterization, estimation of maximum flows for a return period of 100 years, hidrologyc modeling and sensitivity calculations.

The methodology used for the development of the work involved the use of a Digital Elevation Model with a spatial resolution of 30 m pixel, delimitation and characterization of a alluvial basins through the use of Geographic Information Systems, preparation of a base maps for the generation of an “Curva Número” map, estimation of máximum flows through the HEC – HMS software and the use of index and rate calculation for sensitivity análisis.

A total of 18 basins were delimited, choosing the “Cuenca Mayor” for the detailed study for being the basin with de major area (701, 43 km²) and for having the greatest impact on soil movement due to the existence of facilities related to oil extraction such as locations, industrial plants, pipeline tracks and roads that unbalance the natural dynamics, with the consequent increase in flows.

Four meteorological model are proposed in the “Cuenca Mayor” to estimate peak flows. The design storms are 20 km in diameter, circular in shape and each has a different position in the basin from the other. Thanks to this method, it is determined which sector of the basin causes the most unfavorable situation.

The results indicate that the storm located in the Southeastern sector of the basin causes the most unfavorable situation due to the generation of large flows. The ROV index calculations show that the variation of the CN has a greater influence in the Southwest sector than in the rest of the basin. The values of the rates of change reflect that the basin shows a different behavior when the CN varies. It is concluded that the morphometric, relief and drainage network parameters of the basins control the flows generated even when the CN changes.

Based on the analysis of the basin's behavior, the pertinent recommendations were made to reduce and attenuate the flows generated.

Keywords: big basin, hidrologyc modelation, number of curve, geographic information systems, sensibility.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mis directores Jose y Cecilia por su apoyo, confianza, paciencia y tiempo que me han dedicado. Por siempre estar predispuestos y aportar valiosas ideas.

Al jurado de esta tesis, sus observaciones y sugerencias permitieron mejorar y ordenar el presente trabajo.

A la educación pública de mi país que me formo como persona y como profesional.

A mi mamá Valeria y a mi papá Carlos, por su apoyo incondicional, esfuerzo y sacrificio para que pueda estudiar. Todo lo que soy se lo debo a ellos.

A mis abuelos Juan y Alicia, mis tíos Matías y Lucas por su amor permanente.

A Ingrid y a Marcelo, por el acompañamiento todos estos años.

A mis hermanos y primos.

A los amigos de la facultad y a los amigos de la vida.

A todos los profesores de la Universidad Nacional del Comahue, mi más sincero agradecimiento por haber contribuido a mi formación.

A todos, gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo General.....	4
1.2 Objetivos específicos	4
2 ANTECEDENTES	5
2.1 Estudios relacionados con las temáticas abordadas.....	5
2.2 Utilización de los SIG en la modelación hidrológica	6
2.3 Análisis de sensibilidad	7
3 ÁREA DE ESTUDIO	8
3.1 Características climáticas	8
3.2 Suelos.....	9
3.3 Geomorfología	17
3.4 Vegetación	18
3.5 Geología	20
3.6 Pendientes	25
3.7 Particularidades socio – ambientales	26
4 MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO.....	29
4.1 Hidrología.....	29
4.1.1 Escorrentía.....	30
4.1.2 Factores climáticos y fisiográficos que afectan la escorrentía.....	31
4.2 La Cuenca y sus características	31
4.2.1 Delimitación de cuencas.....	32
4.2.2 Parámetros principales.....	33
4.2.2.1 Parámetros físicos asociados a la forma de la cuenca	34
4.2.2.2 Parámetros físicos relativos al relieve.....	36
4.2.2.3 Parámetros relativos a la red de drenaje.....	37
4.3 Modelación de cuencas	38
4.3.1 Hidrogramas	38
4.3.1.1 Hidrograma unitario.....	40
4.3.1.2 Tránsito de Ondas en Ríos.....	40

4.3.2	Método del Servicio de Conservación de Suelos (Numero de Curva).....	41
4.3.3	Tormentas de diseño	44
4.3.3.1	Datos de precipitación	46
4.4	Sistemas de Información Geográfica	46
4.4.1	Álgebra de mapas	47
4.4.2	Procedimientos en el entorno SIG.....	50
4.4.2.1	Estimación de la distribución espacial del CN con técnicas SIG.....	50
4.5	Modelación Hidrológica	55
4.5.1	Modelo HEC – HMS	55
4.6	Análisis de Sensibilidad	57
4.6.1	Enfoque del análisis de sensibilidad	57
4.6.1.1	Evaluación de la sensibilidad del modelo	58
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
5.1	Delimitación y caracterización de cuencas	60
5.1.1	Cuencas Principales – Yac. PH y Chih. de la Sierra Negra.	63
5.1.1.1	Parámetros morfométricos y de relieve	63
5.1.1.2	Parámetros relativos a la red de drenaje	64
5.1.2	Cuenca Mayor (Subcuencas) – Yac. PH y Chih. de la Sierra Negra.....	65
5.1.2.1	Parámetros morfométricos y de relieve	65
5.1.2.2	Parámetros relativos a la red de drenaje	66
5.2	Estimación de la distribución espacial del CN con técnicas SIG.....	67
5.3	Modelación Hidrológica (HEC-HMS)	76
5.4	Análisis de Sensibilidad	79
5.4.1	Variaciones del CN y Simulaciones HEC-HMS (Salida - Cuenca Mayor).....	79
5.4.1.1	Índice ROV. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Salida – Cuenca Mayor).....	84
5.4.1.2	T. de Cambio. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Salida – Cuenca Mayor)	85
5.4.2	Variaciones del CN y Simulaciones HEC-HMS (Subcuencas – Cuenca Mayor)	87
5.4.2.1	Índice ROV. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Subcuencas – Cuenca Mayor).....	95
5.4.2.2	T. de Cambio. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Subcuencas-Cuenca Mayor)	100
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
7	BIBLOGRAFÍA	107
8	ANEXOS	111
8.1	Hidrogramas de Salida – Cuenca Mayor (Variaciones del CN base)	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Yacimientos Puesto Hernández y Chihuido de la Sierra Negra.	3
Figura 2. T° media anual (° C) y precipitación media anual (mm) (FAO, 2015).	8
Figura 3. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 35 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	10
Figura 4. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 45-46 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	11
Figura 5. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 56 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	12
Figura 6. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 57 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	13
Figura 7. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 61 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	14
Figura 8. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 63 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	15
Figura 9. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 69 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).	16
Figura 10. Mapa geomorfológico de la provincia del Neuquén (Dufilho et al., 2002).	18
Figura 11. Vegetación típica del área de estudio (Perilli, 2006).	19
Figura 12. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Garrido, 2011).	21
Figura 13. Mapa de las unidades cenozoicas aflorantes en la sierra de Huantraico-sierra Negra (modificado de Garrido et al. 2012).	23
Figura 14. Clases de gradiente de pendiente (FAO, 2009).	25
Figura 15. Línea de conducción sin defensa aluvional dentro de cauce (Fuente: coirco.gov.ar). 26	
Figura 16. Línea de conducción con defensa aluvional mal diseñada dentro de cauce (Fuente: coirco.gov.ar)	26
Figura 17. Ejemplo de posible afectación a instalación petrolera por crecidas en Yacimiento Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (YPF S.A).	28
Figura 18. El ciclo hidrológico y sus fases (Fattorelli y Fernández, 2011).	29
Figura 19. Cuenca vertiente, sección de cierre y divisoria de aguas (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).	32
Figura 20. Curvas hipsométricas patrones (Brieva, 2018).	36
Figura 21. Componentes del hidrograma (Fatorelli y Fernández, 2011).	39
Figura 22. Efectos del traslado de un hidrograma en un tramo AB de un río (Fatorelli y Fernández, 2011).	41
Figura 23. Distribución temporal de la tormenta utilizada para este trabajo final (Hietograma).	45
Figura 24. Sumatoria de capas ráster o capas de datos y sus resultados.	48
Figura 25. Sumatoria del mapa de precipitaciones, vientos y temperaturas. Dando como resultado un mapa de susceptibilidad al cambio climático de una zona (Fuente: geoinnova.org).	48

Figura 26. Nueva capa de la variable “A” luego de la combinación de las cinco variables de la ecuación (Olaya, 2020).....	49
Figura 27. Pérdidas medias en cada subcuenca obtenidas luego de aplicar álgebra de mapas sobre los mapas de subcuencas y de pérdidas de suelo generales (Olaya, 2020).	50
Figura 28. Flujograma cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN (Burgos et al., 2018).....	51
Figura 29. Parámetros de ruteo según Muskingum para cada uno de los tramos (Reachs).	56
Figura 30. Delimitación de cuencas y red de drenaje del área de estudio.....	61
Figura 31. Delimitación de subcuencas (Cuenca Mayor) y sus cauces principales. Notar la cercanía de la salida de la cuenca a la Ruta Provincial 6 y al valle del Río Colorado.....	62
Figura 32. Mapa de Cobertura Vegetal del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).....	69
Figura 33. Mapa de Tipos de Suelo del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).....	70
Figura 34. Mapa Geomorfológico del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).	71
Figura 35. Mapa de Grupo Hidrológico de Suelo (GHS) del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).....	72
Figura 36. Mapa de pendientes del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).	73
Figura 37. Mapa de Curva Numero para las cuencas principales del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).....	74
Figura 38. Mapa de Curva Numero para la Cuenca Mayor. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).....	75
Figura 39. Posiciones de las cuatro tormentas utilizadas en el modelo (NW, SW, NE y SE) y esquema de las subcuencas consideradas en el estudio. Además, se puede observar las conexiones entre las subcuencas.	76
Figura 40. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR).	77
Figura 41. Caudales pico (m ³ /s) para cada una de las posiciones de la tormenta de diseño en función de las variaciones del Número de Curva.	82
Figura 42. Volúmenes de escorrentía (mm) para cada una de las posiciones de la tormenta de diseño en función de las variaciones del Número de Curva.	82
Figura 43. Variaciones del CN y tasas de cambio en función de los caudales pico para las distintas posiciones de la tormenta de diseño.....	86
Figura 44. Variaciones del CN y tasas de cambio en función de los volúmenes de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño	86
Figura 45. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN aumento del 5%.....	111
Figura 46. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN aumento del 10%.....	112
Figura 47. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 5%.	113
Figura 48. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 5%.	114

Figura 49. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 15%.	115
Figura 50. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 20%.	116
Figura 51. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 30%.	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formas de la cuenca según valores aproximados (Brieva, 2018).	35
Tabla 2. Clasificación de suelos según el potencial de escurrimiento (Fatorelli y Fernández, 2011).	43
Tabla 3. Valores de precipitaciones para una recurrencia de 100 años en Estación Rincón de los Sauces (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén).....	46
Tabla 4. Tabla de doble entrada para la asignación de CN _{II} Burgos et al., (2008).	54
Tabla 5. Tabla de resultados del cruzamiento espacial de números primos.	54
Tabla 6. Parámetros morfométricos y de relieve principales de las cuencas del área de estudio.	63
Tabla 7. Parámetros relativos a la red de drenaje más importantes para cada cuenca del área de estudio. N/A: No aplica. Tc (hs) SCS utiliza valor de CN del caso base.	64
Tabla 8. Parámetros morfométricos y de relieve principales de las subcuencas de la Cuenca Mayor.....	65
Tabla 9. Parámetros relativos a la red de drenaje más importantes para cada subcuenca de la Cuenca Mayor. N/A: No aplica. Tc (hs) SCS utiliza valor de CN del caso base.	66
Tabla 10. Valores medios ponderados de CN y abstracciones iniciales para cada una de las cuencas del área de estudio.	67
Tabla 11. Valores medios ponderados de CN y abstracciones iniciales para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor.....	68
Tabla 12. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Caso Base. RUN: Simulación/Corrida.....	77
Tabla 13. Resultados obtenidos (caudales máximos y volúmenes de escorrentía) para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño (100TR). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	78
Tabla 14. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN aumento 5% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	79
Tabla 15. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN aumento 10% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	79
Tabla 16. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 5% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	80
Tabla 17. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 10% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	80

Tabla 18. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 15% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	80
Tabla 19. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 20% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	80
Tabla 20. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 30% del original. RUN: Simulación/Corrida.....	81
Tabla 21. Caudales pico (m ³ /s) para cada una de las variaciones de CN y posiciones de tormenta. Los valores de 1.10, 1.05, 1.00 (CASO BASE), 0.95, 0.90, 0.85, 0.80 y 0.70 corresponden a los porcentajes de variación con respecto al CN base. Los valores fueron redondeados por simplificación para el cálculo.....	81
Tabla 22. Volúmenes de escorrentía (mm) para cada una de las variaciones de CN y posiciones de tormenta. Los valores de 1.10, 1.05, 1.00 (CASO BASE), 0.95, 0.90, 0.85, 0.80 y 0.70 corresponden a los porcentajes de variación con respecto al CN base. Los valores fueron redondeados por simplificación para el cálculo.....	81
Tabla 23. Índice ROV para Caudales Pico a la salida de la Cuenca Mayor. CB: Caso Base.	84
Tabla 24. Índice ROV para Volúmenes de Escorrentía a la salida de la Cuenca Mayor. CB: Caso Base.	84
Tabla 25. Tasas de cambio para caudales pico a la salida de la Cuenca Mayor en función de las posiciones de la tormenta de diseño.	85
Tabla 26. Tasas de cambio para volúmenes de escorrentía a la salida de la Cuenca Mayor en función de las posiciones de la tormenta de diseño.....	85
Tabla 27. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN AUMENTO 5% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	88
Tabla 28. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN AUMENTO 10% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	89
Tabla 29. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 5% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	90
Tabla 30. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 10% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	91
Tabla 31. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 15% RESPECTO AL	

BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	92
Tabla 32. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 20 % RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	93
Tabla 33. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 30 % RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.....	94
Tabla 34. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía. Subcuencas - Cuenca Mayor. CN aumento del 5% respecto al base.....	96
Tabla 35. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía. Subcuencas - Cuenca Mayor. CN aumento del 10% respecto al base.....	96
Tabla 36. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 5% respecto al base.	97
Tabla 37. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 10% respecto al base.	97
Tabla 38. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 15% respecto al base.	98
Tabla 39. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 20% respecto al base.	98
Tabla 40. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 30% respecto al base.	99
Tabla 41. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN aumento 5% respecto al base.....	100
Tabla 42. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN aumento 10% respecto al base.	101
Tabla 43. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 5% respecto al base.	101
Tabla 44. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 10% respecto al base.	102
Tabla 45. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 15% respecto al base.	102
Tabla 46. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 20% respecto al base.	103
Tabla 47. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 30% respecto al base.	103
Tabla 48. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN aumento del 5%. RUN: Simulación/Corrida.	111
Tabla 49. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN aumento del 10%. RUN: Simulación/Corrida.	112
Tabla 50. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 5%. RUN: Simulación/Corrida.....	113

Tabla 51. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 10%. RUN: Simulación/Corrida.....	114
Tabla 52. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 15%. RUN: Simulación/Corrida.....	115
Tabla 53. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 20%. RUN: Simulación/Corrida.....	116
Tabla 54. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 30%. RUN: Simulación/Corrida.....	117

1 INTRODUCCIÓN

En la Patagonia Argentina existen dos ambientes bien diferenciados por su clima y su geomorfología. Por un lado, la meseta extrandina de clima árido, semiárido y relieve moderado y por otro lado la cordillera con mayores precipitaciones y relieves más pronunciados. Las respuestas de estos ambientes a precipitaciones extremas son muy distintas. Mientras que la cordillera es susceptible a fenómenos del tipo “movimiento en masa” dado por el alto contenido de humedad de los suelos y las elevadas pendientes, en la zona arida predominan fenómenos del tipo “aluvional” en cauces secos que esporádicamente transportan agua y gran cantidad de sedimentos (Dufilho *et al.*, 2001).

Los fenómenos del tipo “aluvional” se dan comúnmente en cuencas aluviales de regiones áridas y semiáridas. En estas zonas, son muy frecuentes las crecidas por lluvias intensas y esporádicas, que además de originar desprendimiento y transporte de material pueden acarrear consecuencias graves en áreas de interés. Estas precipitaciones de alta intensidad y de corta duración sumado a las características referidas al suelo, baja cobertura vegetal, actividad antrópica y pendientes, favorecen la escorrentía aumentando los caudales que pueden aportar a las cuencas aluviales. El clima a su vez es un factor muy importante ya que condiciona la existencia de la escasa vegetación y por ende facilita el transporte de grandes volúmenes de material

En los últimos años la actividad relacionada a la extracción de hidrocarburos ha crecido rápidamente en la provincia del Neuquén. Si bien son recursos vitales para el desarrollo de la humanidad, también es cierto que las actividades relacionadas son generadoras de impactos ambientales significativos (Saad y Marizza, 2007). Cuando se seleccionan los sitios para la perforación se procede a la construcción de locaciones, aperturas de caminos y otras infraestructuras que implican el desmonte total de la vegetación del área. La problemática en este caso radica que gran parte de los yacimientos se ubican en zonas áridas y semiáridas de la provincia, donde las precipitaciones son escasas, pero cuando se originan lo hacen con gran intensidad dando lugar a fenómenos aluvionales y de erosión hídrica muy importantes afectando las conducciones y generando riesgos de contaminación. Además, la extracción de la cobertura vegetal le quita soporte al suelo, situación que acelera aún más los procesos erosivos en el área.

Debido a que la actividad hidrocarburífera altera fuertemente el terreno natural con pérdida de cobertura vegetal por movimientos de suelo, el potencial de escorrentía se ve fuertemente alterado, en este caso en aumento. El potencial de escorrentía es una variable con mucha incertidumbre y tiene una fuerte implicancia en la determinación de los caudales que generan las cuencas. Para su determinación se utiliza el Método de Curva Numero (CN) del Servicio de conservación de Suelos (SCS) el cual es un método semiempírico desarrollado en el año 1972 que correlaciona la precipitación total y la precipitación efectiva. Este parámetro adimensional que va de 0 a 100 depende de una serie de factores como el uso de la tierra, pendientes, tipos de suelo (condiciones de infiltración), cobertura vegetal (tipo de plantas) y humedad antecedente lo cual es un factor muy importante a tener en cuenta. Básicamente mientras mayor sea el valor de este parámetro implica altas tasas de escorrentía y bajas tasas de infiltración.

El área hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (Fig.1) ubicadas en el sector Nororiental de la provincia del Neuquén y actualmente en desarrollo, se encuentran sometidas a procesos de escorrentía y generación de grandes caudales debido a la presencia de cuencas aluviales de gran interés en cuanto a riesgo hidrológico.

Las cuencas aluviales del área de estudio presentan ciertas características que potencian o aumentan el potencial erosivo, lo que puede producir impactos ambientales significativos. Predomina generalmente la geomorfología y relieves del tipo volcánico, que se caracteriza por generar cuencas de gran tamaño (7, 20, 40, 130 y hasta 700 km²) lo que provoca grandes caudales por sus elevadas áreas. A su vez, el relieve volcánico genera zonas de escarpa y talud que se caracteriza por presentar pendientes elevadas provocando altas velocidades de escorrentía y por lo tanto aumentos en el potencial erosivo. Los suelos de la zona en general presentan escaso a nulo desarrollo con una acentuada litodependencia, es decir, presentan características similares al material que les dio origen como las rocas basálticas del área. Otro rasgo común es la presencia de concentraciones salinas, yesosas y/o calcárea dado por la escasa oferta pluvial. Generalmente los suelos presentan texturas medias y en menor medida texturas franco – arenosas. Estas características de los suelos sumado a la escasa cobertura vegetal provocan ante las lluvias de gran intensidad y corta duración altas tasas de escorrentías y bajas tasas de infiltración.

Todas estas características físicas que presentan las cuencas del área de estudio, sumado a la intensa actividad hidrocarburífera con extracción de cobertura vegetal, provocan aumentos significativos de los caudales ante lluvias intensas y de corta duración. Esto implicaría a su vez, aumentos en el potencial erosivo provocando impactos ambientales ya que las cuencas del área drenan hacia el valle del Río Colorado (Fig.1).

Gasoductos, oleoductos y plantas industriales se encuentran ubicadas dentro de las cuencas aluviales, de manera aledaña a los cauces o a la salida de las mismas, lo que implica un gran riesgo ante eventos de crecidas extraordinarias (Fig. 17).

En función de lo expuesto, para este Trabajo Final de Licenciatura, se propone estimar y realizar un análisis de sensibilidad de los caudales generados por las cuencas aluviales que abarquen los yacimientos de interés producto de las variaciones de los parámetros que determinan la escorrentía (CN). A su vez y como se mencionaba anteriormente, este mismo parámetro puede verse fuertemente afectado ante variaciones en el uso del suelo como lo es la actividad petrolera.

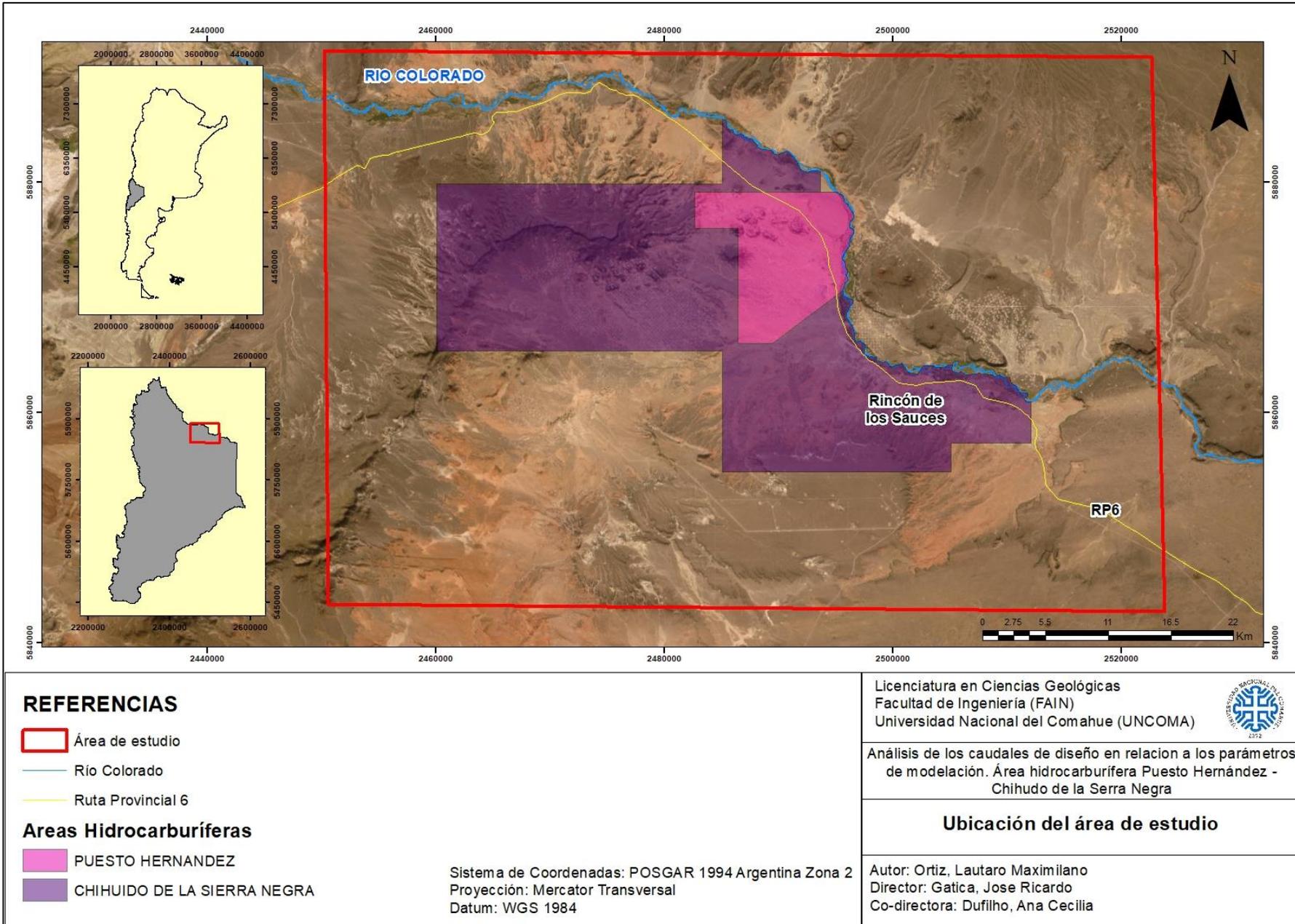


Figura 1. Área de estudio. Yacimientos Puesto Hernández y Chihuido de la Sierra Negra.

La hidrología es una ciencia que trata los fenómenos naturales involucrados en el ciclo hidrológico. El diseño hidrológico a su vez busca interpretar y cuantificar esos fenómenos, con el fin de proporcionar y a través de modelos matemáticos y estadísticos, soporte a estudios, proyectos y obras de ingeniería hidráulica, infraestructura y medio ambiente (Fatorelli y Fernández, 2011).

1.1 Objetivo General

- ✓ Estimar la sensibilidad de los caudales de crecida cuando varían los parámetros de escorrentía en las cuencas aluviales pertenecientes al área hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra.

1.2 Objetivos específicos

- ✓ Analizar los parámetros morfométricos de cuencas y red de drenaje de las mayores cuencas aluviales del área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra.
- ✓ Realizar un mapeo de tipos de suelo y de Grupo Hidrológico de Suelo (GHS) que permitan generar un mapa de CN.
- ✓ Realizar una modelación hidrológica sobre las mayores cuencas del área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra.
- ✓ Realizar análisis de sensibilidad a los parámetros de escorrentía.
- ✓ Simular los diferentes escenarios planteados.

2 ANTECEDENTES

2.1 Estudios relacionados con las temáticas abordadas

Diversos autores han realizado estudios sobre cuencas aluvionales e hidrología relacionado a regiones áridas y semiáridas. En la región uno de los primeros en realizar trabajos sobre cuencas aluvionales en la provincia del Neuquén fue Rabassa (1977) que, por medio de la geología de superficie y cobertura vegetal, utilizando cartas topográficas del IGN y fotografías aéreas logró determinar valores de CN y realizar mapas de este parámetro para distintas “zonas”.

En el Alto Valle regional Fernández *et al.* (1980) realizaron estudios hidrológicos en cuencas aluvionales de la Provincia del Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Se utilizaron modelos matemáticos de precipitación y escorrentía que brindan toda la información hidrológica necesaria para el proyecto de obras de control. Los resultados se presentan en curvas que permiten el cálculo rápido de caudales y volúmenes de crecientes para diferentes tiempos de retorno para ser usados luego en el dimensionado hidráulico de estructuras de desagüe en caminos y vías férreas.

También es posible encontrar trabajos relacionados a estimación de caudales como los trabajos de Dufilho *et al.* (2001) para diseño de obras de control de aluviones basados en simulación de procesos hidrológicos torrenciales y utilización de modelos matemáticos, Sistemas de Información geográfica (SIG) y lluvias de diseño para obtener hidrogramas de crecidas y, por lo tanto, distintas formas de controlar los caudales generados por estas cuencas.

Marizza *et al.* (2010), relacionado a la problemática aluvional, realizaron una evaluación donde se utilizaron modelos matemáticos hidrológicos para obtener hidrogramas de crecidas para diferentes tiempos de retorno. Se enfoca este trabajo en evaluar la dinámica hídrica de las cuencas aluvionales para determinar caudales máximos y volúmenes de aporte de sedimentos que pueden impactar en las ciudades del Alto Valle debido al escurrimiento pluvioaluvional. La escorrentía se obtuvo aplicando el modelo HEC-HMS, adoptando una tormenta de diseño del modelo de Intensidad de Precipitación para el Alto Valle de Rio Negro; el método del Número de Curva como método de abstracción y el método del Hidrograma Unitario Sintético de Clark para la transformación lluvia- caudal. Los autores basaron su trabajo en la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) para la evaluación de sedimentos. Se estudiaron un total de 21 cuencas aluvionales y se obtuvieron hidrogramas de crecida para tiempos de recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Relacionado a estudios en áreas hidrocarburíferas se pueden encontrar trabajos de Saad y Marizza (2007) que utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) evaluaron la erosión hídrica en el Yacimiento Aguada Baguales en Neuquén utilizando la ecuación MUSLE para evaluar erosión hídrica y pérdida de suelo. Explican los autores que ante el incremento en los últimos años de la actividad hidrocarburífera se ha incrementado también la degradación de suelos por lo que surge la necesidad de efectuar una estimación de la misma como primer paso para el estudio de una futura planificación del manejo del suelo. Las herramientas como los SIG permiten analizar, vincular y realizar numerosas operaciones con información georeferenciada actualmente disponible.

Se puede observar en estos trabajos, la similitud de los resultados obtenidos en cuanto a valores de Curva Numero para la zona oriental de la provincia. Dufilho *et al.* (2001) obtuvo valores entre 72 y 85 que se corresponde al valor sugerido de 80 por Fernández *et al.* (1980). A su vez, Marizza *et al.* (2010) obtuvo valores de 85 para la zona del Alto Valle de Rio Negro.

2.2 Utilización de los SIG en la modelación hidrológica

A nivel Nacional destacan los trabajos realizados en la provincia de Mendoza debido al predominio de zonas pedemontanas que, sumado a las lluvias estivales de corta duración y gran intensidad, pendientes pronunciadas, escasa vegetación y determinadas condiciones edafológicas producen grandes escurrimientos. Es posible encontrar trabajos de Burgos *et al.* (2018) que para evaluar las amenazas hídricas al oeste del Gran Mendoza confeccionan Mapas de Numero de Curva con técnicas SIG para la modelación hidrológica a realizar. Se explica además que aun con sus limitaciones e incertidumbres, el método del CN sigue siendo muy utilizado en hidrología operacional o diseño hidrológico para determinar escurrimiento directo producto de un evento de precipitación.

Relacionado a la confección de Mapas de Numero de Curva con técnicas SIG, es posible encontrar trabajos como los de Ferrer *et al.* (1995) donde se explica como generar de manera automática el Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica. Utilizando algebra de mapas, tablas de reclasificación y operaciones de superposición de capas con números primos se llega a la generación del mapa a escala regional.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la provincia del Neuquén han sido utilizados por el estado como una herramienta imprescindible que permite contribuir a resolver problemas complejos de planificación y gestión del territorio. En este contexto Dufilho *et al.* (2002) elaboraron las Bases para el Ordenamiento Territorial Ambiental de la provincia del Neuquén (SIG-OTA).

La aplicación de los SIG en disciplinas con una visión ambiental es amplia. Capua y Mare (2012) estudiaron los problemas ambientales derivados de los condicionantes naturales y los usos del suelo en el sector Noroeste del departamento Aluminé (Región cordillerana de la frontera en la provincia del Neuquén). Estos autores remarcan la gran utilidad de los SIG para el geoprocésamiento y posterior evaluación de las distintas variables que intervienen en los diversos problemas ambientales asociados a la degradación de tierras y la ocupación de áreas geomorfológicamente inestables.

Bertani y Peña (2015) utilizando el procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT para el estudio del estado de la degradación de tierras producto de la actividad hidrocarburífera en planicies próximas a la localidad de Centenario, determinaron que, en una superficie de 6300 hectáreas, hay 556 que se encuentran con su vegetación alterada producto de esta acción antrópica. Por lo tanto, los autores recomiendan la aplicación de un manejo que considere el uso sustentable del territorio y la aplicación de un plan de remediación ambiental que considere la gestión ambiental del mismo.

Como se mencionaba anteriormente, los estudios realizados por Saad y Marizza (2007) arrojan resultados similares, la actividad antrópica de la industria hidrocarburífera contribuye a la erosión y al aumento de la desertificación, agravado por la ausencia de medidas concretas para el control de la erosión.

Si bien hay una gran cantidad de estudios relacionados con las temáticas abordadas en la provincia del Neuquén, se destacan y se toman como referencia para este trabajo los estudios que utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la posterior aplicación en la modelación hidrológica.

2.3 Análisis de sensibilidad

A nivel internacional es posible encontrar trabajos de Ivanova y Corredor (2006), donde realizaron evaluaciones de la sensibilidad de los caudales máximos de diseño ante la influencia del cambio climático en Bogotá, Colombia. Los autores explican que el calentamiento global produce cambios en el patrón de precipitaciones de todo el planeta y esto a su vez altera el comportamiento de los caudales de los ríos. En el trabajo se aplica una metodología para tres casos, donde se cuenta con una disponibilidad de información hidrometeorológica que varía entre nula, aceptable y regular.

En cuencas australes de la región de Chile, Cáceres (2021) realiza un análisis de sensibilidad hidrológica frente a cambios hipotéticos en la cobertura del suelo. El autor explica que en las últimas décadas gran parte del territorio nacional ha modificado la cobertura que posee el suelo, remplazando extensas áreas de bosque por otro tipo de superficies. En ese contexto se plantea una evaluación de dichos cambios en las cuencas de Chile en el sector Austral mediante ejercicios de modelación hidrológica donde se analiza la sensibilidad del caudal medio anual frente a cambios hipotéticos en la cobertura vegetativa del suelo. Los resultados muestran cómo van variando los caudales cuando en las cuencas se remplazan distintos porcentajes de superficie de bosque por otro tipo de coberturas como matorrales, pastizales, etc. Se concluye que los cambios en la cobertura vegetal son un factor relevante en la hidrología de cuencas, cuya complejidad requiere avances y esfuerzos en complementar los resultados con estudios en terreno que permitan restringir parámetros ingresados a modelos hidrológicos, generando así, modelos respaldados por una base empírica.

Dubus et al., (2003) en Europa, realizan un análisis de sensibilidad para cuatro modelos de lixiviación de plaguicidas. Los autores realizan análisis de la lixiviación de los plaguicidas en un caso base y en distintas variaciones alternando los tipos de suelo (franco – arenosos, franco – arcillosos, etc.). Se encontró cuales eran los parámetros más sensibles y cuales tuvieron mayor influencia en la predicción de la pérdida de pesticidas.

3 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en el departamento Pehuénches, en la localidad de Rincón de los Sauces (37° 23' 23" S; 68° 55' 31" O), extremo septentrional de la Patagonia Argentina. El área hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra limitan al este con el Río Colorado el cual separa la provincia del Neuquén de la provincia de Mendoza.

3.1 Características climáticas

La provincia del Neuquén presenta dos sectores bien definidos. Por una parte, el sector occidental asociado a la Cordillera de los Andes, donde la humedad de los vientos provenientes del oeste es descargada como intensas precipitaciones en un área reducida. En las zonas cercanas al límite internacional, en el extremo sudoccidental de la provincia y debido al efecto orogénico de la cordillera, las precipitaciones rondan los 2500 mm anuales disminuyendo hacia el este hasta los 500 mm. Por otra parte, el sector oriental de la provincia y de manera contrastante, las lluvias disminuyen considerablemente con precipitaciones de 200 mm en promedio llegando incluso por debajo de los 150 mm. Por lo tanto, la región andina se caracteriza por un clima húmedo y frío, mientras que la región extra – andina presenta un clima seco y templado.

Respecto a la temperatura se atribuye a la mayor parte del territorio provincial y particularmente en la zona oriental, temperaturas medias anuales comprendidas entre los 12° y 14° C, mientras que en la zona occidental y de mayor altura, las temperaturas medias anuales oscilan entre los 8° y 12° C. La Fig.2, muestra mapas provinciales de temperatura y precipitaciones medias anuales.

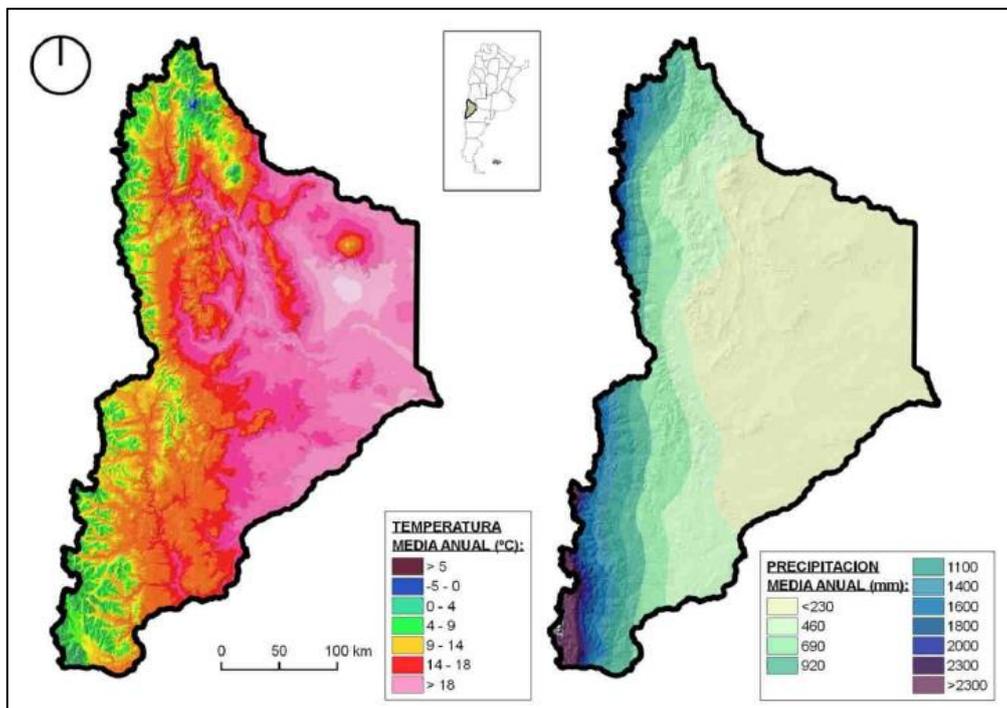


Figura 2. T° media anual (°C) y precipitación media anual (mm) (FAO, 2015).

La zona de estudio se encuentra dentro de la región extra – andina, donde el clima varía de subhúmedo - seco a árido y como se mencionaba anteriormente, las precipitaciones son muy escasas, con valores anuales menores a 200 mm y de origen convectivo (gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal). Esta región presenta un marcado déficit hídrico anual, es decir, las precipitaciones son menores a la evapotranspiración potencial, lo cual se ve reflejado en el desarrollo de los suelos del sector oriental (Marizza *et al.*, 2010; Pereyra *et al.*, 2011; FAO, 2015).

Los vientos, persistentes y de velocidades altas, son un factor adicional a las condiciones de aridez favoreciendo la evaporación en un contexto de ya escasas precipitaciones. Predominan los vientos moderados de entre 10 y 20 km/h, siendo la velocidad media anual de 11,6 Km/h. En los sectores más expuestos pueden observarse esporádicamente ráfagas con velocidades superiores a los 90 km/h. y con máximos de 140 km/h. El 20% de los días del año no se registran vientos (Pereyra *et al.*, 2013).

3.2 Suelos

Neuquén ha sido la provincia en la que se ha ejecutado la mayor diversidad de estudios de suelos durante la década del ochenta y parcialmente de los noventa (Ferrer *et al.*, 1982; Ferrer *et al.*, 1990; Ferrer *et al.*, 2006). Los autores han diseñado una regionalización de síntesis, sustentada en la distribución geográfica de los suelos según sus procesos pedogenéticos como expresión integradora de los factores del medio (clima, biota, material originario, relieve y tiempo). De esta manera se han definido dos Regiones: Andina y Extrandina, desagregadas a su vez en dos y tres Subregiones respectivamente. Dentro de la Región Andina se encuentran las Subregiones Húmeda y Montañosa y Subhúmeda y Montañosa. En contraparte en la Región Extrandina se encuentran las Subregiones Subhúmeda de planicies, colinas y serranías; Árida serrana y Árida Mesetiforme. En general en la provincia es posible encontrar suelos pertenecientes a 5 órdenes dominantes: Entisol, Aridisol, Molisol, Andisol y Afilson. 4 órdenes subordinados: Inceptisol, Alfisol, Histosol y Vertisol. Grandes Grupos: Torriortente, Torripsamente, Xeropsamente, Torrifluente, Haplacuenta y Criortente.

Los suelos del área de estudio pertenecen a la Subregión Árida Mesetiforme en el ámbito de la Región Extrandina, la cual se caracteriza por poseer un déficit hídrico acentuado (arídico) y una vegetación rala de estepa arbustiva, condiciones responsables del escaso contenido de materia orgánica y, por ende, la virtual ausencia de procesos de melanización con predominio de horizontes superficiales ócricos. Los balances hídricos negativos impiden la lixiviación de los constituyentes solubles lo cual genera acumulaciones calcáreas, yesosas o salinas característico de los suelos del área. Poseen saturación con base y por lo tanto niveles de pH neutros o alcalinos.

En esta Subregión predominan los suelos Aridisoles respecto de Entisoles. Esta distinción puede atribuirse al estilo morfoestructural de cada Subregión. Así, en la Árida Serrana predominan estructuras plegadas casi aflorantes y pendientes abruptas que favorecen la morfogénesis en detrimento de la pedogénesis, dando lugar a suelos con escaso desarrollo. En contraparte a la Subregión Árida Mesetiforme, con estructuras geológicas subhorizontales que favorecen la infiltración y el desarrollo de los suelos, aun cuando la oferta pluvial es escasa.

Según Ferrer *et al.*, (1990) los suelos pertenecientes a la Región Extrandina cubren aproximadamente el 56% de la superficie provincial, siendo la Subregión Árida Mesetiforme la de mayor extensión con aproximadamente 3.000.000 de hectáreas.

A continuación, se describen brevemente cada uno de los tipos de suelos presentes en el área hidrocarburífera junto a su respectiva distribución espacial:

- **Unidad 35: Asomos rocosos (Ferrer et al., 1990):**

Predominio de asomos rocosos para el 90% de esta unidad cartográfica, aunque de manera muy subordinada es posible encontrar Torriortentes Xericos-Líticos. La geología de la roca base son rocas basálticas del Holoceno. Se asocian a geomorfologías de conos volcánicos y paisajes de coladas modernas, principalmente basálticas. El material originario son detritos basálticos y depósitos de arenas eólicas.

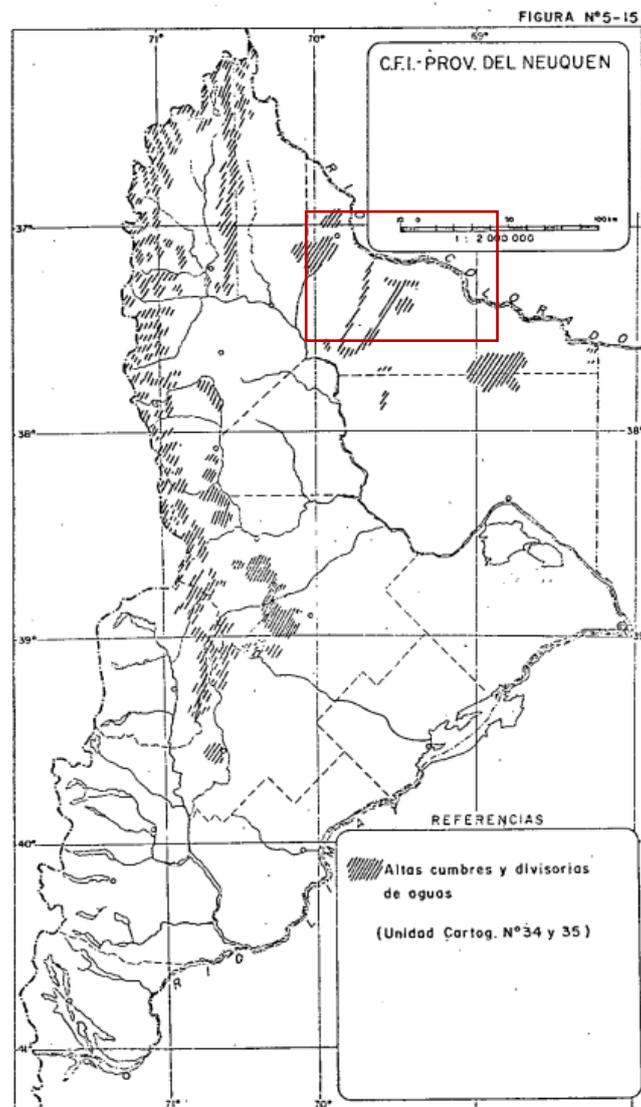


Figura 3. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 35 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer *et al.*, 1990).

▪ **Unidad 45 - 46: Calciortides Típicos – Gipsiortides Típicos (Ferrer et al., 1990):**

Los Calciortides Típicos presentan una secuencia de horizontes A1; C con un horizonte rico en CaCO_3 no cementado, cálcico, que se halla entre 45 y 70 cm de profundidad. Son texturalmente gruesos (francos arenosos a areno-francos) y son bastantes masivos. Buena parte de estos suelos tienen una cubierta de detritos de naturaleza basáltica de tamaño variable. Los Gipsiortides típicos son iguales a los anteriores, aunque con un horizonte de elevados tenores de yeso blanco (gípsico). La geología de la roca base pertenece a areniscas, arcillas verdes y calizas del Grupo Mendoza; parcialmente basaltos del Terciario Superior. Están asociados a geomorfologías de pedimentos semidesérticos encubiertos y sectores distales de bajada aluvial. El material originario son depósitos aluviales inconsolidados del Holoceno, provenientes de la alteración de sedimentitas del Mesozoico y presentan contaminación arenas eólicas modernas.

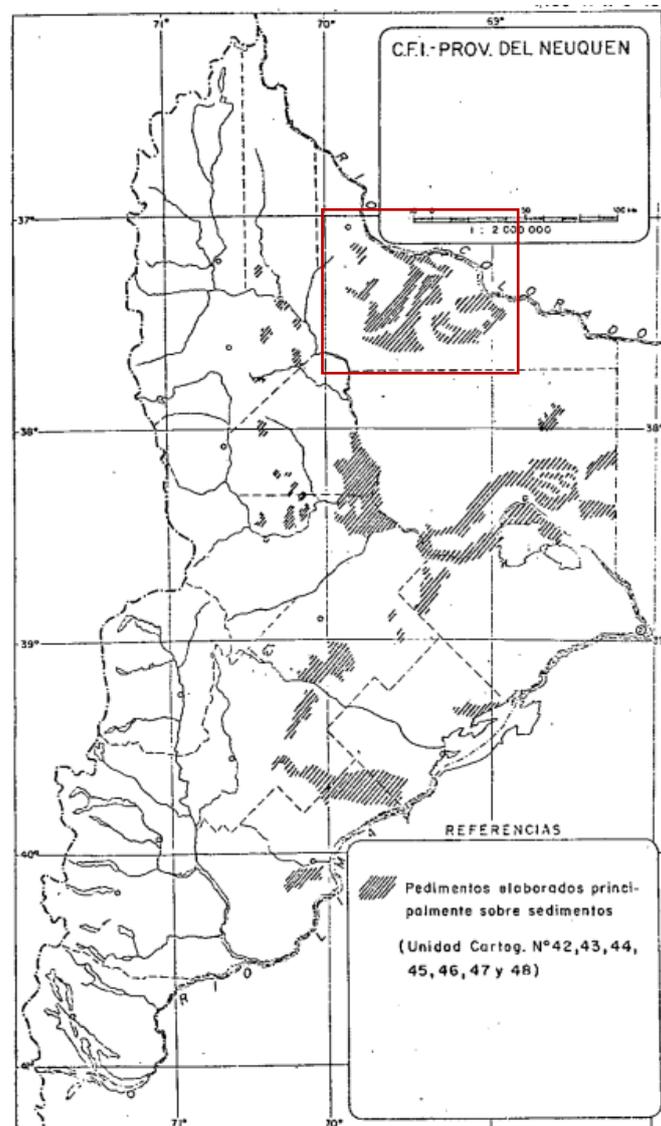


Figura 4. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 45-46 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

▪ **Unidad 56: Gipsiortides Cálculo (Ferrer et al., 1990):**

Presentan un débil horizonte A1 muy pobre en materia orgánica (horizonte ócrico) al que le subyacen concentraciones de carbonato de calcio (horizonte cálcico) así como de yeso (gípsico) las que no se presentan cementadas. En superficie y en profundidad poseen detritos basálticos de variados diámetros que en superficie a veces forman densas cubiertas. La geología de la roca base son sedimentitas del Grupo Neuquén y de las Formaciones Roca y Jagüel. Está asociado a geomorfologías de antigua planicies aluviales pedemontanas disectadas. El material originario posiblemente son depósitos aluviales psefíticos del Pleistoceno.

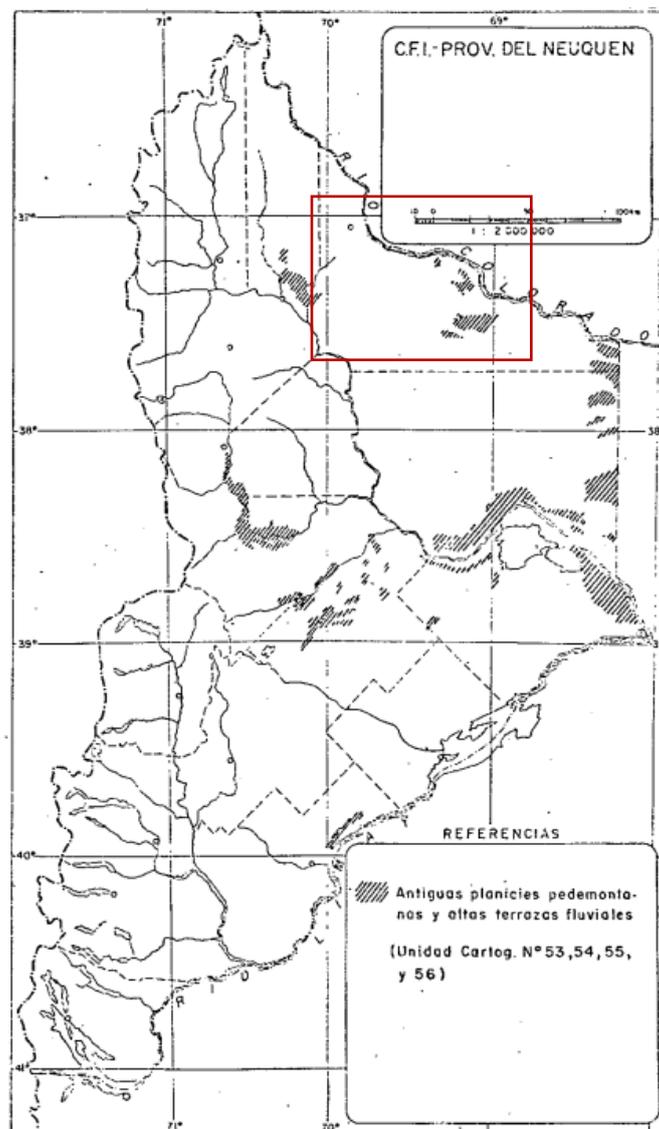


Figura 5. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 56 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

▪ **Unidad 57: Torriortentes típico (Ferrer et al., 1990):**

Son suelos con perfil A1; C siendo el horizonte superficial de muy escaso desarrollo. Son suelos profundos, superando el 1,50 m de espesor. Son de texturas gruesas, franco arenoso a areno franca y son débilmente estructurados. La geología de la roca base son principalmente areniscas, arcillas y lutitas del Grupo Mendoza; y areniscas, lutitas y arcilitas de la Formación Tordillo. Se asocian a geomorfologías de bajas aluviales y valles interserranos. El material originario pertenece a depósitos holocénicos principalmente de origen aluvial y en menor medida coluvial de variable granulometría. Parcialmente con cubierta arenosa eólica. Este suelo ocupa gran porcentaje areal en el área hidrocarburífera.

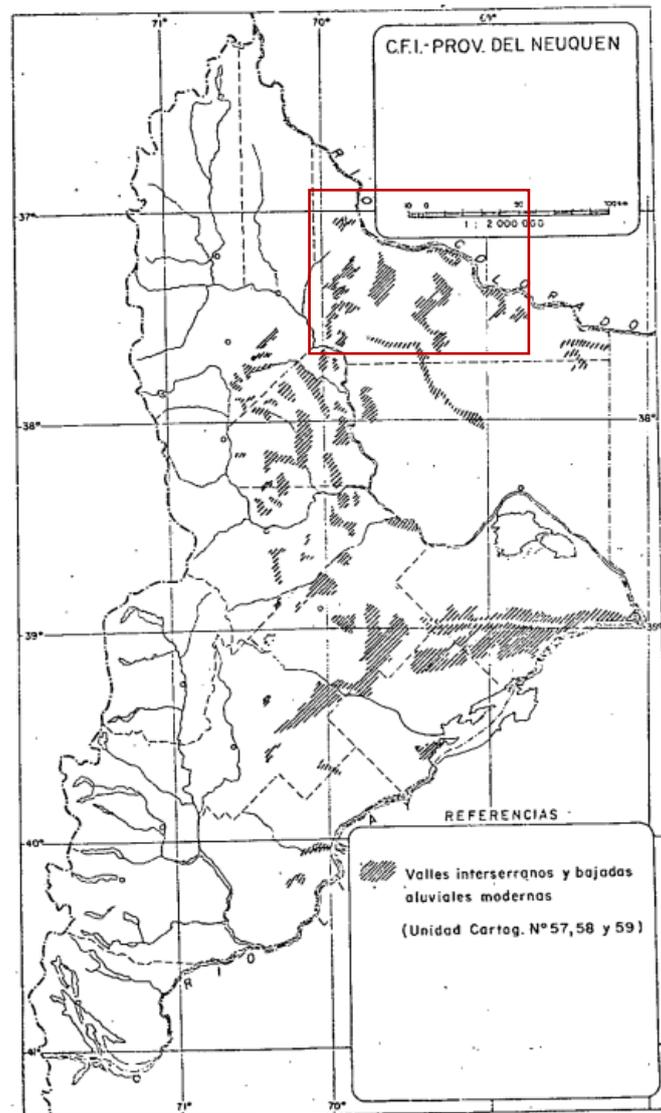


Figura 6. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 57 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

▪ **Unidad 61: Torrifluentes Típicos (Ferrer et al., 1990):**

Son suelos que se caracterizan por una sucesión de capas de variada granulometría, aunque no muy contrastante. Se localizan en las inmediaciones de los cursos de agua (permanente y temporarios) pero no de manera continua ya que alternan en el paisaje con otros suelos. Excepcionalmente poseen altos tenores salinos y son débilmente calcáreos. La geología de la roca base es muy variable; probablemente predominen sedimentitas del Grupo Neuquén y de las Formaciones Bajada Colorada y Rayoso. Se asocian a geomorfologías de terrazas bajas aluviales y planicies de inundación. El material originario son depósitos fluviales holocénicos de dispar composición litológica y muy variada granulometría.

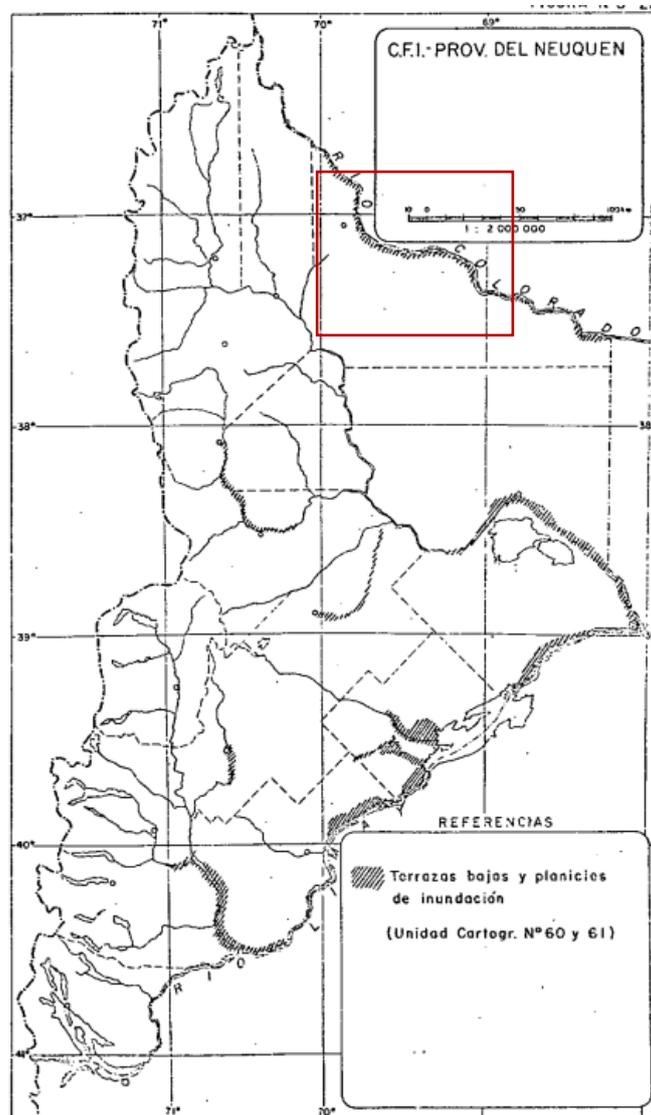


Figura 7. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 61 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

▪ **Unidad 63: Torripsamientos Típicos (Ferrer et al., 1990):**

Estos suelos poseen un horizonte A1 de 8 cm de espesor muy débilmente expresado; le subyace materiales de textura arenosa. Son suelos profundos, poseen muy débil a nula agregación, son blandos, no adhesivos, ni plásticos. Poseen una configuración tipográfica ondulada, toda vez que se trata de un paisaje de médanos. La geología de la roca base son areniscas, fangolitas y arcillas del Grupo Neuquén y de las Formaciones Bajada Colorada y Rayoso. Se asocia a geomorfologías de campo de médanos. El material originario son depósitos arenosos modernos vinculados a la actividad eólica.

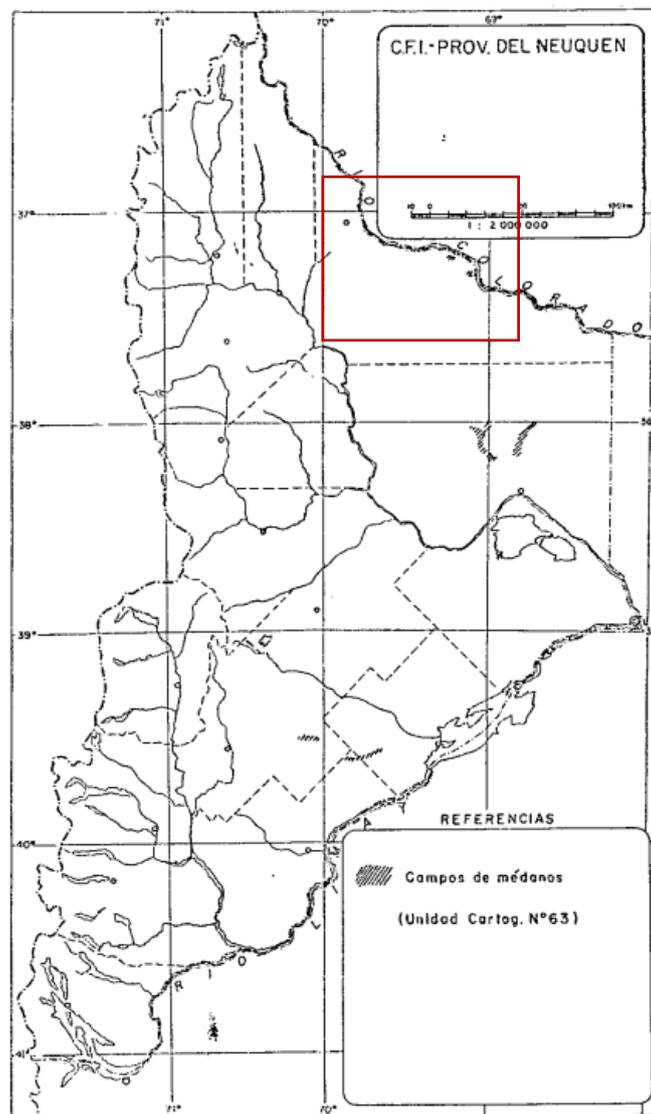


Figura 8. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 63 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

- **Unidad 69: Ausencia de suelos (Ferrer et al., 1990):**

Predominan los asomos de rocas, esencialmente arcilitas y fangolitas pertenecientes a la Formación Roca o bien a los miembros más finos del Grupo Neuquén. La geomorfología corresponde a paisaje de huayquerías, más conocido como BadLands.

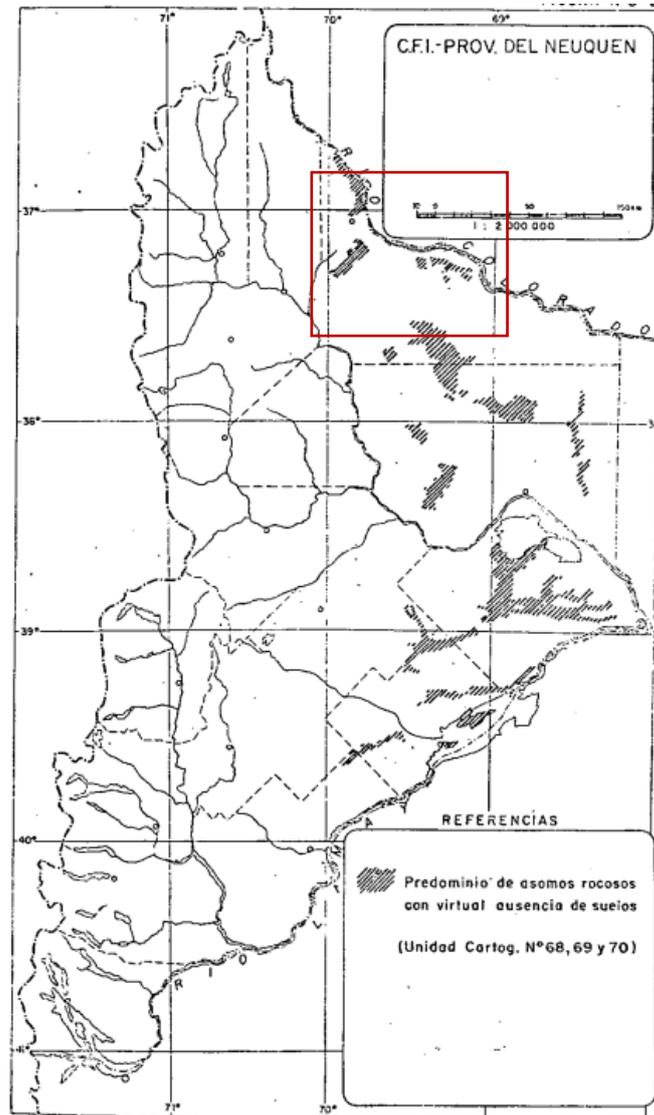


Figura 9. Distribución espacial Unidad Cartográfica N° 69 en Área Hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra (modificado de Ferrer et al., 1990).

Para este Trabajo Final de Licenciatura y tomando como base los trabajos realizados por Ferrer *et al.*, (1990) e Irisarri (2006) en el que se caracterizan las distintas Unidades Cartográficas de las distintas Regiones y Subregiones de la provincia; se digitalizan los distintos tipos de suelo del área hidrocarburífera Puesto Hernández - Chihuido de la Sierra Negra y que son de interés para el estudio hidrológico, como lo es la obtención del mapa de CN del área de estudio.

3.3 Geomorfología

La geomorfología de la provincia del Neuquén es considerada muy compleja y de relieves muy diferentes (Fig. 10). González Díaz y Ferrer (1986) en su trabajo deciden realizar una clasificación geomorfológica de la provincia de acuerdo con el proceso que le da origen, clasificándola en procesos exógenos y endógenos. De manera general los procesos exógenos se caracterizan por geoformas de erosión regional y los procesos endógenos se relacionan a geoformas volcánicas que son muy características en la provincia.

Ferrer et al., (2006) mencionan que las principales variaciones del relieve deben atribuirse a la estructura geológica, a los procesos de naturaleza tectónica y volcánica recurrentes a lo largo de su historia geológica, aun cuando los procesos acaecidos durante el Terciario y Cuaternario fueron los responsables de su actual fisonomía. Los autores realizan una clasificación a nivel provincial dividiendo por zonas: Oriental, Central y Occidental.

El área de estudio pertenece a la Zona Oriental, donde prevalecen extensas superficies planas. El relieve es predominantemente mesetiforme, atribuible a la influencia de la estructura geológica, ya que los estratos continentales mesozoicos yacen posiblemente horizontales. Geomorfológicamente se trata de “planicies estructurales por arrasamiento” que se originan en la degradación, por acción fluvial, de mantos poco resistentes hasta alcanzar una capa dura de apreciable extensión. Las terrazas, con niveles desde 50 a 400 msnm, están surcadas por cauces, solamente activos durante tormentas, que desembocan en los valles fluviales o en cuencas endorreicas. Los niveles de terrazas más antiguos, y más altos, se encuentran generalmente cementados por carbonatos o por yeso y dominan los materiales gruesos (gravas y rodados). La mayor parte de las planicies estructurales exhiben superficies muy planas con pendientes del 2%, que contrastan con sus flancos o laderas cuyas cortas pendientes poseen valores superiores al 30%, a veces abruptas, casi verticales y otras en forma “escalerillada” o escalonada, lo cual se atribuye a la resistencia diferencial de su heterogénea composición litológica frente a la acción erosiva. Otras geoformas en la zona oriental que poseen superficies planas se hallan relacionadas con los grandes ejes aluviales vinculados al río Colorado y al curso inferior del río Neuquén. Es frecuente la presencia de otras geoformas entre las que se destacan: pedimentos, bajadas, conos aluviales y cerros mesa. Se manifiestan, en menor medida, “montones de arenas” o dunas enanas debido a la ocurrencia de fenómenos asociados a la actividad eólica que no suelen tener una expresión morfológica tan notoria. Resta mencionar para caracterizar al sector oriental, un extenso campo volcánico donde se aprecian más de 60 pequeños conos concentrados al Norte y Noreste del cerro principal Auca Mahuida.

En el área hidrocarburífera Puesto Hernández y Chihuido de la sierra Negra es posible encontrar las geoformas anteriormente mencionadas. Predominan las coladas y conos volcánicos; tal es el caso de la sierra Negra que, según Garrido *et al.*, (2012) corresponde a la Formación (Fm.) Sierra Negra la cual se subdivide en Miembro (Mb.) Filo Morado y Puesto Tillerías, donde predominan los basaltos alcalinos y andesíticos. Son características las antiguas planicies aluviales pedemontanas disectadas y las planicies de inundación. Las partes bajas son dominadas por geoformas de bajada aluvial y valles interserranos. Además, es común la existencia de “Bad Lands” debido a procesos erosivos

muy activos con desarrollo de cárcavas y pequeños campos de médanos originados por la acción eólica.

De la misma manera que para los suelos del área de estudio y tomando como base los trabajos realizados por Ferrer *et al.*, (1990) e Irisarri (2006); se realiza un mapa geomorfológico digitalizando en el SIG y comprendiendo el área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra y que es de interés para el estudio hidrológico, como lo es la obtención del mapa de CN del área de estudio.

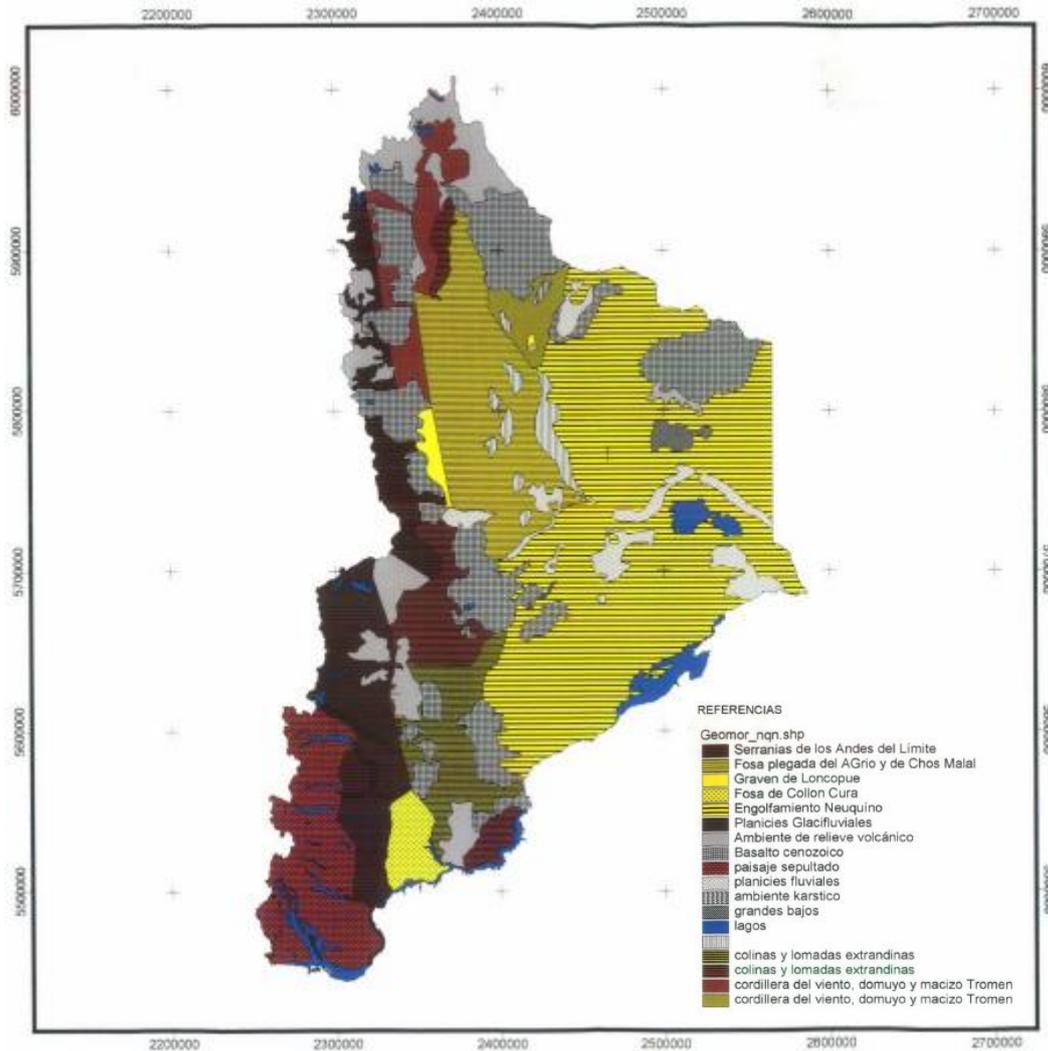


Figura 10. Mapa geomorfológico de la provincia del Neuquén (Dufilho *et al.*, 2002).

3.4 Vegetación

Según Movía *et al.*, (2007) en la provincia del Neuquén se distinguen tres tipos de formaciones vegetales: bosques, estepa arbustiva herbácea y estepa arbustiva. El desarrollo de los distintos tipos de vegetación responde a los factores climáticos y topográficos. Por ejemplo, el desarrollo de los bosques se encuentra en la zona cordillerana, donde las precipitaciones superan los 700 mm anuales. El desarrollo de la estepa arbustiva herbácea se encuentra hacia el este, donde las precipitaciones se encuentran entre los 500 a 200 mm anuales. Por último, la estepa arbustiva, en el sector

oriental de la provincia, se desarrolla en áreas con suelos pocos desarrollados y con precipitaciones por debajo de los 200 mm anuales.

El área de estudio está incluida dentro de la provincia fitogeográfica de Monte (Movía *et al.*, 2007). La vegetación característica de la mencionada provincia fitogeográfica es la estepa arbustiva. La aridez del clima, asociado al débil desarrollo y acentuado déficit hídrico que presenta el suelo determinan el desarrollo de vegetación de tipo xerófila, donde abundan los arbustos bajos, espinosos y con hojas muy pequeñas. Las estrategias adaptativas de estas especies se orientan a usar el máximo de humedad durante el período de crecimiento y a soportar temperaturas desfavorables. Las especies que predominan según Movía *et al.*, (2007) son la *Larrea cuneifolia* (jarilla macho), *Larrea divaricata* (jarilla hembra), *Prosopis alata* (alpataco), *Stipa spp* (graminéas) y *Atriplex lampa* (zampa). En general la *Larrea cuneifolia* predomina en los sectores más secos, mientras que la *Larrea divaricata* lo hace en áreas periféricas, no tan áridas. La estepa en esta microregión tiene una altura media que oscila entre los 0.80 a 1.00 m, aunque algunos ejemplares de *Larrea cuneifolia* pueden alcanzar una altura de 2,20 mts (Perilli, 2006).



Figura 11. Vegetación típica del área de estudio (Perilli, 2006).

En general, en toda el área que ocupa la estepa arbustiva en la microregión, la cobertura del suelo varía entre 15 y 35 %. En los bajos, afectados a fenómenos recurrentes de alternancia de inundaciones con períodos de sequía, las condiciones de salinidad han generado nichos ecológicos ocupados por especies halófitas como *Larrea divaricata* (vidriera) y *Salicornia ambigua* (jume).

Desde el punto de vista hidrológico los suelos, la cobertura vegetal y el tipo de vegetación, son factores muy importantes ya que el potencial de escorrentía se ve fuertemente alterado por sus variaciones. A medida que el uso o el tratamiento del suelo aumentan, se incrementa la retención y se disminuye la producción de avenidas por escurrimiento (Fatorelli y Fernández, 2011).

3.5 Geología

En la provincia del Neuquén se entran complejos eventos geológicos, donde en gran parte de su territorio se extiende la Cuenca Neuquina, una cuenca que hoy en día su estratigrafía ha sido estudiada detalladamente.

El área de estudio se localiza en la zona de transición entre las provincias geológicas del Engolfamiento Neuquino, y la Payenia (Ramos, 1999). Dentro de la misma se encuentran variadas litologías de diferentes edades y orígenes, predominando en la zona las sedimentitas cretácicas del Grupo Neuquén y las volcánicas de retroarco neógenas.

La identificación geológica del área de estudio se realizó en base a la Hoja Geológica 32d Chachahuen a escala 1:200.000 del SEGEMAR (Holmberg, 1962) y a los trabajos publicados por Garrido *et al.*, (2012), Garrido *et al.*, (2014) y Pereyra *et al.*, (2013).

En general en la zona afloran las sedimentitas continentales y marinas integrantes del Grupo Neuquén y del Grupo Malargüe de edades fundamentalmente cretácicas y terciario basal. Por encima se encuentran sedimentitas marinas y continentales de edades oligocenas-miocenas. Cubriendo parcialmente a las anteriores se observan potentes secuencias volcánicas y volcánicas neógenas integrantes de diferentes conjuntos volcánicos, entre los que se cuentan por ejemplo la Formación Sierra Negra (Garrido *et al.*, 2012) perteneciente a la Sierra Negra al oeste del área de estudio o el antiguo volcán Auca Mahuida, muy característico de Rincón de los Sauces. Finalmente, se encuentran depósitos fluviales y aluviales cuaternarios y recientes, entre los que destacan los niveles cementados que integran los "Rodados Patagónicos" (Pereyra *et al.*, 2013).

Es posible diferenciar en el área de estudio dos grandes conjuntos litológicos. Por un lado, un conjunto rocoso más antiguo al oeste y hacia el este un conjunto heterogéneo de sedimentos cuaternarios y recientes poco consolidados. Se han diferenciado seis unidades, de más antigua a más joven (Pereyra *et al.*, 2013).

- 1) Grupo Neuquén: areniscas, pelitas y tufitas marinas y continentales cretácicas.
- 2) Depósitos de rodados y arenas plio-pleistocenas parcialmente cementados (Rodados Patagónicos).
- 3) Basaltos y volcánicas neógenas.
- 4) Depósitos de rodados y arenas de cobertura de pedimentos y abanicos aluviales.
- 5) Depósitos de arenas y gravas fluviales holocenos y actuales (rio Colorado y cursos menores).
- 6) Depósitos aluvio-coluviales recientes (gravas, arenas, limos y arcillas).

A continuación, se detallan cada uno de los conjuntos:

- 1) Grupo Neuquén (Garrido, 2011):

En general el Grupo Neuquén está compuesto por una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, desarrollado entre el Cenomaniano Temprano y el Campaniano Medio (Cretácico Superior); conformado por una sucesión clástica compuesta principalmente de areniscas, fangolitas y gravas, con una escasa participación de horizontes conglomerádicos. La depositación del Grupo Neuquén se encuentra vinculada al inicio de la fase de antepaís de la Cuenca Neuquina, originada

como consecuencia de una tectónica compresional sobre el margen andino ocurrida a fines del Cretácico Inferior. Litoestratigráficamente, el Grupo Neuquén se compone de tres subgrupos y nueve formaciones (Fig. 12) donde cada subgrupo, representa una secuencia granodecreciente continua que se corresponde con un mismo conjunto de sedimentos depositados bajo condiciones uniformemente alternantes (Cazau y Uliana, 1973).

El Subgrupo Río Limay, en la base, comprende a las Fms. Candeleros y Huincul, y representa depósitos de canales de baja sinuosidad desarrollados bajo un control tectónico y climático subordinado.

El Subgrupo Río Neuquén comprende a las Fms. Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier, y conforma una sucesión alternante de depósitos pelíticos y psamíticos con bajo grado de litificación, de origen fluvial, desarrollados principalmente bajo control climático. El pasaje entre las formaciones que integran al Subgrupo Río Neuquén es de carácter transicional. Sus límites formacionales están dados por la variación dentro de la secuencia en la relación pelita/psamita, así como en el cambio en la arquitectura de los depósitos de los cuerpos canalizados.

Finalmente, el Subgrupo Río Colorado, integrado por las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto, comprende a depósitos fluviales desarrollados bajo un nuevo control tectónico dominante.

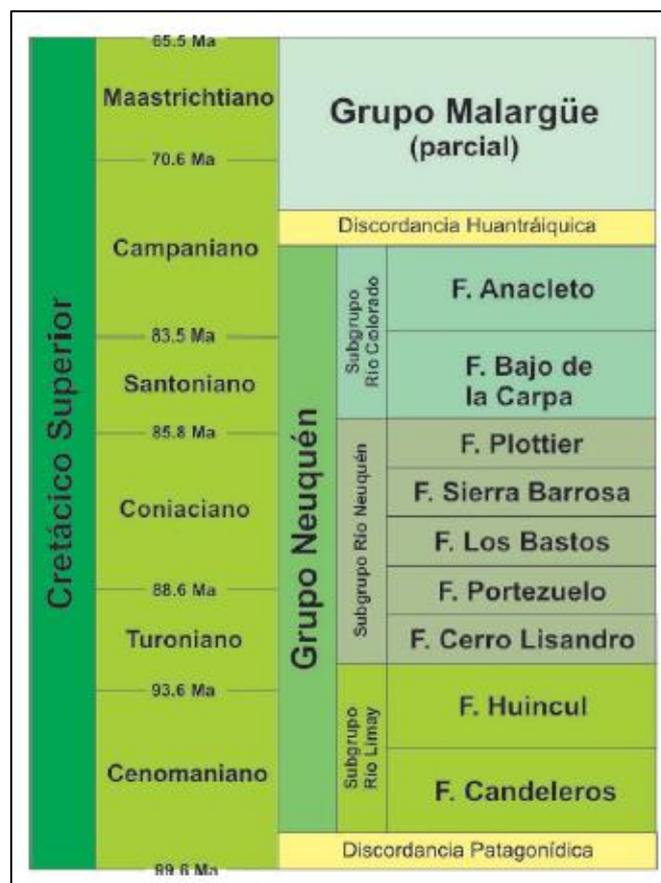


Figura 12. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Garrido, 2011).

2) Rodados Patagónicos (Pereyra *et al.*, 2013):

Los Rodados Patagónicos están representados en el área por conglomerados bien consolidados por abundante cemento calcáreo y yesífero. Conforman los sectores más elevados del área de estudio ubicándose en cotas superiores a los 900 m. Posen un espesor de al menos 5 m, pudiendo superar incluso los 10 m. La litología de los clastos es altamente variable, aunque con presencia mayoritaria de rocas volcánicas básicas mesosilíceas y plutónicas ácidas, con un diámetro máximo que generalmente no supera los 30 cm. Estos depósitos generalmente apoyan sobre el Grupo Neuquén y también se asientan sobre afloramientos poco potentes del denominado "Rocanense" o Grupo Malargüe de edad daniana (Terciario basal). Su origen sería fluvial de alta energía, correspondiente a bajadas, si bien no puede descartarse un origen glaciálfuvial, al menos para parte de ellos. La edad de estos sería cuaternaria, pudiendo incluir incluso parte del Plioceno superior.

3) Basaltos y volcanitas Neógenas (Pereyra *et al.*, 2013):

Predominan las coladas de basaltos olivínicos, muy características en el área de estudio, fueron identificadas por Holmberg (1962), como «Basalto IV» equivalente al Chapualitense superior de Groeber. Forman grandes planicies lávicas horizontales de espesor uniforme, marginadas por bardas abruptas. Se caracterizan por poseer un centro macizo cortado por diaclasas con formas curvas y a veces manifiestan disyunción columnar. En algunos sectores se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos eólicos arenosos o gravas arenosas fluviales que pueden presentar encostramiento calcáreo. De todas formas, la cobertura, si está presente, es delgada.

En toda el área de estudio se observan numerosos aparatos volcánicos de pequeñas dimensiones que han sido los diferentes centros de emisión de las coladas, proviniendo en este caso de la zona del Auca Mahuida. La posterior erosión fue fragmentando las planicies lávicas, por eso se encuentran en la zona antiguas planicies disectadas. La edad de estos basaltos sería pliocena a pleistocena inferior coincidiendo parcialmente con las glaciaciones más antiguas. Garrido *et al.*, (2012) en su trabajo analiza con detalle los afloramientos expuestos en el área de sierra de Huantraico-sierra Negra y cerro Villegas, pertenecientes al departamento Pehuenches, provincia del Neuquén. Los autores describen una compleja sucesión volcanosedimentaria de edad cenozoica que alcanza los 1.000 m de espesor y además realizan una revisión de las unidades litoestratigráficas cenozoicas aflorantes incorporando la descripción de los vertebrados fósiles recolectados. Sobre la base de los resultados obtenidos los autores presentan un nuevo esquema de ordenamiento litoestratigráfico y de ajuste para los depósitos del Cenozoico del norte de la provincia del Neuquén. Los autores determinan que la Formación Sierra Negra se habría depositado durante el intervalo Aquitaniano-Burdigaliano (Mioceno Temprano) en base a dataciones radiométricas. En la Fig.13 se puede observar un mapa de las unidades cenozoicas aflorantes en la sierra de Huantraico-sierra Negra característico del área de estudio, además de la ubicación del Yacimiento Chihuido de la Sierra Negra perteneciente a la empresa YPS S.A donde se realiza, en este trabajo final de licenciatura, determinados análisis hidrológicos.

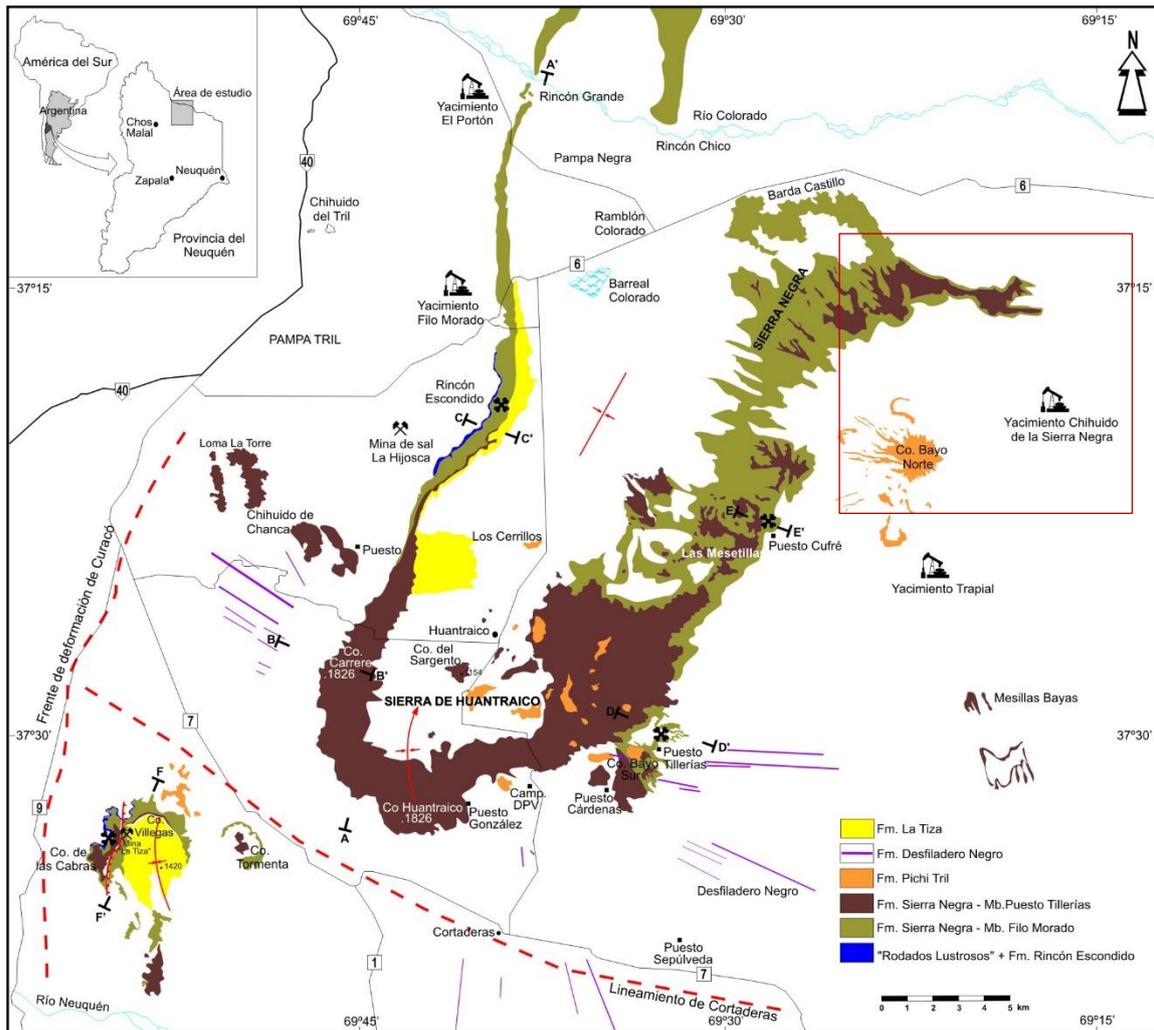


Figura 13. Mapa de las unidades cenozoicas aflorantes en la sierra de Huantraico-sierra Negra (modificado de Garrido et al. 2012).

4) Depósitos de rodados y arenas de cobertura de pedimentos y abanicos aluviales (Pereyra et al., 2013):

Se trata de acumulaciones generalmente poco potentes con escaso grado de cohesión de arenas y gravas acarreadas por el agua. Es posible encontrar también, particularmente en algunos sectores subhorizontales, un regolito resultado de la meteorización de las areniscas cretácicas aflorantes. Son depósitos carentes generalmente de estructuras sedimentarias y que, a diferencia de los depósitos más antiguos, no muestran cementación calcárea. Cubren los pedimentos y los pequeños abanicos aluviales formados al pie de ellos. La mayor parte de los materiales provienen de la erosión de las areniscas del Grupo Neuquén subyacentes. Su origen es principalmente fluvial y se les atribuye una edad holocena a actual.

5) Depósitos de arenas y gravas fluviales holocenas y actuales. Río Colorado y cursos menores (Pereyra et al., 2013):

Los depósitos del Río Colorado se emplazan en un ambiente de valle fluvial labrado en el ambiente mesetiforme y volcánico circundante. Se apoya en forma erosiva en los sedimentos arenosos del Grupo Neuquén. Forman dos unidades diferenciadas: una faja de canales (cauce), correspondiente a la planicie de inundación actual y un nivel ligeramente más alto correspondiente a las terrazas fluviales, separados por un resalto vertical del orden de los 3.4 m. El aporte sedimentario de finos (limos), es lateral, proveniente de las comarcas circundantes, las arenas medias/gruesas y gravas son provistas, en cambio por las regiones montañosas de las cabeceras y por la degradación de los rodados patagónicos.

6) Depósitos aluvio-coluviales recientes (Pereyra *et al.*, 2013):

Estos depósitos están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, aunque domina la granulometría más fina. Se encuentran ampliamente distribuidos en la región, ya sea convergiendo hacia las zonas más bajas, aunque sin alcanzar a formar cauces definidos o rellenando áreas deprimidas, o desarrollándose al pie de laderas. En forma ocasional pueden reconocerse bloques, generalmente derivados de las bardas basálticas adyacentes. Los depósitos coluviales corresponden a los materiales que tapizan el talud. Son sedimentos granulométricamente heterogéneos compuestos por fragmentos angulosos por lo común inferiores a los 30 cm de longitud, principalmente lajosos.

Las cuencas se desarrollan sobre un sistema de antiguas planicies lávicas junto a sus laderas abruptas y a veces escalonadas constituidas por basaltos olivínicos, los cuales intercalan en algunos sectores con depósitos finos (fangolitas) del Grupo Neuquén. Es posible encontrar en algunos sectores de las cuencas conos volcánicos aislados que sobresalen de los depósitos más recientes. En las zonas de bajadas aluviales predominan antiguas planicies disectadas por erosión, con asomos rocosos y en algunos sectores depósitos aluvio-coluviales. En los sectores más distales de las cuencas se encuentran depósitos de arenas y gravas fluviales holocenas y actuales.

3.6 Pendientes

La provincia del Neuquén se caracteriza por presentar notables variaciones altitudinales, así como en la forma, longitud e inclinación de las pendientes (Ferrer *et al.*, 2006). La región extraandina se caracteriza por tener pendientes relativamente bajas debido a sus relieves mesetiformes en comparación a la zona occidental de la cordillera.

La pendiente general del terreno de una cuenca constituye uno de los factores más importantes. Puede resultar de sumo interés ya que tiene influencia en la forma en la que el agua ya precipitada, se dirige hacia la salida de la misma. Además, la pendiente del terreno natural tiene una relación directa con la velocidad del escurrimiento sobre la cuenca. Presenta una dependencia muy compleja con el fenómeno de la escorrentía superficial dada su marcada interrelación con la infiltración, el contenido de humedad del suelo, las irregularidades localizadas y el crecimiento de la vegetación (Fattorelli y Fernández, 2011).

La determinación de las pendientes del área de estudio se realizó a través del procesamiento de la información geográfica proporcionada por el Modelo de Elevación Digital del Terreno (MDE) extraído del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con una resolución espacial de 30 m de tamaño de *pixel* y una precisión vertical de aproximadamente 2 a 3 m.

La obtención del mapa de pendientes se realiza utilizando el *software* ArcGIS (SIG) por medio de la función *Slope*. Esta función genera una matriz de datos que representa para cada *pixel* o cuadrícula el valor de la pendiente máxima con relación a las cuadrículas cercanas o la relación en el cambio de altura para cada celda.

Para el mapa de pendientes del área de estudio se utilizó la clasificación de gradiente de pendiente (Fig. 14) según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Clase	Descripción	%
01	Plano	0-0,2
02	Nivel	0,2-0,5
03	Cercano al nivel	0,5-1,0
04	Muy ligeramente inclinado	1,0-2,0
05	Ligeramente inclinado	2-5
06	Inclinado	5-10
07	Fuertemente inclinado	10-15
08	Moderadamente escarpado	15-30
09	Escarpado	30-60
10	Muy escarpado	> 60

Figura 14. Clases de gradiente de pendiente (FAO, 2009).

La generación del mapa de pendientes en este Trabajo Final tiene el objetivo de ser utilizado para la corrección del mapa de CN como se explica en el apartado 4.4.2.

3.7 Particularidades socio – ambientales

Tal como se menciona en apartados anteriores, el área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra se encuentra sometida a procesos de escorrentía y generación de grandes caudales debido a la presencia de cuencas aluviales que producen fenómenos de erosión hídrica muy importantes, afectando las conducciones y generando riesgos de contaminación. La afectación de los cauces por la actividad hidrocarburífera y la afectación de las instalaciones petroleras por crecidas provocadas por tormentas convectivas de altas intensidades y corta duración son muy comunes en el área de estudio.

Se entiende como incidente de la actividad hidrocarburífera al derrame que, por causa de una falla de material, de sistema, por corrosión o error operativo provoque la fuga de fluidos de las instalaciones petroleras e impacta, en mayor o menor medida, al suelo de la instalación, cauces aluvionales, suelo natural o agua de los cursos de la cuenca de la cual forman parte. En este caso y según el COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado) el área hidrocarburífera y sus cuencas aluviales analizadas en este trabajo final pertenecen a la Cuenca del Río Colorado. Son numerosos los riesgos y los incidentes provocados por las grandes crecidas en las instalaciones petroleras. A continuación, en la Fig.15 y Fig.16 se pueden observar algunos ejemplos.



Figura 15. Línea de conducción sin defensa aluvional dentro de cauce (Fuente: coirco.gov.ar).



Figura 16. Línea de conducción con defensa aluvional mal diseñada dentro de cauce (Fuente: coirco.gov.ar)

Otro ejemplo muy importante es lo que sucede a la salida de la cuenca más sustancial de este Trabajo Final de Licenciatura: la “Cuenca Mayor” (Fig. 31).

Esta cuenca contiene una incontable cantidad de locaciones petroleras en su interior, cauces efímeros afectados por construcciones de caminos conocidos como “picadas petroleras” y numerosos gasoductos y oleoductos de distintas empresas que cruzan en todas direcciones cortando los cauces (Fig. 17).

Además, a la salida de esta cuenca se encuentra una instalación petrolera muy importante, la Planta Industrial Puesto Hernández, la cual puede ser fuertemente afectada por la generación de grandes caudales producto de lluvias de gran intensidad si no se realizan las obras de mitigación correspondientes.

Las perturbaciones antrópicas (construcción de caminos, construcción de locaciones, cruces de caminos con cauces) desequilibran la dinámica natural, con el consecuente aumento de los escurrimientos superficiales.

A continuación, en la Fig.17 se puede observar la cercanía de las instalaciones con respecto a la salida de la cuenca, la cantidad de gasoductos y oleoductos que interceptan con los cauces y la Ruta Provincial 6 muy susceptible a las crecidas extraordinarias.

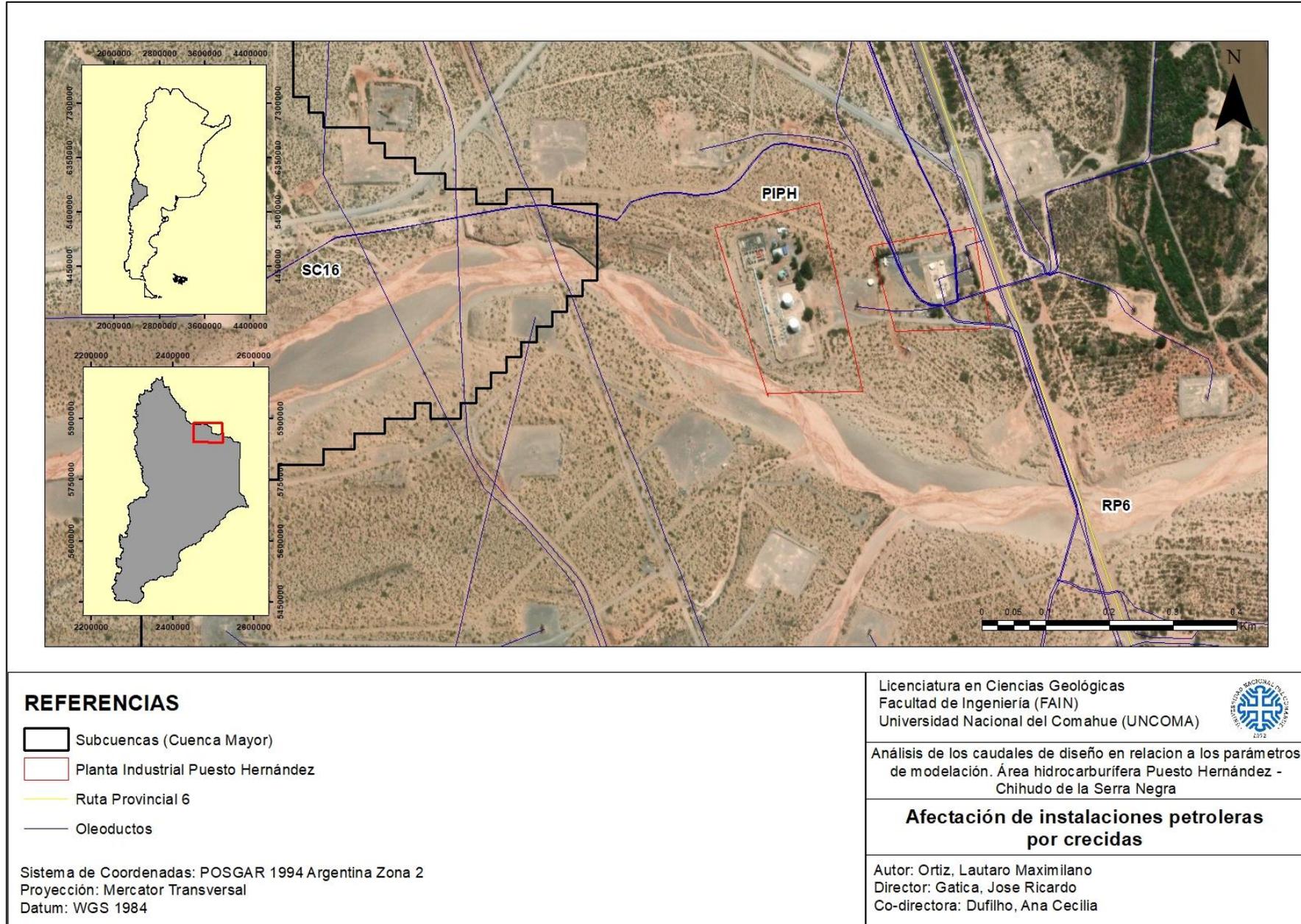


Figura 17. Ejemplo de posible afectación a instalación petrolera por crecidas en Yacimiento Puesto Hernández – Chihudo de la Sierra Negra (YPF S.A).

4 MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO

4.1 Hidrología

La hidrología es una ciencia que trata los fenómenos naturales involucrados en el ciclo hidrológico (Fig. 18) y sus transformaciones a lo largo de éste en los distintos medios (océanos, relieve terrestre, atmósfera, subsuelo, etc.). El diseño hidrológico busca interpretar y cuantificar esos fenómenos, con el fin de proporcionar soporte a estudios, proyectos y obras de ingeniería hidráulica, de infraestructura y de medio ambiente (Fattorelli y Fernández, 2011; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996). El desarrollo de la tecnología digital ha permitido lograr altos niveles de confiabilidad para los estudios y proyectos relacionados al uso, manejo y control del agua.

Es posible encontrar variada bibliografía de consulta con respecto al ciclo hidrológico (Fattorelli y Fernández, 2011; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Chow et al., 1994; Sánchez San Román, 2011; etc.). De manera general, es el movimiento del agua por evaporación, luego descendente por precipitación y después en forma de escorrentía. El ciclo no tiene ni principio ni fin y sus procesos se dan de manera continua.

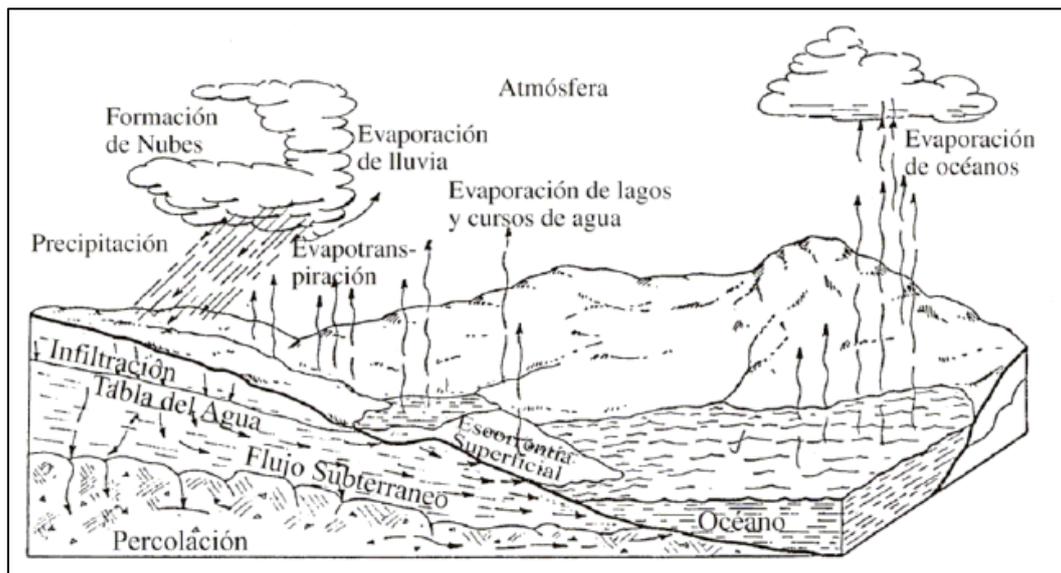


Figura 18. El ciclo hidrológico y sus fases (Fattorelli y Fernández, 2011).

Si bien son varios los procesos y componentes que intervienen en el balance y ciclo hidrológico, en este trabajo final se explican detalladamente las características relacionadas a la escorrentía por ser el enfoque principal del estudio.

La escorrentía está netamente relacionada a las precipitaciones. Las precipitaciones pueden ser definidas como cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo, y son consideradas eventos o fases vitales para el funcionamiento y entendimiento del ciclo hidrológico en un determinado tiempo y lugar. Se clasifican en tres grupos principales (convectivas, ciclónicas y orográficas). Cualquiera sea su tipo, las precipitaciones caen sobre un espacio geográfico conocido como cuenca, lo cual, su concepto y definición se tratan más adelante en el apartado 4.2.

4.1.1 *Escorrentía*

El escurrimiento o escorrentía se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Antes de llegar a la salida de la cuenca, la escorrentía sufre procesos de interceptación y evaporación (Aparicio Mijares, 1992).

Según el camino que sigue el agua hasta alcanzar la red de drenaje podemos distinguir entre escorrentía superficial, subsuperficial o subterránea (Fattorelli y Fernández, 2011).

- Escorrentía superficial

Corresponde al agua que no se infiltra en ningún momento, producto de una mayor intensidad de precipitación con respecto a la capacidad de infiltración del suelo, y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad. Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. La escorrentía superficial está formada en un primer momento por el flujo en forma de lámina sobre la superficie del suelo (*overland flow*). Si la cuenca receptora tiene pendiente, este flujo fluye por gravedad hacia cursos de agua o canales de drenaje en principio pequeños los cuales se van agrupando en cauces de orden superior formando luego los tributarios principales de los grandes ríos. Cuando la cuenca carece de pendiente, como es el caso las llanuras, no existe un sistema de drenaje jerarquizado y predomina el escurrimiento en forma laminar (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Fattorelli y Fernández, 2011).

- Escorrentía subsuperficial

El flujo subsuperficial es aquella porción de la precipitación que se infiltra y se mueve lateralmente por la parte superior del perfil del suelo hacia los cursos o canales del sistema de drenaje de la cuenca (Fattorelli y Fernández, 2011).

- Escorrentía subterránea

El flujo subterráneo es aquella parte del flujo que se forma principalmente por percolación profunda en la misma cuenca (acuíferos a presión atmosférica o estratos profundos de suelo con presencia del nivel freático), o por el aporte de precipitaciones (lluvia, fusión nival y glacial) en cuencas confinadas entre capas de suelo impermeables y bajo presión superior a la atmosférica. En el contexto general del ciclo hidrológico, los diferentes aportes al flujo subterráneo descargan finalmente en los cauces, con mayor o menor retardo según sea la conductividad hidráulica del suelo y la pendiente del acuífero (Fattorelli y Fernández, 2011).

De los tres tipos de escorrentía, en una duración de tormenta del tipo aplicado en este estudio, las escorrentías subsuperficial y subterránea son prácticamente despreciables, por lo tanto, no se tienen en cuenta en este caso.

4.1.2 Factores climáticos y fisiográficos que afectan la escorrentía

El principal efecto y uno de los más importantes es el climático, relacionado a la intensidad y duración de la lluvia. Está totalmente relacionado a la capacidad de infiltración del suelo, ya que, si la intensidad de la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración del suelo, todo el excedente de la lluvia es escorrentía superficial.

La intensidad se relaciona con la duración de la precipitación (lamina/tiempo), es decir, una lluvia de intensidad 40 mm probablemente no produzca escorrentía en 24 hs, pero en una hora produce una crecida importante.

Otro factor importante es si la cuenca receptora está ubicada en zonas de climas húmedos, ya que el perfil de suelo ya estaba saturado previamente y las lluvias posteriores sean de baja o alta intensidad producen fuertes crecientes.

Con relación a los efectos fisiográficos se pueden considerar:

- Relativos a la cuenca: tamaño, forma, pendiente, orientación.
- Densidad y forma de la red de drenaje.
- Altitud: presencia de lagos y depresiones, uso del suelo, cobertura vegetal (tipo y densidad), tipo de suelo (capacidad de infiltración, permeabilidad, presencia de capas freáticas).
- Parámetros geomorfológicos como rectángulo equivalente y otros.

4.2 La Cuenca y sus características

Una cuenca hidrográfica es toda el área del terreno que aporta agua de escorrentía a un mismo punto de salida, es decir, las aguas superficiales convergen hacia un cauce delimitado por la existencia de la divisoria de aguas y fluyen hacia el punto de salida a través de la red de cauces principales. Si el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca, se habla de endorreísmo (Cuenca endorreica); pero si se encuentra sobre el mismo límite se habla de Cuenca exorreica. La cuenca vertiente (Fig. 19) recoge la precipitación y la transforma en escurrimientos dependiendo de sus características morfológicas, topográficas, edáficas, climáticas y de vegetación (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).

El transporte del escurrimiento dentro de la cuenca hasta el punto de salida sufre pérdidas y retardos, debido a varios fenómenos que condicionan la relación entre la precipitación y la escorrentía, y que están controlados por las características físicas de la cuenca. Estas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. Por lo tanto, la forma, relieve, naturaleza edáfica y cubierta vegetal de la cuenca influyen directamente tanto en el volumen de los escurrimientos como en su distribución en el tiempo (Aparicio Mijares, 1992; Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996; Fattorelli y Fernández, 2011).

La cuenca es un espacio territorial natural independiente de las fronteras político-administrativas internas de un país o de fronteras internacionales (Ordoñez Gálvez, 2011).

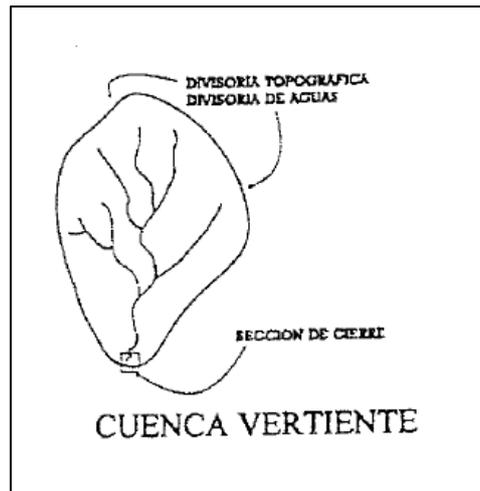


Figura 19. Cuenca vertiente, sección de cierre y divisoria de aguas (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 1996).

La divisoria es la línea topográfica que separa superficialmente dos cuencas hidrográficas o sistemas de drenaje independiente en dirección y sentido, cuyas salidas no necesariamente coinciden en un río común determinado. Son los puntos de mayor nivel topográfico que definen la dirección de circulación del escurrimiento superficial.

4.2.1 Delimitación de cuencas

La delimitación exacta de las cuencas se efectúa sobre los planos correspondientes a las restitutiones planialtimétricas a escala adecuada. En todos los casos se determina primero la línea de contorno de cada cuenca coincidente con la divisoria topográfica (Fatorelli y Fernández, 2011).

La obtención de la delimitación de las cuencas del área de estudio y la definición de la red de drenaje se realizó mediante el geoprocesamiento de la información proporcionada por el MDE. El mismo fue extraído del IGN que cubre la totalidad del territorio continental nacional, con una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 a 3 m.

Mediante las herramientas que brinda el *software* ArcGIS (SIG) se pudo dar con la delimitación de las cuencas por medio de las siguientes funciones:

- *Fill*: Rellena sumideros en un ráster de superficie para eliminar pequeñas imperfecciones en los datos. Un sumidero es una celda con una dirección de drenaje indefinida y las celdas que lo rodean son más bajas. El llenado de vacíos se realiza para que la cuenca tenga continuidad y salida única sin zonas de depresión que implique un estancamiento del flujo.
- *Flow direction*: Crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada, indica la inclinación que posee cada *pixel*.
- *Flow Accumulation*: Crea un ráster de flujo acumulado para cada celda. Es una capa de acumulación de aporte, la cual representa en un punto determinado la

cantidad de píxeles que drenan a él. Por medio de esta capa se identifica la red de drenaje.

- *Con*: Ráster que determina la hidrografía al establecer un umbral mínimo (valor condicionante) de acumulación de aporte hídrico para que sea considerado un cauce torrencial. Se define un valor para el área mínima de captación, para la concentración del flujo. Las celdas o píxeles con un valor mayor al otorgado serán drenajes y los que posean valores menores no lo serán. Define la red hídrica.
- *Aforos*: Se establece un *shape* de puntos para determinar la salida o cierre de las cuencas.
- *Snap Pour Point*: Alinea los puntos de fluidez a la celda de acumulación de flujo más alta dentro de una distancia específica. Buscará, dentro de una distancia de alineación alrededor de los puntos de fluidez especificados, la celda de flujo acumulado más alto y moverá el punto de fluidez a esa ubicación. Fuerza a los puntos de aforo a caer dentro de la red hídrica.
- *Watershed*: Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster, es decir, define todas las celdas que fluyen hacia el punto de aforo y delimita las cuencas hidrográficas.
- *Raster to Polygon*: Convierte la capa ráster de cuenca en una capa vectorial de polígonos para cuando se demande, obtener los parámetros de interés hidrogeológico.
- *Raster to Polyline*: Convierte la capa ráster de la red hídrica en una capa vectorial de polilíneas.

4.2.2 *Parámetros principales*

Según Brieva (2018), el primer paso para la comprensión y el análisis de los procesos hidrológicos que se producen en una cuenca es el de conocer las características físicas y morfométricas, las cuales son la base cuantitativa para predecir la respuesta de una cuenca ante una precipitación. Se tienen parámetros asociados a la forma, parámetros relativos al relieve y parámetros relativos al drenaje.

Hay ciertos parámetros que son posibles determinarlos por medio de la utilización del *software* ArcGIS a partir de los resultados del geoprocesamiento del MDE; y hay otros parámetros que se obtienen a partir de la aplicación de ecuaciones (relación de elongación, densidad de drenaje, factor de forma, etc.).

A continuación, se describen los más importantes:

4.2.2.1 *Parámetros físicos asociados a la forma de la cuenca*

La forma de la cuenca condiciona de manera importante la velocidad del escurrimiento superficial y las características del hidrograma de salida. Es particularmente importante, junto con las características del relieve, en los eventos de crecidas máximas. En general, las cuencas de igual área, pero de diferente forma, generan hidrogramas diferentes.

- a) Área (A): Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escurrimiento dirigido a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa habitualmente en km² o hectáreas.
Este parámetro se estima a partir del polígono de la cuenca, que se obtiene del análisis GIS, a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de cuencas.

- b) Perímetro de la cuenca (P): Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en kilómetros.
Se estima de igual manera, a partir del polígono de la cuenca, que se obtiene del análisis GIS, a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de cuencas

- c) Longitud de la cuenca (L): Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (estación de aforo o salida) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca. Se expresa normalmente en kilómetros.
Se estima a partir de la superposición de la red de drenaje y el polígono de la cuenca que se obtiene del análisis GIS utilizando la función *Measure*.

- d) Coefficiente de compacidad o Índice de Gravelius (Kc): Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de la misma superficie. En base a este valor se pueden clasificar a las cuencas según su forma en redonda (Cg: 1 a 1,25); ovalada (Cg: 1,25 a 1,50) y alargada (Cg: 1,5 a 3). Este coeficiente adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Nunca los valores del coeficiente de compacidad serán inferiores a uno. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea, es decir mayor concentración de agua.

$$Kc = 0,282 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right)$$

- e) Factor de forma de Horton (Kf): Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca (adimensional).

$$Kf = A/L^2$$

El factor de forma puede dar información sobre las características de una cuenca como por ejemplo cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y la tendencia a presentar crecidas. Cuando Kf es menor a uno, la cuenca presenta forma alargada. Un factor de forma bajo indica que la cuenca es larga y estrecha, el escurrimiento no se concentra tan rápido y, por lo tanto, no es propensa a crecidas. Además, una cuenca con Kf bajo, es menos propensa a tener una lluvia intensa simultáneamente sobre toda su superficie. Por el contrario, cuando Kf es cercano o superior a la unidad, la cuenca presenta forma redondeada, por lo que tenderá a concentrar el escurrimiento de una precipitación intensa generando grandes crecidas. Por otra parte, un factor de forma alto puede indicar cuencas con mucha pendiente, mientras que, un factor de forma bajo puede significar cuencas con poca pendiente

Tabla 1. Formas de la cuenca según valores aproximados (Brieva, 2018).

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada, ni achatada
0.45 – 0.60	Ligeramente achatada
0.60 – 0.80	Achatada
0.80 – 1.20	Muy achatada
> 1.20	Rodeando el desagüe

- f) Relación de elongación (Re): Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y la longitud de la misma. Su fórmula es la siguiente:

$$Re = (4A / \pi)^{1/2} / L$$

El valor de la relación de elongación se acerca a la unidad cuando la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales, la relación de elongación está entre 0.5 y 0.8.

4.2.2.2 Parámetros físicos relativos al relieve

- a) Curva Hipsométrica: Es la relación entre el porcentaje de altura y porcentaje de área de la cuenca. Muestra estados de equilibrio o madurez e inequilibrio o juventud (procesos erosivos). Representa gráficamente las cotas del terreno en función de las superficies que estas encierran. La curva hipsométrica muestra la potencialidad erosiva debido a la forma de la distribución de sus pendientes comparada con curvas patrones. Indica la presencia de una cuenca joven, madura o vieja (Fig. 20).

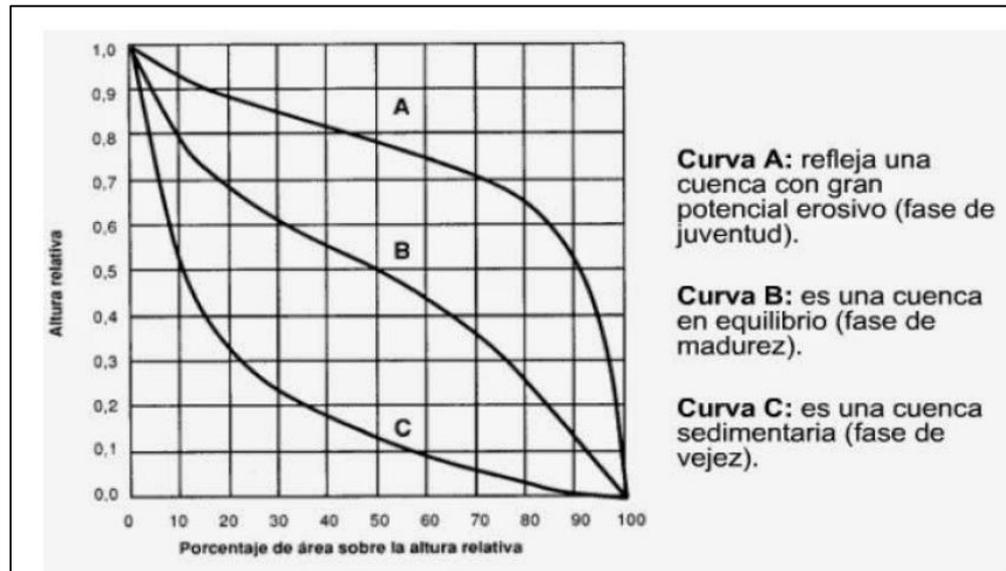


Figura 20. Curvas hipsométricas patrones (Brieva, 2018).

- b) Pendiente media de la cuenca (S): Es la variación de la inclinación de una cuenca y se define como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a las áreas elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante. Este parámetro influye en el comportamiento hidrológico de la cuenca dado que tiene relación con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. La pendiente incide en la velocidad media de escorrentía y, por lo tanto, en el poder de arrastre y la erosión sobre la cuenca. A su vez, el gradiente de pendiente influye indirectamente en el tiempo de concentración, a través de la velocidad de escorrentía. Por lo tanto, controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación con la magnitud de las crecidas. En zonas de altas pendientes, se presentan mayormente procesos de erosión, mientras que en regiones planas aparecen principalmente procesos de drenaje y sedimentación.
Se obtiene de analizar el mapa de pendientes con el polígono de la cuenca en SIG.
- c) Pendiente media del cauce principal (Sc): Consiste en determinar el desnivel entre los puntos más elevados y bajos del cauce (Cotas) y luego dividirlo por la longitud del mismo cauce L.
Se obtiene superponiendo la información de pendientes con la red hidrográfica.

4.2.2.3 *Parámetros relativos a la red de drenaje*

- a) Longitud del cauce principal (Lc): Es la distancia que recorre el cauce desde su origen aguas arriba hasta su desembocadura. En general, los caudales crecen con la longitud de los cauces debido a que existe una relación directa entre la longitud de estos y las áreas de las cuencas hidrográficas correspondientes. Una longitud mayor supone mayores tiempos de desplazamiento de las crecidas y como consecuencia, mayor atenuación de las mismas, por lo que los tiempos de concentración y las duraciones totales de estas serán mayores

Se obtiene del análisis de la red de drenaje mediante SIG a través de la función *Calculate Geometry* dentro de la tabla de atributos del *shape* de la red de drenaje.

- b) Tiempo de concentración (Tc): Es uno de los parámetros más importantes para el diseño hidrológico. Es el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca una gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la misma. Este parámetro es característico de cada cuenca y tiene relación con sus propiedades físicas. También es definido como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa, siendo este último valor, el punto de inflexión del hidrograma después del caudal pico.

Hay distintas formas de calcularlos según varios autores. Algunos de los métodos más usados son:

- Témez (1978):

$$Tc = 0,3 \left(\frac{Lc}{Jc} \right)^{0,76}$$

donde Tc: tiempo de concentración, Lc: longitud del mayor recorrido del escurrimiento (km) y Jc: Pendiente del curso principal (m/m).

- Kirpich (1940)

Es válido para cuencas entre 0.5 y 45 hectáreas y pendientes entre el 3 y 10%. Su fórmula es:

$$Tc = 0,066 \frac{(Lc)^{0,77}}{\sqrt{Js}}$$

- Servicio de Conservación de suelos (1973):

$$Tc = \frac{Lc^{0,8} (CN - 9)^{0,7}}{441 * Jc^{0,5}}$$

donde T_c : tiempo de concentración, L_c : longitud del mayor recorrido del escurrimiento (m), CN : número de curva y J_c : Pendiente de la cuenca en (%). La ecuación es desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) a partir de información de cuencas de uso agrícola. La misma ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con área inferiores a 800 ha.

Para la selección del tiempo de concentración se adopta como criterio, en este trabajo final, calcular el promedio de los valores de tiempo de concentración obtenidos mediante las ecuaciones antes mencionadas.

4.3 Modelación de cuencas

Los modelos permiten simular el comportamiento de un sistema real y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un determinado impulso o entradas al sistema. En hidrología e hidráulica se usan modelos: físicos, analógicos y matemáticos.

A partir de los años 80, el intenso desarrollo de los sensores remotos y la tecnología espacial ha proporcionado a los hidrólogos la oportunidad de densificar la información que es generalmente dispersa, como también agilizar y facilitar el conocimiento espacial de las cuencas con menores tareas de campaña.

Otra técnica que ha producido un verdadero cambio en el procesamiento y manejo de datos geográficos es el desarrollo de los “Sistemas de Información Geográfica” (SIG), facilitando la implementación, calibración, evaluación y comparación de modelaciones de cuencas. La variabilidad espacial de las condiciones físicas, vegetación y uso del suelo, precipitación, movimiento de las tormentas, se definen ahora con el uso de estas técnicas, lo cual facilita la calibración de los modelos (Fatorelli y Fernández, 2011).

4.3.1 Hidrogramas

Un hidrograma (Fig. 21) es la representación gráfica del caudal “ Q ” o volumen de agua que pasa por una sección en determinado tiempo (Fatorelli y Fernández, 2011). En el hidrograma de una creciente, se pueden distinguir los siguientes componentes:

- Escorrentía directa (Q_d): Es aquella parte de la creciente que escurre inmediatamente como escorrentía superficial por efecto de la lluvia neta o efectiva.
- Flujo Base (Q_b): Es el caudal de un cauce que se debe al aporte de aguas subterráneas o a la precipitación que se infiltra.
- Tiempo de retraso (T_r): Es el tiempo que transcurre entre el centro de gravedad del hietograma de la lluvia y el centro de gravedad del hidrograma de la creciente.
- Tiempo de concentración (T_c): Es el tiempo que transcurre para que la partícula de agua del punto más alejado llegue a la sección de control.
- Tiempo pico (T_p): Es el tiempo comprendido entre el inicio de la creciente y el caudal máximo.
- Tiempo base (T_b): Es la duración de la creciente.
- Precipitación efectiva (P_e): Es la porción de la precipitación que produce escorrentía directa.
- Precipitación total (P_t): Es la lámina caída en una tormenta sobre la cuenca.

- Pérdidas (I_a): Es la parte de la precipitación que no aporta a la formación de la escorrentía directa.
- Caudal máximo (Q_{max}): Es el pico del hidrograma.
- Curva ascendente o de concentración del hidrograma: Es la línea del hidrograma que precede al caudal máximo. Depende fundamentalmente de la intensidad, ubicación y distribución de la tormenta sobre la cuenca. Se ha observado una incidencia notable de las condiciones de humedad del suelo por efecto de la precipitación antecedente.
- Curva descendente o de recesión: Es la línea del hidrograma posterior al caudal máximo. Se da cuando la lluvia ha terminado o ha disminuido su intensidad, produciendo una curva de agotamiento.

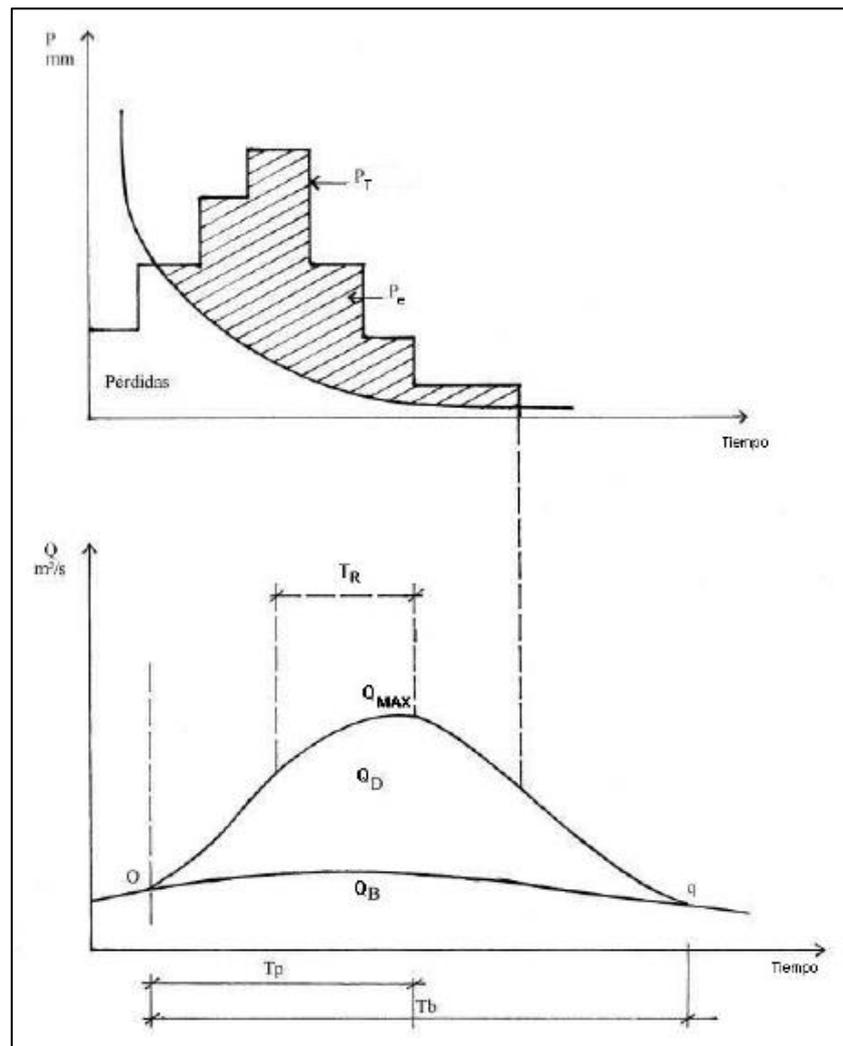


Figura 21. Componentes del hidrograma (Fatorelli y Fernández, 2011).

Existen diferentes métodos para el cálculo del hidrograma generado por la precipitación de interés. Estos métodos son el método racional, hidrograma sintético e hidrograma unitario. En este estudio, se respetaron las especificaciones de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén, que establece que la estimación de hidrogramas de crecida en cuencas mayores a las 120 ha se debe realizar con el método del hidrograma unitario. Mientras que, para cuencas de superficie menor a las 120 ha, se debe emplear el método racional.

4.3.1.1 *Hidrograma unitario*

El hidrograma unitario de una cuenca es el hidrograma de volumen unidad producido por una lluvia directa unitaria distribuida uniformemente sobre el área de la cuenca en un período determinado de tiempo (Sherman, 1932). Este método se encuentra fundado en una serie de principios como el de constancia del tiempo de base, de afinidad o proporcionalidad, y el de superposición:

- Principio de constancia del tiempo de base: Para una cuenca receptora dada, la duración de la escorrentía superficial correspondiente a lluvias de la misma duración es constante e independiente de la precipitación.
- Principio de proporcionalidad o afinidad: Para una cuenca receptora dada, dos chaparrones de intensidad uniforme y de misma duración, pero volúmenes distintos, producen caudales proporcionales a dichos volúmenes.
- Principio de superposición o de independencia: La distribución temporal de la escorrentía superficial correspondiente a un aguacero tipo es independiente de las precipitaciones de períodos anteriores

4.3.1.2 *Tránsito de Ondas en Ríos*

Es un concepto muy importante para tener en cuenta en diseño hidrológico. El proceso de tránsito de ondas o tránsito de hidrogramas “*Streamflow Routing*” se utiliza para predecir la variación espacial y temporal de un hidrograma de una creciente cuando este se propaga o transita por el tramo de un río considerado. El efecto de embalse “*storage*” y la resistencia al movimiento del agua se ve reflejado en los cambios de forma del hidrograma cuando este se mueve desde aguas arriba hacia aguas abajo (Fig. 22). Refleja el concepto de la pérdida de energía a lo largo de un cauce, canal o río. Esto en una onda de avenida influye en el pico del caudal y en el tiempo base, de esta manera, el caudal pico disminuye con el paso del tiempo. Es decir, que el hidrograma sufre procesos de retardo y atenuación, efecto conocido como “laminación de una onda de avenida”.

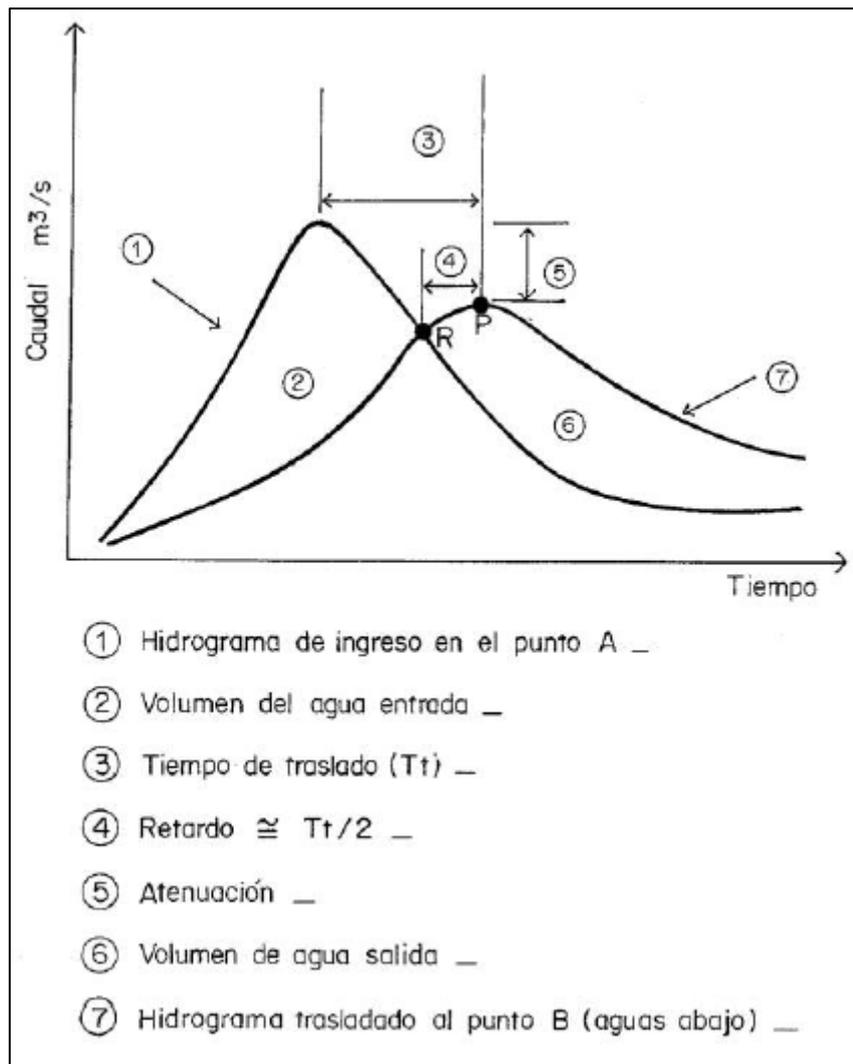


Figura 22. Efectos del traslado de un hidrograma en un tramo AB de un río (Fatorelli y Fernández, 2011).

4.3.2 Método del Servicio de Conservación de Suelos (Numero de Curva)

La metodología desarrollada por el Soil Conservation Service (SCS), hoy Natural Resources Conservation Service (NRSC), ocupa un lugar primordial en el “diseño hidrológico” por su practicidad, capacidad operativa y aceptables resultados.

Los primeros trabajos del SCS se refieren principalmente a áreas cultivadas, luego se ha extendido a áreas naturales y urbanas.

La determinación de la escorrentía directa o precipitación efectiva como resultado de una precipitación caída en un área dada, es función de numerosas variables: tipo y uso del suelo, pendiente, vegetación, porcentaje de cobertura, grado de humedad, temperaturas precedentes, etc. El SCS ha elaborado una metodología para la estimación de dicho escurrimiento comprobada en un gran número de cuencas de los Estados Unidos, Europa y América (Fatorelli y Fernández, 2011).

El método calcula las abstracciones de la precipitación de una tormenta y considera que el exceso de precipitación o precipitación efectiva Pe es siempre menor o igual que la precipitación total P . Asimismo, después de que la escorrentía se inicia, el agua retenida en la cuenca Fa es menor o igual que la retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación Ia (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía ya que el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de escorrentía (Ia), luego la escorrentía potencial es $P - Ia$ (Chow *et al.*, 1994).

La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales:

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia}$$

Por el principio de continuidad se tiene que:

$$P = Pe + Ia + Fa$$

Combinando las expresiones previas y resolviendo para Pe se obtiene la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Donde:

Pe es la precipitación efectiva o escurrimiento superficial real.

P es la precipitación total.

Ia es la abstracción inicial o umbral de escorrentía previa al encharcamiento que es la altura mínima de lluvia necesaria para que se produzca escorrentía superficial, es decir, el volumen de agua que se infiltra antes de que comience la escorrentía. Se corresponde con la cantidad de agua inicial retenida por intercepción, embalse superficial, evaporación e infiltración, antes de iniciarse la escorrentía.

S es la retención potencial máxima o pérdidas máximas posibles. Este parámetro depende del tipo de suelo, de la condición de humedad antecedente, de la cobertura vegetal y del uso y tratamiento del suelo.

$P - Ia$ es la escorrentía potencial o el escurrimiento superficial máximo, es decir, el máximo volumen de agua que puede convertirse en escorrentía.

A través del estudio de los resultados obtenidos en muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica entre Ia y S :

$$Ia = 0.2 S$$

Por lo tanto, reemplazando se obtiene:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

El parámetro S se relaciona con el Numero de Curva (CN) según:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Los números de curva expresan la capacidad de la cuenca para producir escorrentía y se encuentran tabulados en función de:

- Uso y tratamiento del suelo
- Cobertura vegetal
- Tipo de suelo. Se distinguen cuatro grupos hidrológicos de suelo a partir de la textura, su espesor, potencial de escurrimiento y capacidad de infiltración:
 - Grupo A: Son suelos profundos y de texturas gruesas. En ellos el agua se infiltra rápidamente aun cuando están húmedos. Su potencial de escurrimiento es mínimo por su gran permeabilidad.
 - Grupo B: Son suelos francos y profundos, de escaso espesor. Presentan moderada permeabilidad aun cuando están saturados, con valores mínimos de velocidad de infiltración. Potencial de escurrimiento medio.
 - Grupo C: Son suelos franco – arcillosos e incluso arcillosos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Se incluyen en este grupo suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables. Potencial de escurrimiento alto y valores mínimos de velocidad de infiltración.
 - Grupo D: Son suelos muy arcillosos y profundos con alto grado de tumefacción. Se incluyen en este grupo terrenos que presentan una capa de arcilla muy somera e impermeable, así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, suelos salinos o con alto nivel freático. Son suelos con un potencial de escurrimiento máximo y con valores mínimos de velocidad de infiltración.

Tabla 2. Clasificación de suelos según el potencial de escurrimiento (Fatorelli y Fernández, 2011).

Tipo de suelo	Potencial de escurrimiento
A	Mínimo
B	Medio
C	Alto
D	Máximo

- Condición de humedad antecedente: Se distinguen tres condiciones en relación con el estado de humedad del suelo previo a la precipitación.
 - Condición I: Suelo muy seco sin llegar al índice de marchitez.
 - Condición II: Suelo en situación normal, alejado de la capacidad de campo, pero también alejado del punto de marchitez permanente.
 - Condición III: Suelos saturados o muy próximo a la saturación.

El Curva Numero puede tomar valores entre cero y cien. A mayor número se obtiene un umbral de escorrentía menor, lo que se traduce en un mayor escurrimiento. Un valor de $CN = 100$ indica que la cuenca es impermeable, es decir, todo lo que llueve escurre (Fattorelli y Fernández, 2011).

4.3.3 Tormentas de diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema y los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia - escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación (Chow *et al.*, 1994).

Para este Trabajo Final de Licenciatura, se define la tormenta de diseño mediante un hietograma que especifica la distribución temporal de la precipitación durante la tormenta (Fig. 23). El mismo, se encuentra ya definido y disponible en la página de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén.

Una tormenta de diseño es aquella que, para determinada probabilidad de ocurrencia y duración, proporciona tanto el valor más probable de lámina total, así como su distribución espacial y temporal.

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en un proyecto de diseño hidrológico es la determinación del evento de precipitación que debe utilizarse. La forma más común de hacer esto es utilizar una tormenta de diseño que involucre una relación entre la intensidad de precipitación, la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio de estudio. En muchos casos existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (IDF) disponibles para el sitio que representan la relación entre la intensidad o la lámina de la lluvia que precipita en un determinado tiempo y su frecuencia estadística de ocurrencia. Generalmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli y Fernández, 2011).

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). La duración de la tormenta está dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow *et al.*, 1994).

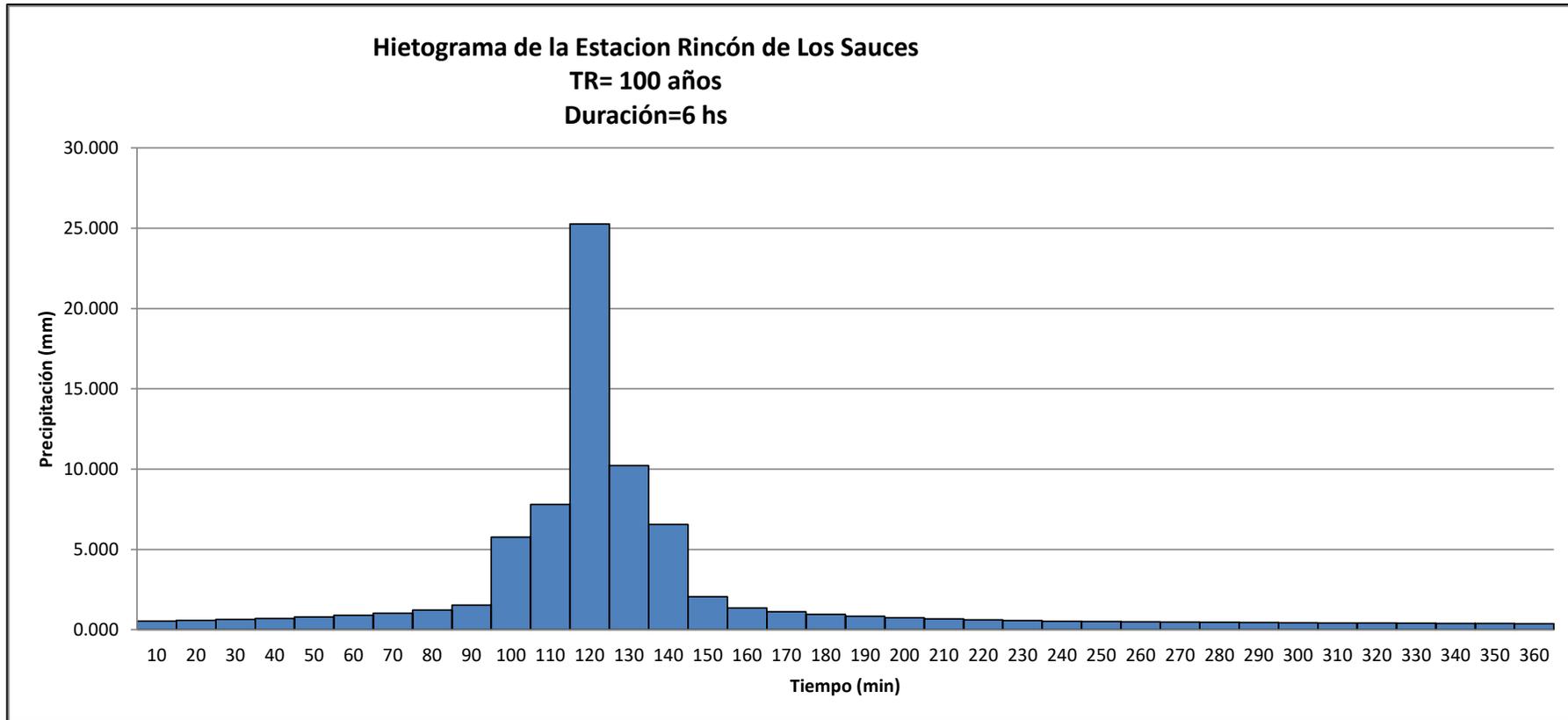


Figura 23. Distribución temporal de la tormenta utilizada para este trabajo final (Hietograma) (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén).

4.3.3.1 Datos de precipitación

Por la ubicación del área de estudio, se utilizaron los datos de precipitaciones de la Estación Rincón de los Sauces ubicada en la localidad homónima (Latitud: 37° 22' 49,6" S, Longitud: 68° 57' 28,8" O). Los mismos se encuentran disponibles en la página de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén.

Para una recurrencia de 100 años, la precipitación máxima en 24 horas (P24h), la precipitación máxima en 1 hora (P1h) y la intensidad media máxima en 24 hs (I24h) son:

Tabla 3. Valores de precipitaciones para una recurrencia de 100 años en Estación Rincón de los Sauces (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén)

Tr (años)	P24h (mm)	P1h (mm)	I24h (mm/h)
100	99	58.41	4.13

4.4 Sistemas de Información Geográfica

La mayor parte de la de la información que manejamos en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada. Es decir, se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por lo tanto información que viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización.

Si bien esto no es un hecho novedoso, la situación actual es más favorable que nunca para el desarrollo de herramientas que permitan el aprovechamiento de toda esa información, al tiempo que se consideran los datos relativos a su posición en el espacio. Hoy en día no solo trabajamos con gran cantidad de información referenciada geográficamente, sino que somos cada vez más conscientes de la importancia que esa componente geográfica tiene.

En ese contexto, un SIG es, fundamentalmente, una herramienta para trabajar con información georreferenciada. Dentro de esta definición entran un gran número de tecnologías y de otros elementos no tecnológicos (Olaya, 2020).

Básicamente, un SIG permite la realización de las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos.
- Generación de resultados como mapas, informes, gráficos, etc.

En palabras habituales, un SIG es un conjunto de *software* y *hardware* diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos.

Las ciencias naturales enfatizan a los SIG como una herramienta para la toma de decisiones aplicado a la problemática ambiental, y autores como Chuvieco (2002) remarcan a los SIG como herramientas para la mejor gestión de la información disponible del territorio.

Los SIG son utilizados por disciplinas relacionadas con el manejo de información espacial, dentro de ellas la hidrología. Su mayor potencial radica en la representación de

la variabilidad de parámetros espaciales complejos, realizar operaciones entre ellos y facilitar la observación de sus relaciones espaciales, patrones y tendencias. Otras bondades, en líneas generales, es la aptitud para el aumento de la resolución espacial de trabajo a todos los niveles, análisis de la variación espacial de factores como coeficientes de escorrentía o similares, que se consideraban como parámetros de valor único y constante, como así la observación de la variación espacial de la precipitación, que se consideraban como elemento constante y estático.

Los SIG representan los elementos que existen en la naturaleza mediante formas geométricas (puntos, líneas o polígonos, esto es, vectores) o mediante celdas con información (ráster). Son formas de ilustrar el espacio intuitivo y versátil, que ayudan a comprender mejor los elementos objeto de estudio según su naturaleza. El formato ráster permite realizar operaciones de parámetros complejos en la hidrología, admite el almacenamiento de la información de modo regular en unidades predefinidas, representando la superficie en elementos divididos regularmente y a los cuales se le asocia un valor correspondiente a la variable estudiada en dicho elemento. En el caso más frecuente, estos suelen ser generalmente celdas de tipo cuadrado, lo que permite asimilar la estructura de mosaico con elementos cuadrados sobre la cual es posible efectuar los cálculos pertinentes. Este hecho da lugar a un análisis más sencillo y potente de las variaciones de las propiedades en el espacio, permitiendo así mismo un manejo eficiente y adecuado de información de tipo continuo.

El inconveniente principal del modelo ráster reside en la discretización del espacio a la que da lugar, responsable directa de una pérdida de precisión y la cual debe ser asumida desde un primer momento a la hora de trabajar bajo este modelo de almacenamiento. Si bien esta desventaja puede ser disminuida disminuyendo el valor de las celdas en función de la escala a que se desea representar los parámetros, esto implica así también un aumento del peso de almacenamiento del formato.

4.4.1 Álgebra de mapas

Se entiende por álgebra de mapas al conjunto de técnicas y procedimientos que, operando sobre una o varias capas en formato ráster, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de nuevas capas de datos (Fig. 24).

Es posible insertar funciones a una variable cuantitativa la cual está representada por el píxel y posteriormente mediante una función matemática (por ejemplo, *Raster Calculator* en ArcGis) obtener otra variable, sea cuantitativa o cualitativa.

En la Fig. 25 se puede observar una sumatoria y superposición de capas ráster. La función algebraica sería la suma. Cada una de las variables (o mapas) que se suman, son un mapa de temperatura, de vientos y mapas de precipitaciones, dando como resultado un mapa de susceptibilidad al cambio climático de una zona.

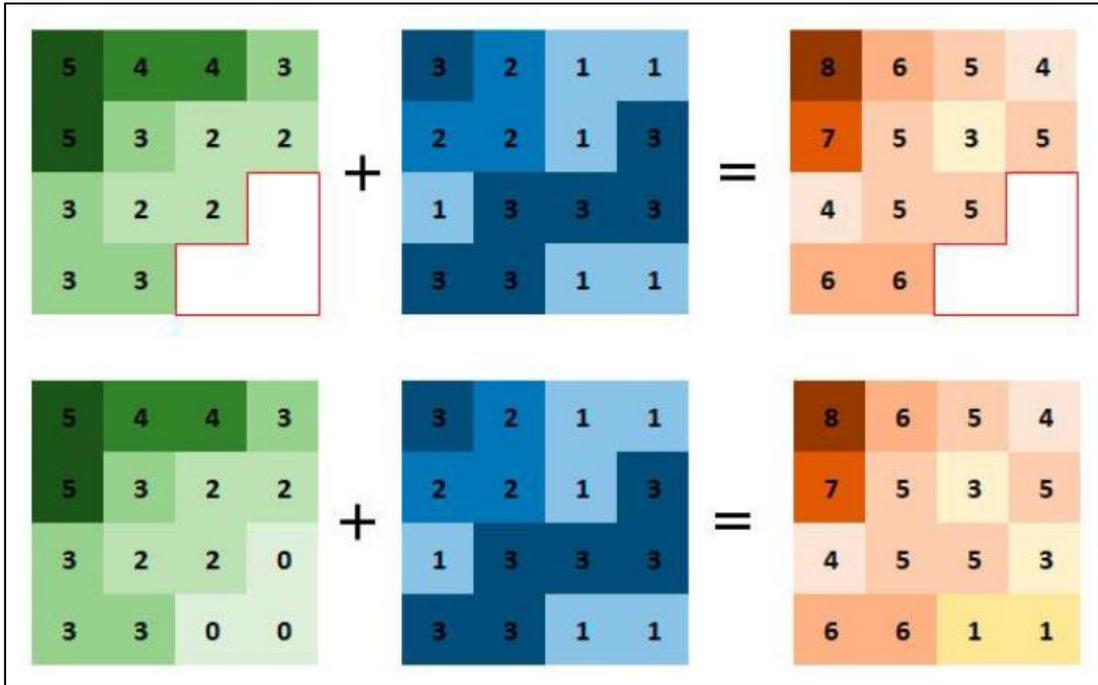


Figura 24. Sumatoria de capas ráster o capas de datos y sus resultados (Fuente: geoinnova.org).

Aunque nada impide que este proceso se lleve a cabo sobre capas vectoriales, se entiende que el álgebra de mapas hace referencia al análisis desarrollado sobre capas ráster, estas, por su estructura regular y características inherentes, son mucho más adecuadas para plantear algoritmos y formulaciones correspondientes.

Si se analizan las prácticas geográficas hasta nuestros días, se puede observar que el álgebra de mapas como proceso de análisis no es algo nuevo.

La idea de utilizar mapas existentes para generar otros nuevos o simplemente extraer de ellos resultados cuantitativos es una práctica común desde el mismo momento en que aparece la cartografía moderna. Sin embargo, es con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica y la posibilidad de procesar los datos geográficos en un entorno informatizado cuando se dota de formalismo a estos planteamientos y se define con rigor el conjunto de herramientas de análisis (Olaya, 2020).



Figura 25. Sumatoria del mapa de precipitaciones, vientos y temperaturas. Dando como resultado un mapa de susceptibilidad al cambio climático de una zona (Fuente: geoinnova.org).

Un ejemplo práctico de álgebra de mapas se aplica para Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo de la USLE:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

donde A representa las pérdidas totales en toneladas por hectárea y año, y los factores R; K; LS; C y P representan la influencia de los diversos factores (agresividad del clima, tipo de suelo, topografía, uso de suelo, y prácticas de conservación) sobre dichas pérdidas. La USLE representa, por lo tanto, un modelo sencillo que combina cinco variables, todas ellas susceptibles de ser recogidas en las correspondientes capas ráster. Si extendemos el cálculo puntual de la variable “A” a todos los puntos de la zona estudiada, obtendremos una nueva capa de dicha variable, evaluando la anterior expresión para cada una de las celdas de esas capas ráster (Fig. 26).

La discretización del espacio que implica la representación en formato ráster de un parámetro sobre una superficie dada hace que ese análisis de “todos los puntos” se materialice en un análisis de todas las celdas que contiene la nueva capa a obtener. Esto nos hace ver la idoneidad de este formato para trasladar las ideas matemáticas de modelos sencillos como la USLE a un álgebra de mapas donde estos modelos no se apliquen en un emplazamiento concreto, sino en toda una región de interés a tratar

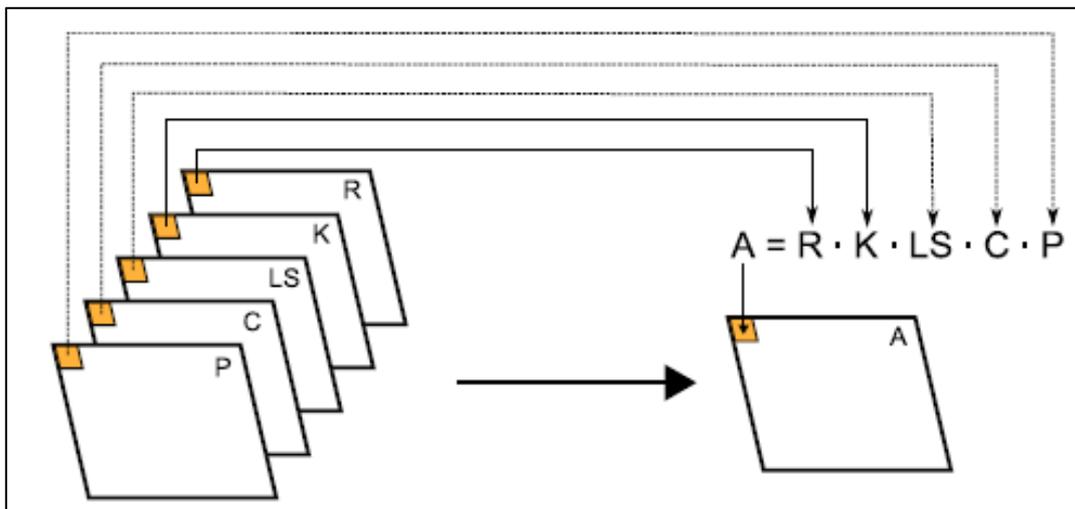


Figura 26. Nueva capa de la variable “A” luego de la combinación de las cinco variables de la ecuación (Olaya, 2020).

Otro ejemplo sería querer obtener junto con el mapa de pérdidas de suelo logrado anteriormente, una división de subcuencas en el área de estudio.

Puede resultar interesante asociar a cada una de las unidades hidrológicas un valor relacionado con los valores de pérdidas de suelo que se dan en ella, por ejemplo, la media de los valores de pérdidas de suelo de las celdas de las subcuencas. Partiendo de estos dos mapas se puede obtener un tercero que indique las pérdidas medias en cada cuenca, de interés sin duda para localizar las unidades que puedan presentar mayores problemas de erosión (Fig. 27).

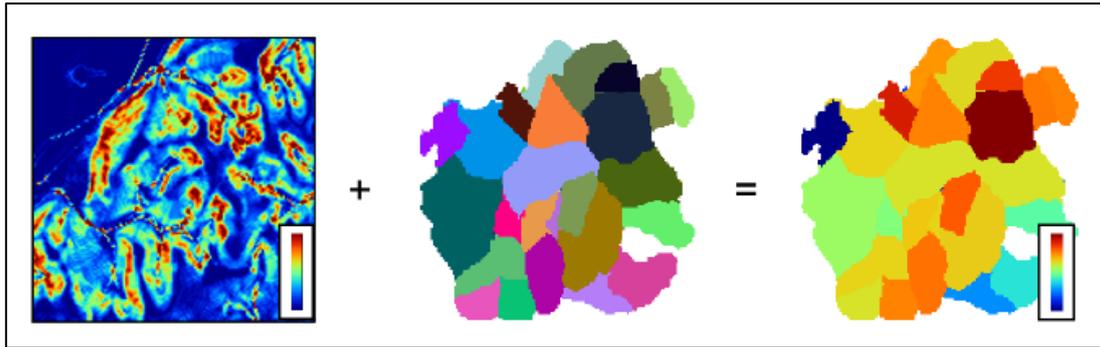


Figura 27. Pérdidas medias en cada subcuenca obtenidas luego de aplicar álgebra de mapas sobre los mapas de subcuencas y de pérdidas de suelo generales (Olaya, 2020).

En fin, el álgebra de mapas nos proporciona las herramientas necesarias para analizar capas ráster y obtener de ellas resultados derivados. Bien sea a partir de una capa, de dos, o de una batería de ellas, las funciones del álgebra de mapas definen un marco formal de procesos dentro del cual desarrollar los más diversos análisis.

4.4.2 Procedimientos en el entorno SIG

El geoprocésamiento implica la ejecución metódica de una secuencia de operaciones de los datos geográficos para crear nueva información. La capacidad de localizar de manera precisa los datos es fundamental tanto en la representación cartográfica como en SIG. Los datos, tanto vectoriales como ráster, fueron trabajados en este trabajo final mediante un único sistema de coordenada planas. Se empleó para este trabajo final el marco de referencia geodésico nacional Posiciones Geodésicas Argentinas (POSGAR 94) del año 1994, faja N°2.

4.4.2.1 Estimación de la distribución espacial del CN con técnicas SIG

Las imágenes de satélite en el apoyo de los estudios de cobertura vegetal y clasificación de suelos se usan como técnica de diseño para el método del SCS-CN desde la década del 70 del siglo pasado. Con el perfeccionamiento de las imágenes satelitales (Landsat) en relación con su resolución y color, esta técnica es hoy de uso corriente en diseño hidrológico, no solo para ayudar a la determinación de la cobertura vegetal y uso de suelo, sino en aplicaciones como índices de infiltración, erosión, evaporación, entre otras (Fatorelli y Fernández, 2011).

Tal como se utiliza en este Trabajo Final y en el caso del apoyo a la estimación del CN que resulta de importancia en el cálculo de escorrentía directa, resulta fundamental la medida y el mapeo de la densidad de vegetación, para lo cual se utiliza el índice NDVI. Valores bajos de este índice corresponden a áreas desprovistas de vegetación (como áreas hidrocarburíferas) y valores altos a vegetación densa. El índice va de 0 a 1.

Para la determinación del CN mediante SIG es necesario saber que un parámetro sensible para la determinación del mismo es la clasificación hidrológica de suelos o Grupo Hidrológico de Suelo (GHS). En particular, el problema radica en que no se cuenta con cartografía que represente este parámetro y, por lo tanto, suele asignarse en forma cualitativa y en función de la experiencia del diseñador (Fatorelli y Fernández, 2011).

Las cuencas hidrográficas presentan suelos y coberturas vegetales que no son uniformes en todo su territorio. El índice CN se determina para cada complejo suelo-vegetación a partir de sus características particulares de vegetación y textura edáfica. Se supone que cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En cada uno de estos complejos, la precipitación generará diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo (Gaspari *et al.*, 2013). Por lo expuesto anteriormente, para asignar un solo valor de Número de Curva para toda la cuenca o subcuenca se debe obtener un valor de CN medio ponderado.

La estimación de los valores de CN se realiza a través de tablas, las cuales están en función del tipo y tratamiento de suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y condición de humedad antecedente, y, posteriormente, se corrigen los valores obtenidos en función de la pendiente del terreno.

Para el caso en estudio, se adopta la metodología empleada por Burgos *et al.*, (2018) y Burgos *et al.*, (2008) para estimar el CN de las cuencas aluviales pertenecientes al área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra.

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para la estimación del CN mediante SIG que será utilizado luego para la modelación hidrológica en el *software* HEC-HMS.

La metodología se enmarca en geoprocesos dentro de un SIG, se utiliza teledetección (para clasificar usos de suelo y coberturas vegetales), interpretación de mapas base geológicos y geomorfológicos y tablas de reclasificación de doble entrada para asignar valores de CN en función del uso del suelo y del GHS. Finalmente se ajusta el mapa de CN en función de la pendiente del terreno.

En la Fig. 28 se puede observar el flujograma y la metodología a seguir para la obtención del mapa de CN del área de estudio. Utilizando teledetección (imágenes Landsat actualizadas) se obtiene el índice NDVI para generar el mapa de cobertura vegetal del área. Por otro lado, con el mapa de suelos y geomorfológico, se realizan los cruzamientos espaciales junto a las reclasificaciones correspondientes para obtener el mapa de GHS. Para poder obtener el mapa de CN, nuevamente mediante algebra de mapas se cruzan los mapas de GHS y cobertura vegetal que, reclasificando, genera el mapa de CN. Finalmente, con el mapa de pendientes obtenido anteriormente mediante MDE, se corrige el mapa de CN en función de la pendiente del terreno generando el producto final. Luego, y con el objetivo de realizar los cálculos de escorrentía directa en el *software* HEC-HMS, se aplica una ponderación en el SIG para obtener un único valor de CN por cuenca o subcuenca si así se requiera.

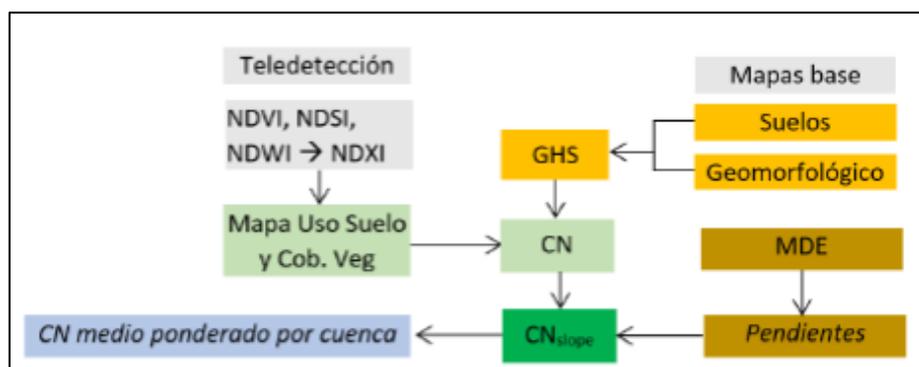


Figura 28. Flujograma cartográfico aplicando algebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN (Burgos *et al.*, 2018).

A continuación, se detallan los procedimientos:

- Modelo digital de elevaciones (MDE)

Uno de los primeros pasos consiste en la obtención del MDE del área de estudio para poder generar la delimitación de cuencas junto con la red hidrográfica.

Para este Trabajo Final, el MDE se obtuvo del IGN, con una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 a 3 m.

En la Fig. 30 se puede observar el resultado de la delimitación de cuencas del área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra. Los pasos para la obtención de la delimitación de las cuencas utilizando SIG se encuentran en el apartado 4.2.1.

- Mapa de pendientes

Una variable necesaria para realizar el ajuste del CN es la pendiente, obtenida a partir del MDE mediante el cálculo de la tasa máxima de cambio de la cota de una celda respecto a sus vecinas. Se realiza con la función *Slope* en ArcGis.

En la Fig. 36 se puede observar con la delimitación de cuencas y la red de drenaje.

- Perdidas de precipitación

Se lleva a cabo utilizando SIG y tablas de clasificación cruzada de doble entrada. El mapa de Grupo hidrológica del suelo (GHS) se realiza de acuerdo con la experiencia de quien lo aplique y en función de variables tales como tipo de suelo, geomorfología, etc.; para luego realizar una tabulación cruzada con el mapa de uso de suelo o cobertura vegetal y finalmente obtener de forma automática el valor de CN para cada celda (*pixel*) y su distribución espacial.

A cada una de las variables que intervienen en los mapas para la obtención del CN (cobertura vegetal, geomorfología, suelos, etc.) se le asigna un número primo. Así, si se multiplican los diferentes mapas dará un resultado diferente por cada combinación (Ferrer, 1995). Para obtenerlo en SIG de manera automática se asignan valores y reclasificaciones con los valores posibles y el mapa resultante de los cruzamientos espaciales se vuelve a clasificar asignando los correspondientes CN.

- Coberturas de suelo

El mapa de cobertura vegetal se realiza mediante el procesamiento de imágenes de satélite y aplicación de clasificación no supervisada. Las imágenes satelitales corresponden al satélite Landsat 8 con fecha 28 de enero de 2023 extraídas de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos o *earthexplorer* de la *United States Geological Survey* (USGS). Posteriormente se calcula el Índice de Vegetación (NDVI) con el objetivo de diferenciar la densidad de la vegetación como se comentaba anteriormente. El índice utiliza las bandas espectrales del visible (VIS rojo y verde), del infrarrojo cercano (IR) e infrarrojo medio (SWIR) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

En la Fig. 32 se puede observar el mapa de cobertura vegetal final del área de estudio utilizando la aplicación del Índice NDVI, que luego es utilizado para los cruzamientos espaciales en la estimación del CN.

Se asignan 5 clasificaciones de cobertura en base a los valores obtenidos de la aplicación del índice: agua, impermeable, baja cobertura (<30%), media cobertura (30 – 70 %) y buena cobertura (>70%) según la metodología aplicada por Burgos *et al.*, (2008).

Como menciona Burgos *et al.*, (2018) en su trabajo, la utilización de la composición de índices y no las bandas simples, optimiza la clasificación y facilita la obtención y posterior verificación analizando los histogramas de cada clase.

- Suelos, Geomorfología y Grupo Hidrológico de Suelos (GHS)

La metodología del SCS clasifica el potencial de escurrimiento en cuatro grupos en función del tipo de suelo y geomorfología como se observa en la Tabla 2.

En el área de estudio no existe cartografía del tipo hidrológico de suelo (mapa de GHS), por lo que para obtener el mapa correspondiente se procedió a interpretar, confeccionar y digitalizar los mapas correspondientes a Tipo de Suelo y Geomorfología (Fig.33 y Fig.34)

Luego de las interpretaciones se genera el mapa de GHS del área de estudio (Fig.35), obtenido en primer lugar en formato vectorial. Posteriormente se aplica una rasterización (convertir un formato vectorial a ráster) con la función *Polygone To Raster* en ArcGis para luego cruzarlo espacialmente con el mapa de cobertura vegetal utilizando la función *Raster Calculator* (Álgebra de mapas).

- Obtención del mapa de CN en condición II antecedente

Obtenidos el mapa de GHS y de Cobertura Vegetal y de acuerdo con el flujograma de la Fig. 28, para obtener el mapa de CN se cruzan espacialmente ambas variables.

Se procede a la asignación de valores de CN por medio de reclasificación en números primos y álgebra de mapas.

Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un número diferente. Así al multiplicar los mapas de GHS y Cobertura Vegetal se obtendrá un número diferente para cada una de las combinaciones posibles (Ferrer, 1995).

Posteriormente, se establece una correlación entre el producto de números primos obtenidos (Tabla 5) y el Número de Curva correspondiente (Tabla 4).

La tabulación cruzada se lleva a cabo respetando la siguiente tabla de doble entrada:

Tabla 4. Tabla de doble entrada para la asignación de CN_{II} Burgos et al., (2008).

Cobertura vegetal	GHS (SCS)			
	A	B	C	D
Agua	100	100	100	100
Impermeable	96	96	96	96
Baja <30%	48	67	77	83
Media 30-70%	35	56	70	77
Buena >70%	30	48	65	73

Por ejemplo, para la celda con valor 133 (Tabla 5) que es resultado del cruzamiento espacial de números primos con Cobertura Vegetal buena y GHS D, le corresponde una reclasificación a valor de 73 de CN (Tabla 4).

Tabla 5. Tabla de resultados del cruzamiento espacial de números primos.

Cobertura vegetal	Numero primo asignado	GHS (SCS)			
		A	B	C	D
		23	3	5	7
Agua	2	46	6	10	14
Impermeable	11	253	33	55	77
Baja <30%	13	299	39	65	91
Media 30-70%	17	391	51	85	119
Buena >70%	19	3030	57	95	133

- Ajuste por pendientes

El último paso consiste en corregir en función de la pendiente el mapa de CN obtenido anteriormente mediante la ecuación:

$$CN_{II}^{\alpha} = CN_{II} * \frac{322.79 + 15.63 (\alpha)}{\alpha + 323.52}$$

donde CN_{II} es el valor obtenido mediante el método del SCS, CN_{II}^{α} es el valor de número de curva ajustado mediante la pendiente y α es la pendiente ($m \cdot m^{-1}$).

Aplicada la ecuación en el SIG, se obtiene finalmente el mapa de CN en condición II del área de estudio (Fig.37).

4.5 Modelación Hidrológica

Desde principio de los años 60 se ha desarrollado una gran cantidad de modelos determinísticos de simulación hidrológica. Estos incluyen modelos de simulación de eventos que pueden modelar un evento único de lluvia - escorrentía y modelos de simulación continua, los cuales incluyen procedimientos para tener en cuenta contenido de humedad del suelo con el fin de simular la escorrentía causada por lluvias con intervalos de días u horas a lo largo de grandes periodos (Chow *et al.*, 1994).

4.5.1 Modelo HEC – HMS

El mejor ejemplo de modelo de simulación de eventos es el modelo de hidrogramas de crecientes HEC – HMS. Probablemente es el modelo de simulación de eventos más utilizado. Para este trabajo final se utilizó la versión 4.11.

El modelo está diseñado para simular la escorrentía superficial (o precipitación efectiva) que resulta de una precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema de componentes interconectados. Cada componente modela un aspecto del proceso lluvia – escorrentía dentro de una subcuenca o subárea. Cada componente se representa por un conjunto de parámetros que especifica las características particulares del componente y las relaciones matemáticas que describen sus procesos físicos. Los resultados finales del proceso de modelación son hidrogramas de caudal o escorrentía directa para varias subcuencas en lugares predeterminados o hidrogramas de salida de una cuenca general.

Para la estimación de la escorrentía o precipitación neta, se utilizó el método Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EE UU. El modelo HEC-HMS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) se fundamenta en la intersección de cuatro secciones:

- Modelo de cuenca: Esta sección se compuso del esquema de la red de drenaje de interés, además de las conexiones existentes entre las distintas subcuencas. A cada una de las subcuencas se les asignó el Área (km²), el método de infiltración (método de curva número de la SCS) y el método de generación y transformación de lluvia-hidrograma (*SCS Unit Hydrograph*). No se estimó flujo de base para el cálculo, dado a que el interés radica en volumen de escorrentía directa.
- Modelo meteorológico: Se selecciona el método necesario para estimar e interpolar la precipitación que cae sobre cada subcuenca a partir de los datos de las estaciones pluviométricas. Para este Trabajo Final se utilizan cuatro modelos meteorológicos utilizando el método de precipitación *Gage Weights* y datos de la Estación Rincón de los Sauces. Cada modelo meteorológico tiene una posición distinta de la otra en la cuenca. Se ubica en la cuenca un modelo donde el núcleo de su tormenta se encuentra en el sector Noroeste, otro modelo donde el núcleo de su tormenta se encuentra en el sector Suroeste y lo mismo para los sectores Noreste y Sureste (Fig. 39). Las tormentas tienen 20 km de diámetro, son de forma circular y se calcula que porcentaje de lluvia recibe cada subcuenca para cada posición diferente. La metodología se basa en trabajar con distintas ubicaciones de las tormentas para luego obtener distintos resultados de caudales en función de la ubicación de los distintos núcleos. Se podrán obtener distintos hidrogramas de crecida en función de la posición del núcleo de la tormenta y además se podrá interpretar que sector de la cuenca provoca la situación más desfavorable (Burgos

y Salcedo, 2016). Las tormentas convectivas son un fenómeno meteorológico que se caracteriza por ser local, de alta intensidad, corta duración y núcleos pequeños. Para poder caracterizarlos es necesario conocer la precipitación total en el núcleo, además de la distribución espacial y temporal (Bonilla *et al.*, 2018). Debido a la incertidumbre en las formas de los núcleos de tormenta, se adopta trabajar con tormentas convectivas de forma circular y de 20 km de diámetro según lo establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia del Neuquén.

- Control de especificaciones: En esta sección se debió generar el control de la simulación. Se introdujeron las propiedades temporales de la simulación tales como fecha y hora de inicio y fin de la simulación. En este caso se utilizó una simulación de 30 horas y se optó por un intervalo de tiempo para el cálculo de 10 minutos.
- Datos de series temporales: En este último apartado se crearon y se especificaron las series temporales de lluvia correspondientes a los datos obtenidos de la estación pluviométrica.

Es importante considerar que el agua que fluye en un cauce está asociada a procesos irreversibles cuantificados como pérdidas de energía, por lo que se establecieron parámetros de ruteo para el cálculo de los efectos de transmisión y laminación de hidrogramas de acuerdo con el Método de Muskingum. Se consideraron dos parámetros:

- X: Factor adimensional de ponderación del volumen de acumulación en el tramo. Tiene valores entre 0 y 0,5. En este caso, se tomó un valor de $X = 0,4$.
- K (h): Es el tiempo que necesita la onda de avenida para recorrer el tramo seleccionado. Depende de la longitud del tramo (km), de la inclinación del tramo (%) y del parámetro X.

En la Fig. 29 se pueden observar los parámetros definidos para cada uno de los *Reachs*.

Reach	Initial Type	Initial Discharge (M3/S)	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
8	Discharge = Inflow		1.56	0.4	8
18	Discharge = Inflow		0.13	0.4	6
26	Discharge = Inflow		0.69	0.4	3
25	Discharge = Inflow		0.25	0.4	1
7	Discharge = Inflow		1.93	0.4	9
6	Discharge = Inflow		0.23	0.4	1
5	Discharge = Inflow		0.61	0.4	3
32	Discharge = Inflow		0.39	0.4	2
27	Discharge = Inflow		0.16	0.4	1
28	Discharge = Inflow		0.60	0.4	3
13	Discharge = Inflow		0.06	0.4	3
29	Discharge = Inflow		0.38	0.4	2
14	Discharge = Inflow		0.07	0.4	4
3	Discharge = Inflow		0.99	0.4	5
4	Discharge = Inflow		0.19	0.4	1
31	Discharge = Inflow		0.18	0.4	1
15	Discharge = Inflow		0.09	0.4	4
23	Discharge = Inflow		0.56	0.4	3
16	Discharge = Inflow		0.04	0.4	2
19	Discharge = Inflow		0.66	0.4	3

Figura 29. Parámetros de ruteo según Muskingum para cada uno de los tramos (*Reachs*).

4.6 Análisis de Sensibilidad

Por definición conceptual un análisis de sensibilidad es una estimación de la medida en que la modificación de una variable afecta a un resultado. En este caso, una estimación de la medida en como la modificación del CN afecta a los caudales resultantes.

El análisis de sensibilidad de los modelos matemáticos consiste en investigar la relación entre los datos de entrada y de salida del modelo y los resultados. La información derivada de los análisis puede utilizarse de varias maneras. En primer lugar, el análisis de sensibilidad de un modelo puede considerarse parte esencial de su desarrollo y evaluación ya que ofrece a la persona que realiza el modelo la oportunidad de identificar deficiencias en la estructura del mismo y problemas en su funcionamiento. En segundo lugar, la información puede usarse para simplificar y perfeccionar el modelo. Por ejemplo, si se demuestra que un parámetro tiene poco efecto en el resultado del modelo o que no influye mucho en los resultados, el mismo puede simplificarse o ser eliminado directamente. En tercer lugar, puede ayudar a identificar los parámetros que requieren una mayor precisión en su determinación y que requieren más (o menos) atención a la hora de parametrizar. En cuarto lugar, la información de sensibilidad es útil para interpretar y mejorar la credibilidad de los resultados de la modelización (Dubus *et al.*, 2003).

4.6.1 Enfoque del análisis de sensibilidad

La sensibilidad de los modelos puede evaluarse mediante una serie de técnicas más o menos complejas y sofisticadas.

Para este Trabajo Final, se adopta la forma denominada uno a uno (*one-at-a-time*) como menciona Dubus *et al.*, (2003) en su trabajo, o también definida como *ceteris paribus*. La metodología consiste en ir variando los parámetros de entrada, uno a la vez, manteniendo el resto constante e ir observando la influencia resultante en el modelo.

Esto se traslada al modelo HEC – HMS de la siguiente forma:

Se toma como “Caso Base” a los caudales resultantes que se obtuvieron utilizando los valores de Curva Numero obtenidos en un primer momento, junto con los valores de abstracciones iniciales y tiempos de retardo que dependen del parámetro anterior. Debido a que se obtuvo un mapa de CN general del área de estudio y las cuencas o subcuencas son varias, se procedió a realizar un promedio de CN para cada subcuenca para poder utilizar los valores asignados en la modelación hidrológica (HEC-HMS). La ponderación del CN se realiza aplicando una estadística zonal para cada subcuenca con la función *Zonal Statistics as Table* en ArcGis, utilizando el *shape* de las cuencas y el *ráster* del mapa de CN. Una vez obtenido el Caso Base, posteriormente se procede a realizar las distintas variaciones en el Curva Numero original (y en consecuencia las abstracciones iniciales y tiempos de retardo) para luego realizar las múltiples corridas en el HEC – HMS e ir observando como varían los caudales en función de estas variaciones. Los demás parámetros como especifica la metodología y que se mantienen constantes son: datos pertenecientes al modelo de cuenca, datos del modelo meteorológico, datos del control de especificaciones y datos de serie temporales. Como menciona Dubus *et al.*, (2003) en su trabajo, esta forma de análisis de sensibilidad se elige porque es fácil de entender, fácil de aplicar y porque proporciona una evaluación directa de la sensibilidad.

4.6.1.1 Evaluación de la sensibilidad del modelo

La evaluación de la sensibilidad del modelo se basa en la **relación** que hay entre la variación relativa del resultado del modelo (*Output variation*) y la variación relativa de los datos de entrada del modelo (*Input variation*). Para cada incremento de variación, la variación relativa en la entrada y la salida del modelo se calcula de la siguiente forma:

$$Input\ variation = \frac{I - IBC}{IBC} * 100 \quad (1)$$

$$Output\ variation = \frac{O - OBC}{OBC} * 100 \quad (2)$$

donde I es el valor del parámetro de entrada, I_{BC} es el valor del parámetro de entrada del caso base, O es el valor de la variable de salida y O_{BC} es el valor de la variable de salida para el caso base.

La relación de variación (ROV) puede definirse del siguiente modo:

$$ROV = \frac{Output\ variation}{Input\ variation} \quad (3)$$

o reemplazando se obtiene,

$$ROV = \frac{O - OBC}{I - IBC} * \frac{IBC}{OBC} \quad (4)$$

Para este Trabajo Final, las variables quedarían definidas de la siguiente forma:

- *I*: Los valores corresponderían a las distintas variaciones de los CN que se apliquen como datos de entrada del modelo.
- *IBC*: El valor es único y corresponde al parámetro de entrada del Caso Base, es decir al CN original del modelo, del cual se extraen las distintas variaciones.
- *O*: Corresponde al valor de la variable de salida, es decir, al caudal resultante en función de la variación del CN. Se obtienen distintos caudales de salida a medida que van cambiando los Numero de Curva.
- *OBC*: El valor es único y corresponde al valor del caudal o caudales de salida, después de correr el modelo con el CN original.

La relación de variación puede ser positiva o negativa. Toma valores negativos si una disminución de un parámetro de entrada provoca un aumento del valor de salida o si un aumento de un parámetro de entrada provoca una disminución del valor de salida. El signo de la relación de variación no es crítico cuando el objetivo es clasificar los parámetros de entrada según la influencia en la salida del modelo. Por lo tanto, se considera el valor absoluto a efectos de clasificación (Dubus *et al.*, 2003).

Tasa de cambio

Otra forma de analizar como influyen las variaciones en los resultados del modelo es mediante tasa de cambio.

Una tasa de cambio es la magnitud del cambio de la variable con respecto a otra cuando están relacionadas. El aumento o disminución de ambas variables es simultánea y el cociente corresponde a la razón de cambio.

Cuando se analizan tasas de cambio con respecto al caso base, ayuda a interpretar en base a los resultados donde están los cambios más “fuertes” o donde se sufren las mayores variaciones al modificar una variable.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Delimitación y caracterización de cuencas

A través del geoprocesamiento llevado a cabo con el software ArcGIS se realizó la delimitación de cuencas y la definición de la red de drenaje del área de estudio. Como resultado se obtuvieron 18 cuencas y una red de drenaje con patrón dendrítico compuesta por cauces efímeros (Fig.30)

Dentro de las 18 cuencas obtenidas y en función de lo expuesto en el apartado 3.7, se toma la cuenca número 17 para el estudio de la modelación hidrológica y se la analiza de forma separada. La misma es definida como “Cuenca Mayor” ya que es la cuenca que mayor área abarca en los yacimientos de interés. Además, en este sector, se encuentra el mayor impacto de movimiento de suelo debido a la concentración de instalaciones varias como locaciones, plantas industriales, pistas de ductos, etc., sumado a las demás características mencionadas anteriormente en el apartado 3.5.

La delimitación de las subcuencas dentro de la Cuenca Mayor (Fig.31) se realizó en base a características geomorfológicas como tipo de suelo y relieve y, tratando de obtener subcuencas con áreas que no superen las 6 horas de tiempo de concentración, que sería una lluvia máxima para una zona árida como en este estudio.

En general se asume en base a elementos geomorfológicos que, las cuencas presentan comportamientos hidrológicos muy diferentes hacia su cabecera, sector medio y distal; particularmente en las cuencas que presentan mesetas basálticas en su interior. En los sectores de alturas topográficas mayores, predomina un relieve relativamente plano producto de las coladas y mesetas basálticas que se encuentran en el área, sumado a pequeños afloramientos del Grupo Neuquén con pendientes normales a subnormales. En las partes medias de las cuencas predominan mantos de roca mayormente erosionados, con desarrollo de cárcavas y con pendientes elevadas debido a la presencia de zonas de escarpa y talud. Conforme disminuye la altura topográfica hacia los sectores más bajos o distales, conocidos como zonas de bajada o pedimento, el relieve disminuye considerablemente y predominan los suelos franco – arenosos alternándose con asomos de roca. Para dicho sector, con respecto a los cauces, estos aumentan de sección y presentan mayor sedimentación proveniente del material erosionado.

Se obtuvo un total de dieciséis subcuencas de formas alargadas según índices de Gravelius y con distintos valores de áreas y pendientes.

Se pudo establecer una relación entre los tiempos de concentración obtenidos y los parámetros de área, pendiente y longitud de cauce principal para cada cuenca y subcuenca. Los menores tiempos de concentración corresponden a cuencas y subcuencas de menor área, menor longitud de cauce principal y mayor pendiente de cuenca; mientras que las subcuencas que mostraron los mayores tiempos de concentración exhibieron mayor área, mayor longitud de cauce principal y menor pendiente.

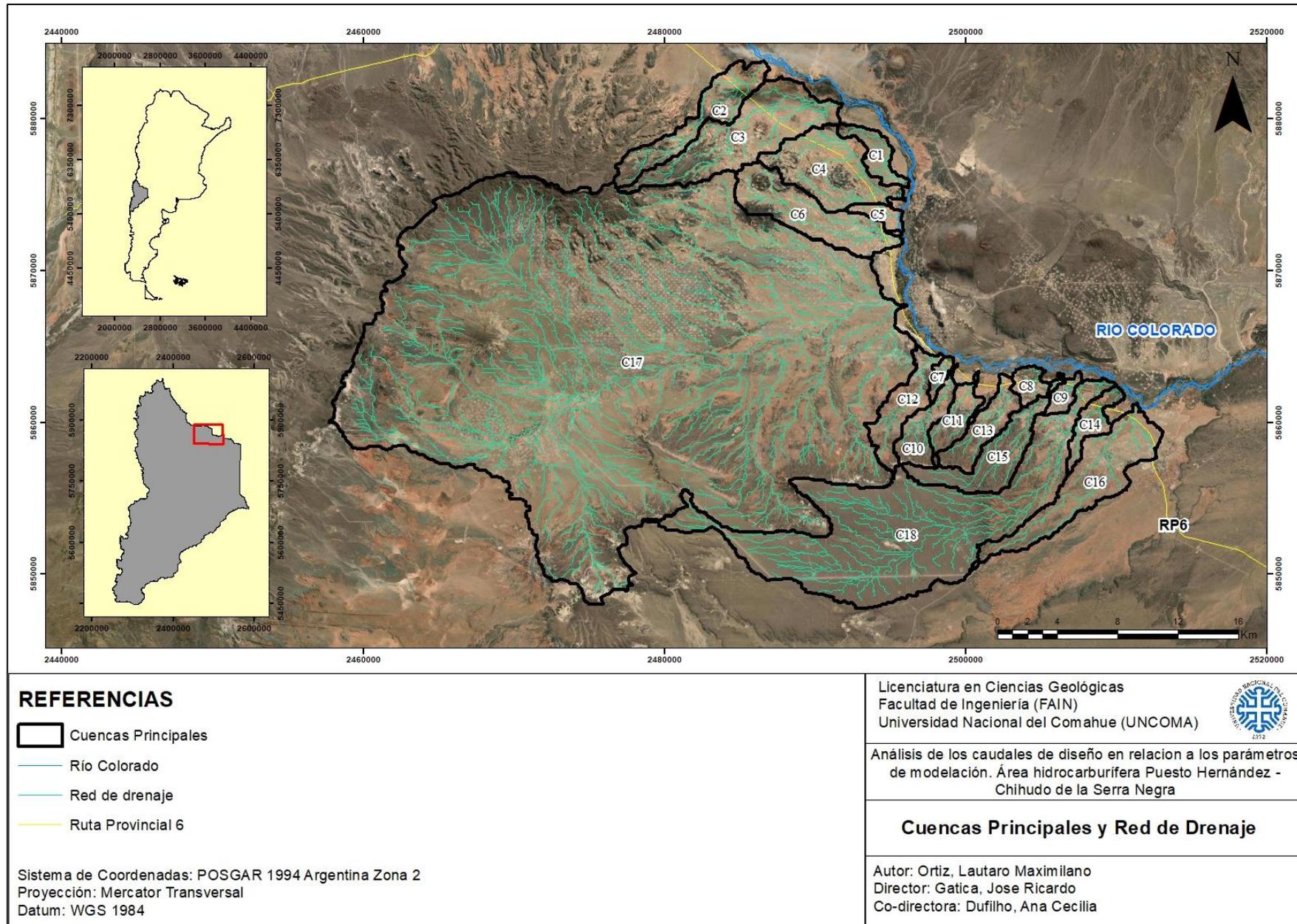


Figura 30. Delimitación de cuencas y red de drenaje del área de estudio.

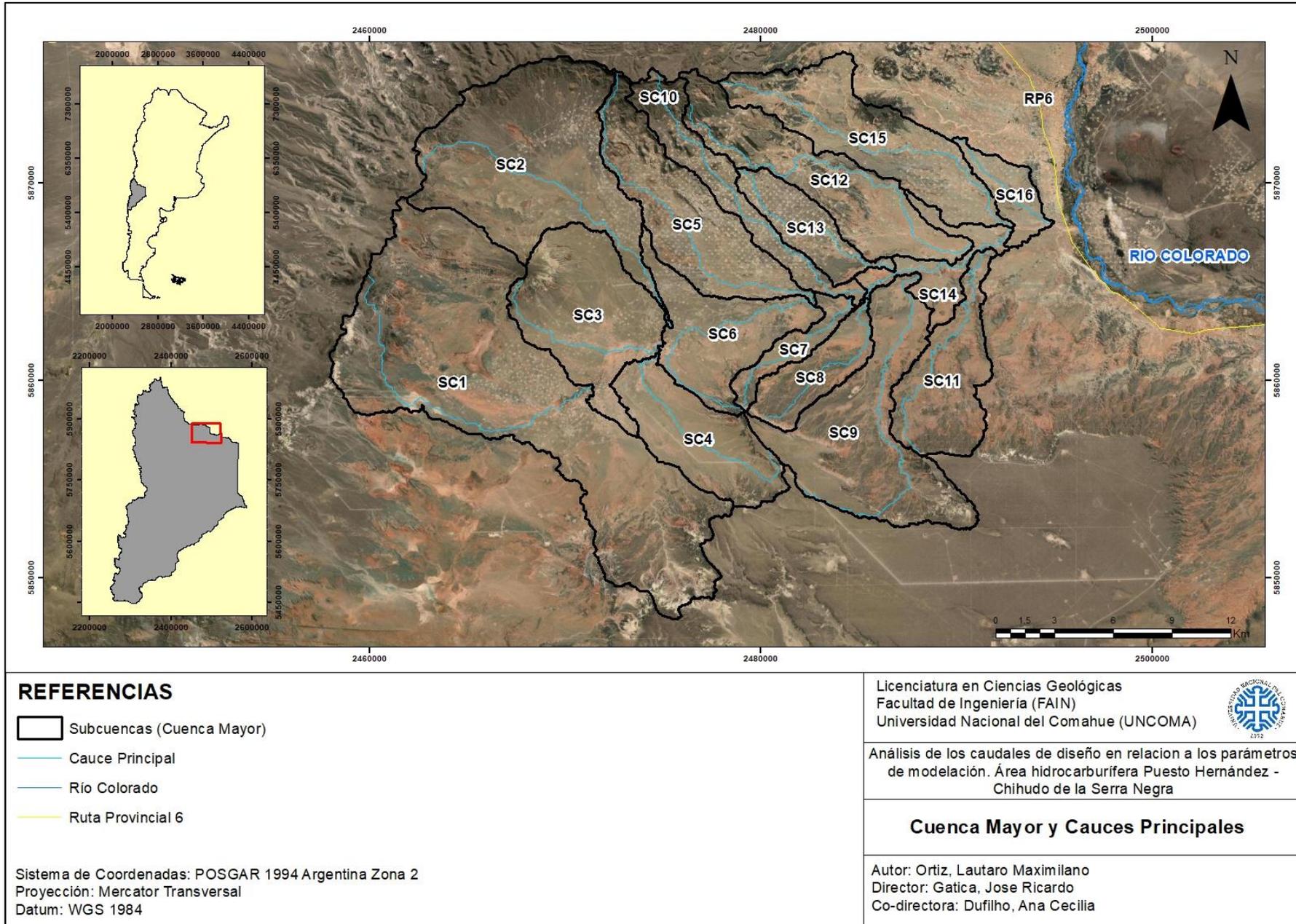


Figura 31. Delimitación de subcuencas (Cuenca Mayor) y sus cauces principales. Notar la cercanía de la salida de la cuenca a la Ruta Provincial 6 y al valle del Río Colorado.

5.1.1 Cuencas Principales – Yac. PH y Chih. de la Sierra Negra.

5.1.1.1 Parámetros morfométricos y de relieve

Como se mencionó en el apartado 4.2.2 las características físicas de forma, de relieve y relativas a la red de drenaje son muy importantes: influyen en el tiempo de concentración y los caudales resultantes. A continuación, en las Tablas 6 y 7 se presentan los resultados de dichos parámetros.

Tabla 6. Parámetros morfométricos y de relieve principales de las cuencas del área de estudio.

Cuenca	Área (km ²)	Área (ha)	Perímetro (km)	Pendiente media (%)	Longitud (km)	Índice de Gravelius (Kc)	Forma	Factor de forma (Kf)
C1	7.41	741.38	17.48	2.37	6.15	1.81	Alargada	0.20
C2	20.97	2096.61	32.87	13.92	12.75	2.02	Alargada	0.13
C3	40.20	4020.16	40.86	9.45	15.93	1.82	Alargada	0.16
C4	29.24	2923.74	30.23	9.25	10.09	1.58	Alargada	0.29
C5	3.80	379.70	11.04	2.94	3.74	1.60	Alargada	0.27
C6	28.19	2818.78	30.63	7.97	11.66	1.63	Alargada	0.21
C7	2.46	245.77	8.78	10.33	3.43	1.58	Alargada	0.21
C8	4.51	450.66	10.40	6.77	2.52	1.38	Ovalada	0.71
C9	3.50	350.28	10.36	3.53	3.7	1.56	Alargada	0.26
C10	10.61	1060.59	20.57	12.23	7.59	1.78	Alargada	0.18
C11	8.45	845.10	18.18	12.71	7.01	1.76	Alargada	0.17
C12	14.69	1468.77	25.97	11.23	8.05	1.91	Alargada	0.23
C13	12.55	1255.46	21.01	10.86	6.71	1.67	Alargada	0.28
C14	7.44	743.97	18.23	3.49	6.75	1.89	Alargada	0.16
C15	20.39	2039.46	35.46	8.71	11.81	2.21	Alargada	0.15
C16	33.29	3328.52	41.84	5.48	12.98	2.05	Alargada	0.20
C17	701.43	70143.15	148.10	8.22	39.07	1.58	Alargada	0.46
C18	130.90	13089.92	100.56	2.99	26.03	2.48	Alargada	0.19

El área de las cuencas es un parámetro importante ya que ofrece una idea de la magnitud de los caudales producidos. Cuanto más grande sea el área, mayor serán los caudales generados. La mayor cuenca (C17) presenta un área de 701,43 km² mientras que, la menor cuenca delimitada (C7) es de 2,46 km². Esto refleja la gran variabilidad de este parámetro en el área de estudio.

En cuanto a las formas de las cuencas, todas fueron clasificadas como alargadas según valores del Índice de Gravelius, excepto la cuenca 8 (C8) clasificada como ovalada. Esta cuenca presentará menores tiempos de concentración y picos de crecidas más altos en comparación al resto de las cuencas.

La pendiente también influye en la velocidad de escorrentía y, en consecuencia, en el poder de arrastre y erosivo de la misma. En general, las cuencas presentan pendientes medias bajas, con un promedio del 8%. La cuenca 1 (C1) presenta una pendiente media del 3% y la cuenca 2 (C2) de 13%. Por lo tanto, C2 al tener mayor pendiente tendrá mayor velocidad de escorrentía y menor tiempo de concentración que C1.

5.1.1.2 Parámetros relativos a la red de drenaje

El tiempo de concentración se calculó realizando un promedio de las ecuaciones de Témez, SCS y Kirpich. La ecuación de Kirpich no se utilizó debido a que no se cumple la condición de que los cauces presenten pendientes entre el 3 y 10%. Además, fue desarrollado para cuencas urbanas menores a 45 hectáreas.

Tabla 7. Parámetros relativos a la red de drenaje más importantes para cada cuenca del área de estudio.
N/A: No aplica. Tc (hs) SCS utiliza valor de CN del caso base.

Cuenca	Longitud cauce principal (km)	Pendiente media cauce principal (%)	Tc (hs) Kirpich	Tc (hs) SCS	Tc (hs) Témez	Tc (hs) Promedio
C1	8.42	1.09	NA	10.02	3.57	6.80
C2	14.41	13.44	NA	3.16	3.34	3.25
C3	19.31	4.75	NA	5.50	5.08	5.29
C4	12.90	2.02	NA	4.50	4.40	4.45
C5	4.65	2.05	NA	3.60	2.02	2.81
C6	13.50	2.65	NA	4.92	4.32	4.62
C7	3.09	4.42	NA	1.22	1.28	1.25
C8	4.99	7.43	NA	2.97	1.67	2.32
C9	3.47	1.55	NA	3.24	1.70	2.47
C10	9.18	5.77	NA	2.50	2.78	2.64
C11	7.36	5.30	NA	2.24	2.39	2.31
C12	10.88	6.14	NA	2.94	3.13	3.03
C13	8.55	5.23	NA	2.61	2.68	2.65
C14	7.47	2.36	NA	6.27	2.82	4.54
C15	16.01	3.86	NA	4.66	4.58	4.62
C16	18.32	3.00	NA	8.65	5.33	6.99
C17	49.97	3.02	NA	NA	11.40	11.40
C18	44.35	2.22	NA	NA	11.04	11.04

En cuanto a las características de la red hidrográfica, las cuencas presentan cauces con longitudes muy variables, con un promedio de 14 km. Una longitud mayor supone mayores tiempos de desplazamiento de las crecidas y en consecuencia mayor atenuación, aumentando los tiempos de concentración. Esto se puede observar en la cuenca 7 (C7) que es la que tiene la menor longitud del cauce principal, con un valor de 3,09 km y con un tiempo de concentración promedio de 1.25 hs. En contraparte, la cuenca 17 (C1) o Cuenca Mayor, presenta una longitud de cauce principal de 49,97 km y un tiempo de concentración promedio de 11.40 hs.

La pendiente de los cauces también influye en los tiempos de concentración y en los caudales resultantes. Es decir, si dos cuencas tienen la misma longitud de cauce, pero una tiene mayor pendiente media que la otra, la cuenca que tenga mayor pendiente va a presentar un menor tiempo de concentración. Por ejemplo, la cuenca 5 (C5) y la cuenca 8 (C8) tienen longitudes de cauces similares, entre 4,5 a 5 km. C5 tiene una pendiente del 2% y C8 del 7,5 %. Como resultado, C8 tiene menor tiempo de concentración por tener mayor pendiente a pesar de tener la misma longitud.

Para C17 y C18 no se calculó el tiempo de concentración del SCS ya que no cumplen la condición de poseer un área menor a 5000 hectáreas.

5.1.2 Cuenca Mayor (Subcuencas) – Yac. PH y Chih. de la Sierra Negra

5.1.2.1 Parámetros morfométricos y de relieve

De la misma manera que para las Cuencas Principales, se presentan a continuación en las Tablas 8 y 9 los resultados de las características físicas de forma, relieve y red de drenaje de las subcuencas de la Cuenca Mayor.

Tabla 8. Parámetros morfométricos y de relieve principales de las subcuencas de la Cuenca Mayor.

Cuenca Mayor	Área (km ²)	Área (ha)	Perímetro (km)	Pendiente media (%)	Longitud (km)	Índice de Gravelius (Kc)	Forma	Factor de forma
SC1	150.08	15007.52	101.04	10.03	12.77	2.33	Alargada	0.92
SC2	80.17	8016.95	67.01	10.37	15.49	2.11	Alargada	0.33
SC3	46.69	4668.95	45.94	8.47	8.05	1.90	Alargada	0.72
SC4	33.21	3321.26	37.13	7.55	9.89	1.82	Alargada	0.34
SC5	43.80	4380.30	51.14	9.61	15.72	2.18	Alargada	0.18
SC6	33.12	3311.83	47.66	5.75	8.34	2.34	Alargada	0.48
SC7	9.52	952.11	28.41	8.88	8.08	2.60	Alargada	0.15
SC8	17.14	1714.26	28.12	9.99	8.12	1.92	Alargada	0.26
SC9	59.46	5946.46	65.06	8.11	12.76	2.38	Alargada	0.37
SC10	23.34	2333.93	55.19	11.58	15.94	3.22	Alargada	0.09
SC11	30.64	3063.72	40.32	7.81	11.02	2.05	Alargada	0.25
SC12	43.93	4392.79	55.33	11.66	17.25	2.35	Alargada	0.15
SC13	16.92	1692.22	30.98	4.01	9.67	2.12	Alargada	0.18
SC14	14.69	1468.54	51.85	5.12	8.23	3.82	Alargada	0.22
SC15	45.85	4585.19	54.57	7.45	16.85	2.27	Alargada	0.16
SC16	10.40	1040.02	24.78	3.61	6.5	2.17	Alargada	0.25

Las subcuencas de la Cuenca Mayor presentan un promedio de área de 41,19 km². El mayor valor lo presenta la SC1 (150.08 km²), mientras que, el menor valor lo presenta la SC7 (9,52 km²).

En cuanto a las formas de las subcuencas, todas presentan forma alargada según los valores del Índice de Gravelius. Cuando los valores se acercan a 3 se clasifican como alargadas. En este caso, SC10 y SC14 superan este valor, clasificándose como muy alargadas.

En promedio las pendientes son del 8%, las subcuencas que presentan los mayores valores están asociadas a las escarpas de las antiguas planicies disectadas, o con ciertos rasgos geomorfológicos característicos como la subcuenca 3 que contiene un cono volcánico en su interior. En contraparte, la subcuenca 16 presenta pendiente baja del orden del 3%, desarrollándose en relieves planos y situándose en sectores distales de la Cuenca Mayor.

Las longitudes de las subcuencas presentan un promedio de 11,54 km. La mayor longitud (SC12) es de 17,25 km y la de menor (SC16) es de 6,5 km.

5.1.2.2 Parámetros relativos a la red de drenaje

Tabla 9. Parámetros relativos a la red de drenaje más importantes para cada subcuenca de la Cuenca Mayor.
N/A: No aplica. Tc (hs) SCS utiliza valor de CN del caso base.

Cuenca Mayor	Longitud cauce principal (km)	Pendiente media cauce principal (%)	Tc (hs) Kirpich	Tc (hs) SCS	Tc (hs) Temez	Tc (hs) Promedio
SC1	21.14	4.91	NA	NA	5.41	5.41
SC2	20.43	4.23	NA	NA	5.42	5.42
SC3	12.12	4.34	NA	4.62	3.63	4.12
SC4	14.38	3.59	NA	5.31	4.28	4.80
SC5	21.50	5.12	NA	5.80	5.43	5.61
SC6	16.97	5.35	NA	7.34	4.50	5.92
SC7	9.96	6.42	NA	3.65	2.90	3.27
SC8	10.96	5.75	NA	3.13	3.18	3.15
SC9	22.57	3.5	NA	NA	6.06	6.06
SC10	19.77	5.49	NA	4.52	5.03	4.77
SC11	16.72	4.26	NA	5.26	4.65	4.95
SC12	23.11	5.79	NA	5.74	5.61	5.67
SC13	12.16	4.03	NA	5.36	3.69	4.53
SC14	11.22	4.22	NA	5.29	3.44	4.36
SC15	20.91	5.36	NA	6.82	5.27	6.05
SC16	7.70	2.11	NA	4.79	2.95	3.87

En cuanto a las características de la red hidrográfica, las subcuencas presentan un promedio de longitud de cauce de 16,35 km. La mayor longitud de cauce la presenta la subcuenca 12 (23,11 km) debido a que su cauce principal nace en los sectores más altos de la Sierra de los Chihuidos, pasando por zonas de escarpas de antiguas planicies hasta llegar finalmente a su punto de salida en zonas distales de la cuenca (Fig. 31).

En promedio las pendientes son del orden del 4%, siendo la subcuenca 16 la menor con un valor del 2% debido a que se encuentra en zonas distales de la Cuenca Mayor y aledaña al valle del Río Colorado. En contraparte, la subcuenca 7 presenta un valor del orden del 6% ya que su cauce forma parte del talud de una antigua planicie aluvial.

De la misma manera que en las Cuencas Principales, el tiempo de concentración se calculó utilizando las ecuaciones de Temez y del SCS. La ecuación de Kirpich no se utiliza debido a que no se cumplen algunas de las dos condiciones (pendientes entre el 3 y 10% o cuencas menores a 45 ha). En general, las subcuencas presentan cierta variación con respecto a los tiempos de concentración.

5.2 Estimación de la distribución espacial del CN con técnicas SIG

A partir de la metodología explicada anteriormente en el apartado 4.4.2.1 y el flujograma expresado en la Fig. 28, se presentan en este capítulo los mapas generados y que son parte de la información base para la elaboración del mapa de CN final del área de estudio.

Como se puede observar en la Fig.37, el mapa de CN abarca las cuencas aluviales pertenecientes al área hidrocarburífera Puesto Hernández- Chihuido de la Sierra Negra.

Generalmente las cuencas o subcuencas presentan suelos y coberturas vegetales que no son uniformes en todo su territorio. Debido a que en cada una de ellas se presentan distintos valores de CN, la precipitación que caiga generará distintos valores de Tiempos de Concentración y Caudales de Diseño.

Por lo expuesto anteriormente y a los efectos de utilizar estas variables en la modelación hidrológica, se debe realizar una ponderación para cada una de las cuencas y subcuencas del área de estudio para obtener un único valor de CN. Esto se realiza con la función *Zonal Statistics As Table* en ArcGis.

A continuación, en la Tabla 10 se presentan los valores medios ponderados de CN y las abstracciones iniciales para cada una de las cuencas aluviales del área de estudio (Cuencas Principales)

Posteriormente, en la Tabla 11 se presentan los valores medios ponderados de CN para las subcuencas de la Cuenca Mayor.

Tabla 10. Valores medios ponderados de CN y abstracciones iniciales para cada una de las cuencas del área de estudio.

Cuenca	CN (II) ponderado	Abstracción Inicial
C1	53	44.46
C2	79	13.22
C3	75	16.79
C4	71	20.59
C5	70	21.33
C6	72	19.82
C7	75	16.87
C8	64	28.47
C9	62	31.21
C10	77	14.83
C11	74	17.44
C12	78	14.41
C13	76	16.08
C14	60	33.22
C15	77	15.07
C16	67	24.99
C17	76	16.40
C18	84	10.03

Tabla 11. Valores medios ponderados de CN y abstracciones iniciales para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor.

Cuenca Mayor	CN (II) ponderado	Abstracción Inicial
SC1	76	16.04
SC2	76	16.04
SC3	70	21.77
SC4	72	19.76
SC5	76	16.04
SC6	70	21.77
SC7	72	19.76
SC8	78	14.33
SC9	80	12.70
SC10	79	13.50
SC11	76	16.04
SC12	75	16.93
SC13	78	14.33
SC14	72	19.76
SC15	74	17.85
SC16	71	20.75

Estos valores de Curva Numero (Tabla 10 y 11) se toman como valores de “Caso Base” a los efectos del análisis de sensibilidad que se presenta en el apartado 5.4.

En general se puede observar en los mapas de CN (Fig.37 y Fig.38) que los valores más elevados de este parámetro se encuentran en:

- Zonas de mesetas basálticas (sector SE y NW del área de estudio)
- Zonas de pendientes medias a elevadas (escarpa, talud o conos monogénicos)
- Zonas de afloramientos del Grupo Neuquén (litologías de grano fino)
- Zonas de actividad petrolera (locaciones, caminos, instalaciones, etc)

Los valores de CN medios – bajos se encuentran en:

- Zonas de pedimento y bajada (pendientes bajas)
- Zonas con desarrollo de suelos (suelos franco - arenosos)
- Zonas con GHS A o B.
- Zonas con geoformas eólicas.

A continuación, se presentan los mapas base generados para la elaboración del mapa de CN final del área de estudio, siguiendo la metodología explicada en el apartado 4.4.2.1 y en el flujograma de la Fig. 28.

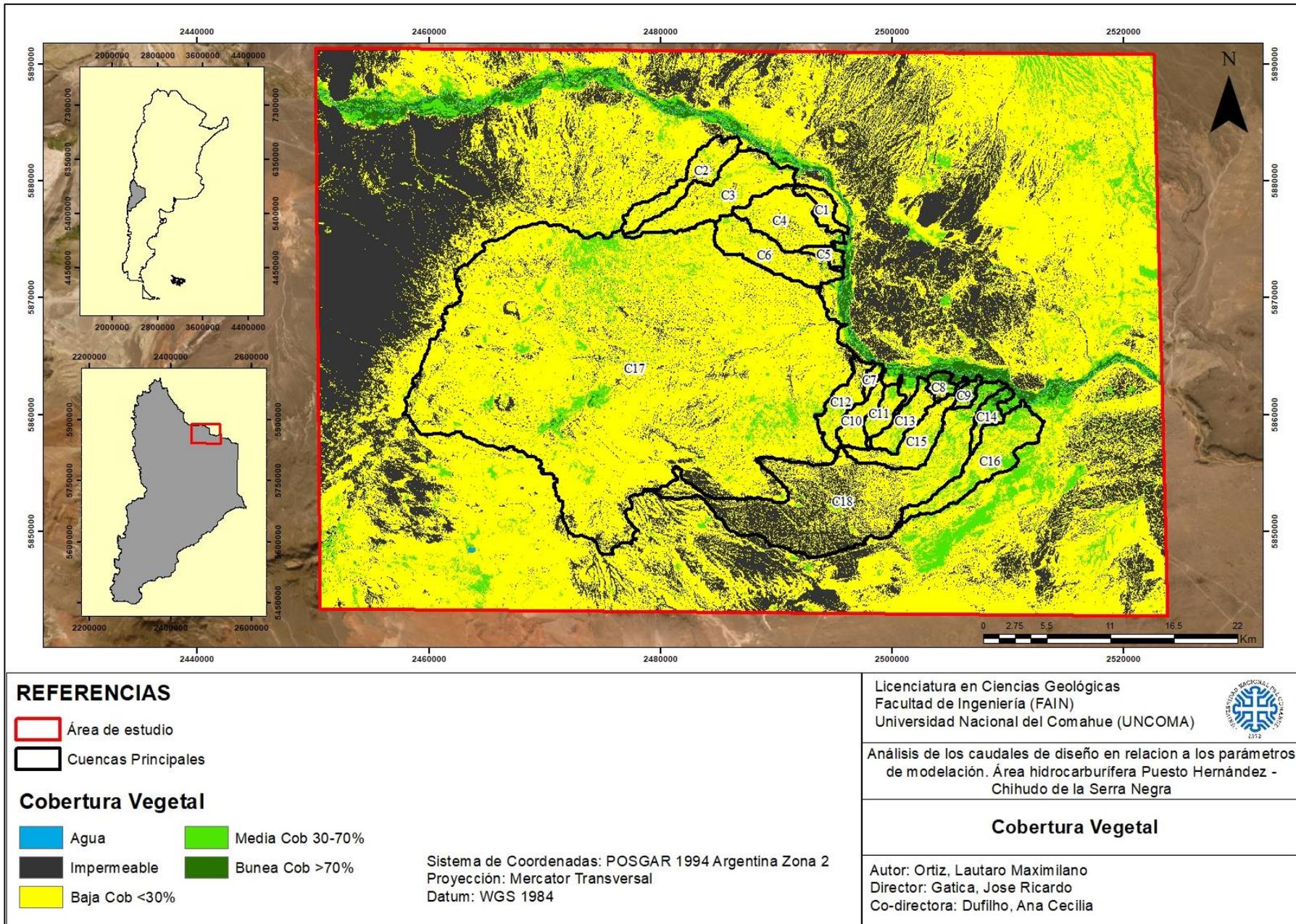


Figura 32. Mapa de Cobertura Vegetal del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

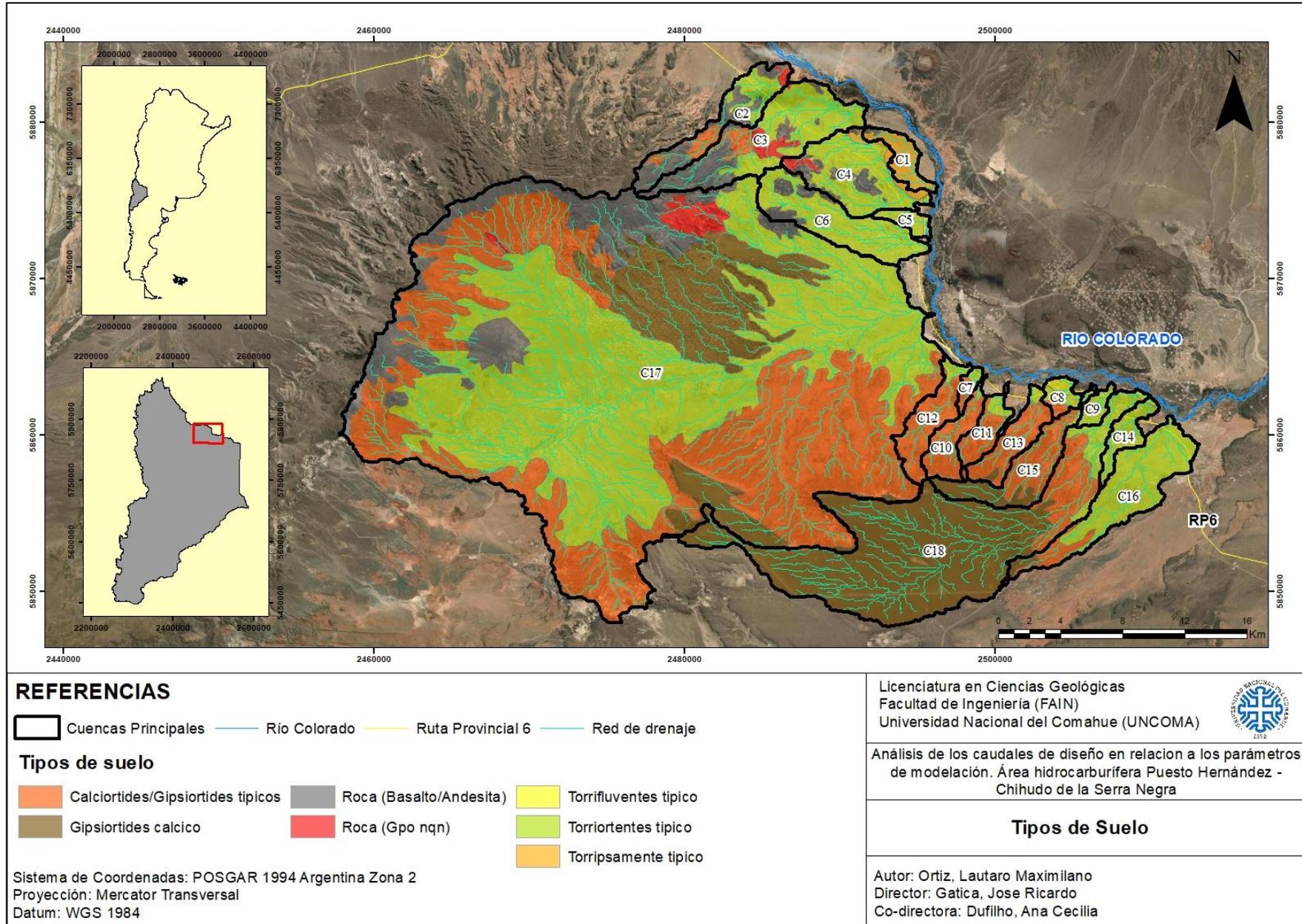


Figura 33. Mapa de Tipos de Suelo del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihudo de la Sierra Negra (elaboración propia).

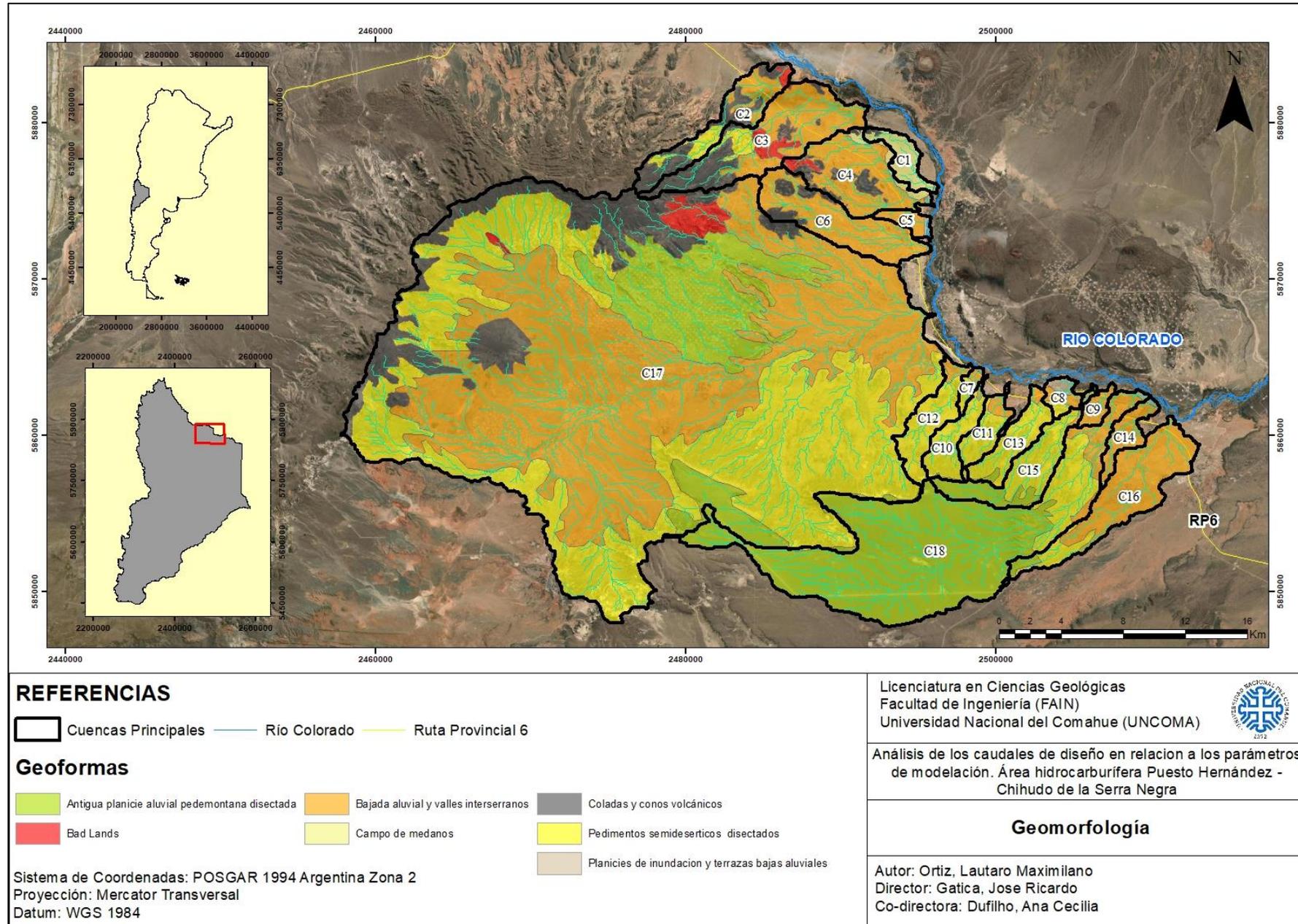


Figura 34. Mapa Geomorfológico del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

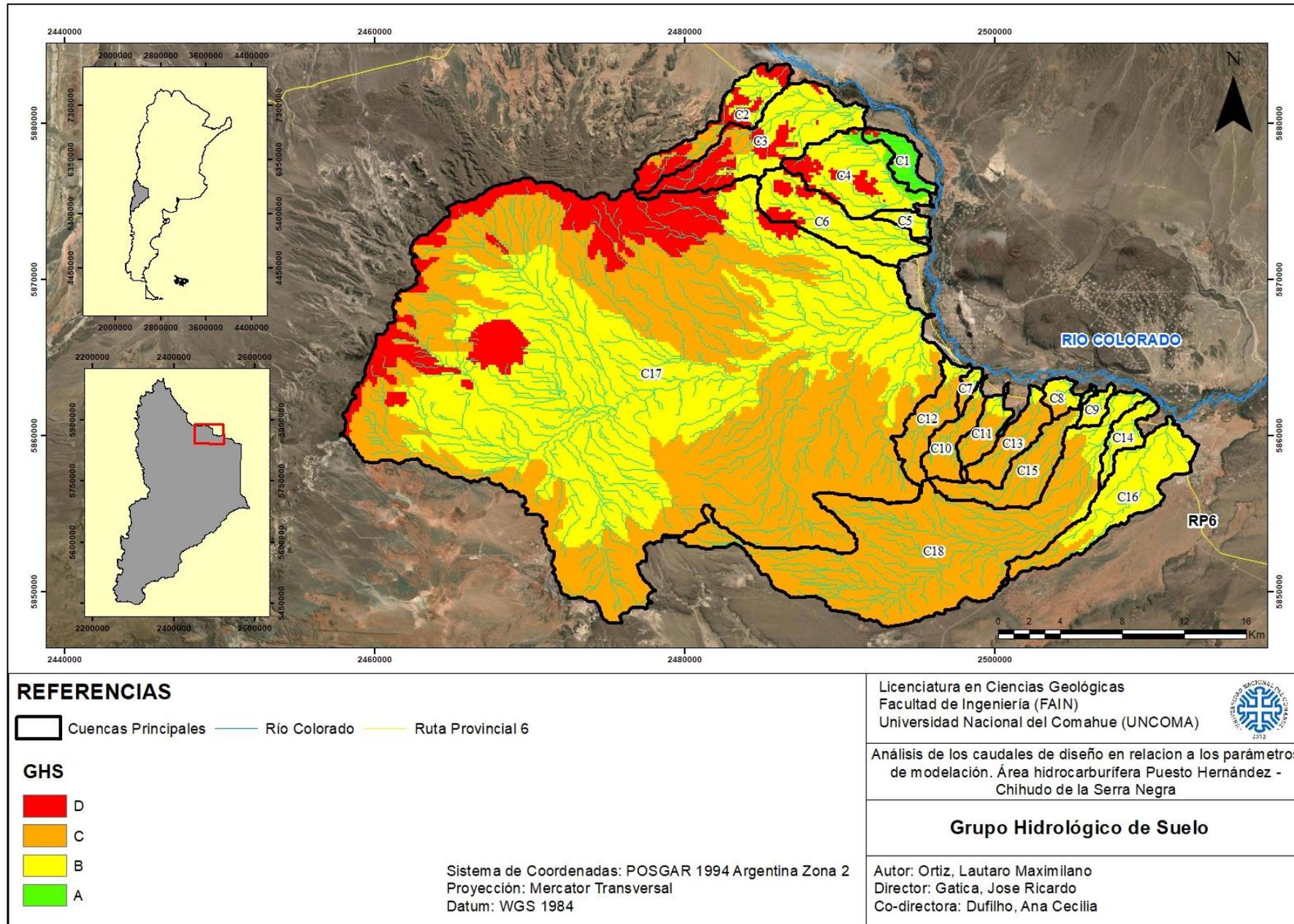


Figura 35. Mapa de Grupo Hidrológico de Suelo (GHS) del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

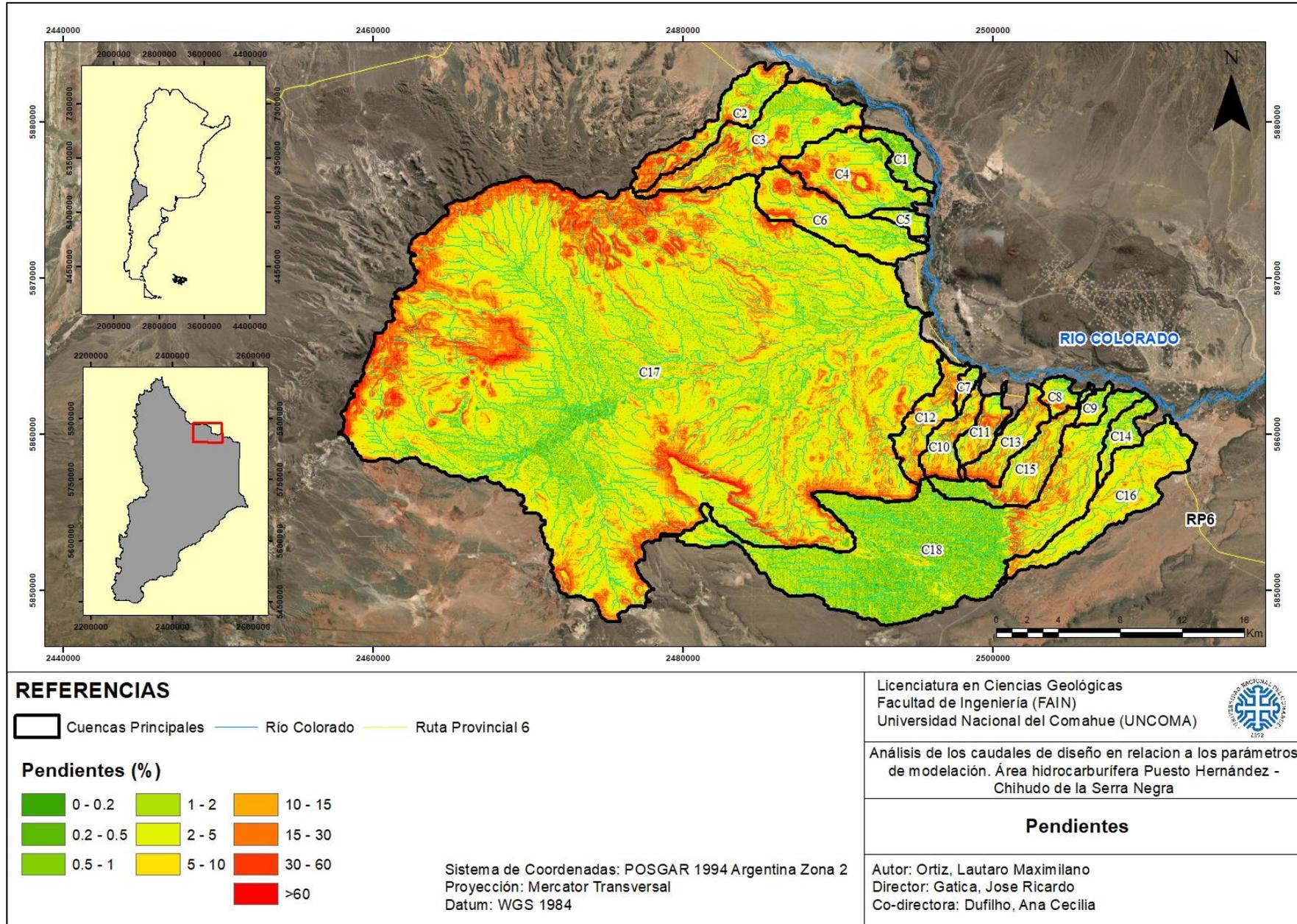


Figura 36. Mapa de pendientes del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

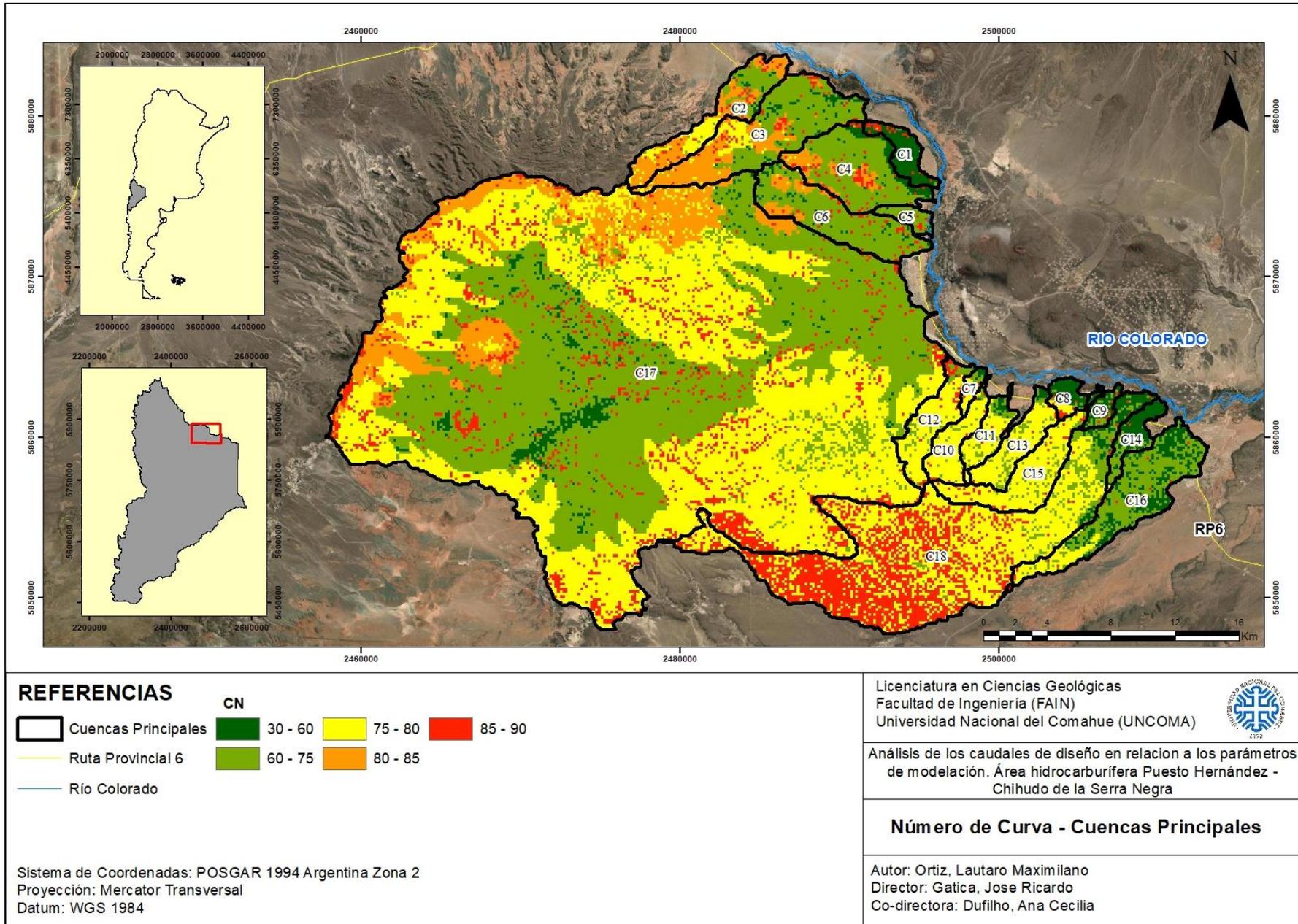


Figura 37. Mapa de Curva Numero para las cuencas principales del área de estudio. Área hidrocarburífera Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

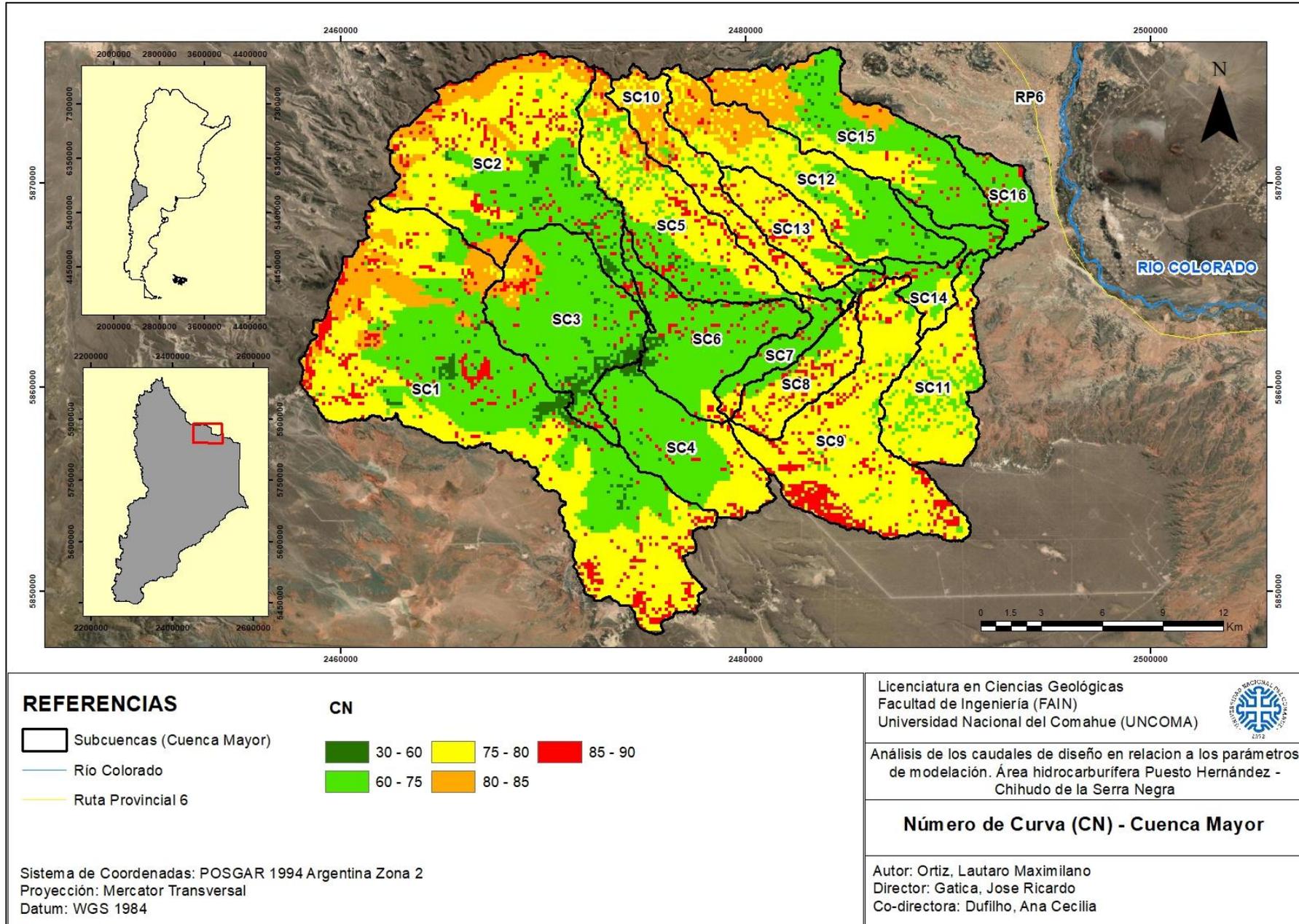


Figura 38. Mapa de Curva Numero para la Cuenca Mayor. Área hidrocarbúrfica Puesto Hernández – Chihuido de la Sierra Negra (elaboración propia).

5.3 Modelación Hidrológica (HEC-HMS)

En función de lo expuesto en el apartado 3.7 y 4.5.1, se presentaron las dieciséis subcuencas obtenidas de la Cuenca Mayor en el modelo (SC1 – SC16) (Fig. 39). Mediante la simulación hidrológica realizada en el HEC-HMS se obtuvo información de importancia como los hidrogramas de crecida de las cuencas, volúmenes de agua generados por las tormentas, áreas de drenaje, etc.

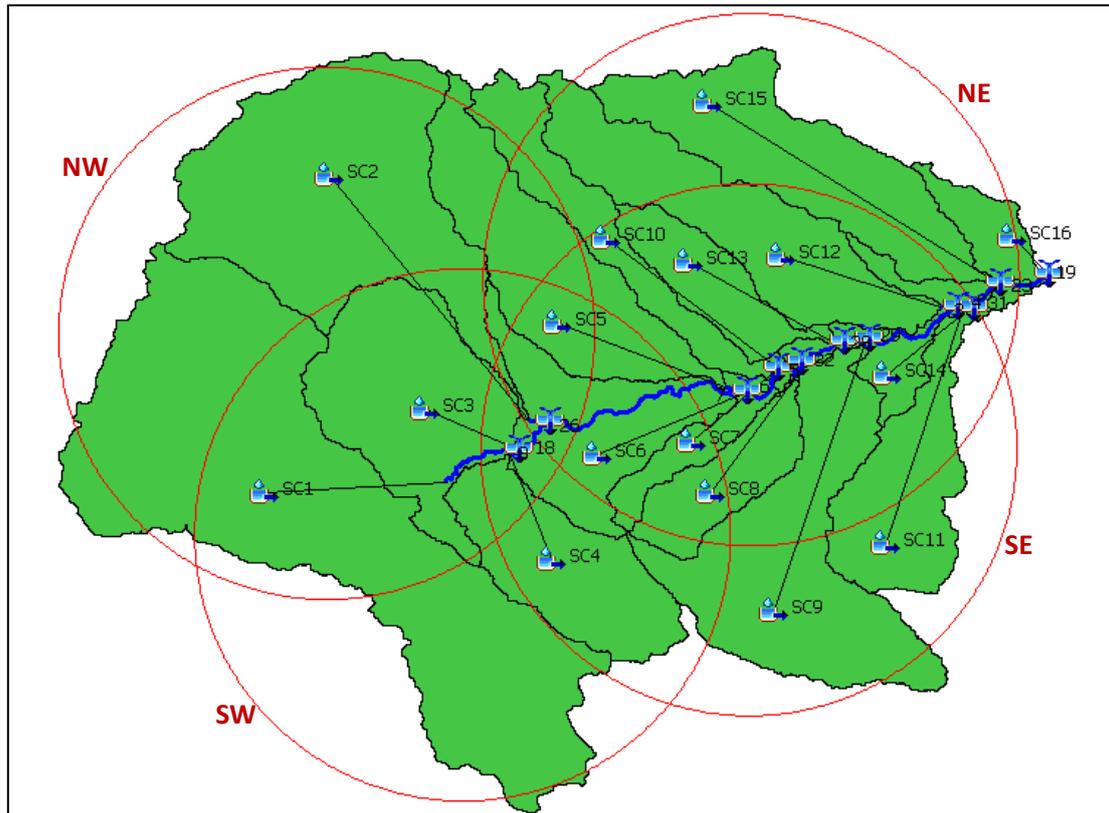


Figura 39. Posiciones de las cuatro tormentas utilizadas en el modelo (NW, SW, NE y SE) y esquema de las subcuencas consideradas en el estudio. Además, se puede observar las conexiones entre las subcuencas.

A continuación, en la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de la simulación para cada una de las posiciones de tormenta a la salida de la Cuenca Mayor: área de drenaje (km^2), caudal pico (m^3/s) y volumen de escorrentía (mm). Luego, en la Fig. 40 se presentan los hidrogramas de salida.

En la Tabla 13 se pueden observar los resultados de caudales pico (m^3/s) y volumen de escorrentía (mm) para cada una de las subcuencas pertenecientes a la Cuenca Mayor. Además, se presentan los valores de CN para cada subcuenca, tiempos de retardo, abstracciones iniciales y áreas de drenaje (km^2).

Estos resultados corresponden al modelo “base” utilizando los valores de CN originales, sin realizar variaciones para el análisis de sensibilidad. En el apartado 5.4 se presentan los resultados de las simulaciones luego de aplicarles las variaciones al CN.

Tabla 12. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Caso Base. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN BASE (SALIDA CUENCA MAYOR)			
Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	193	8,10
Run 2 (NW)	658,9	190,9	7,53
Run 3 (SE)	658,9	206,3	8,51
Run 4 (SW)	658,9	136,8	5,62

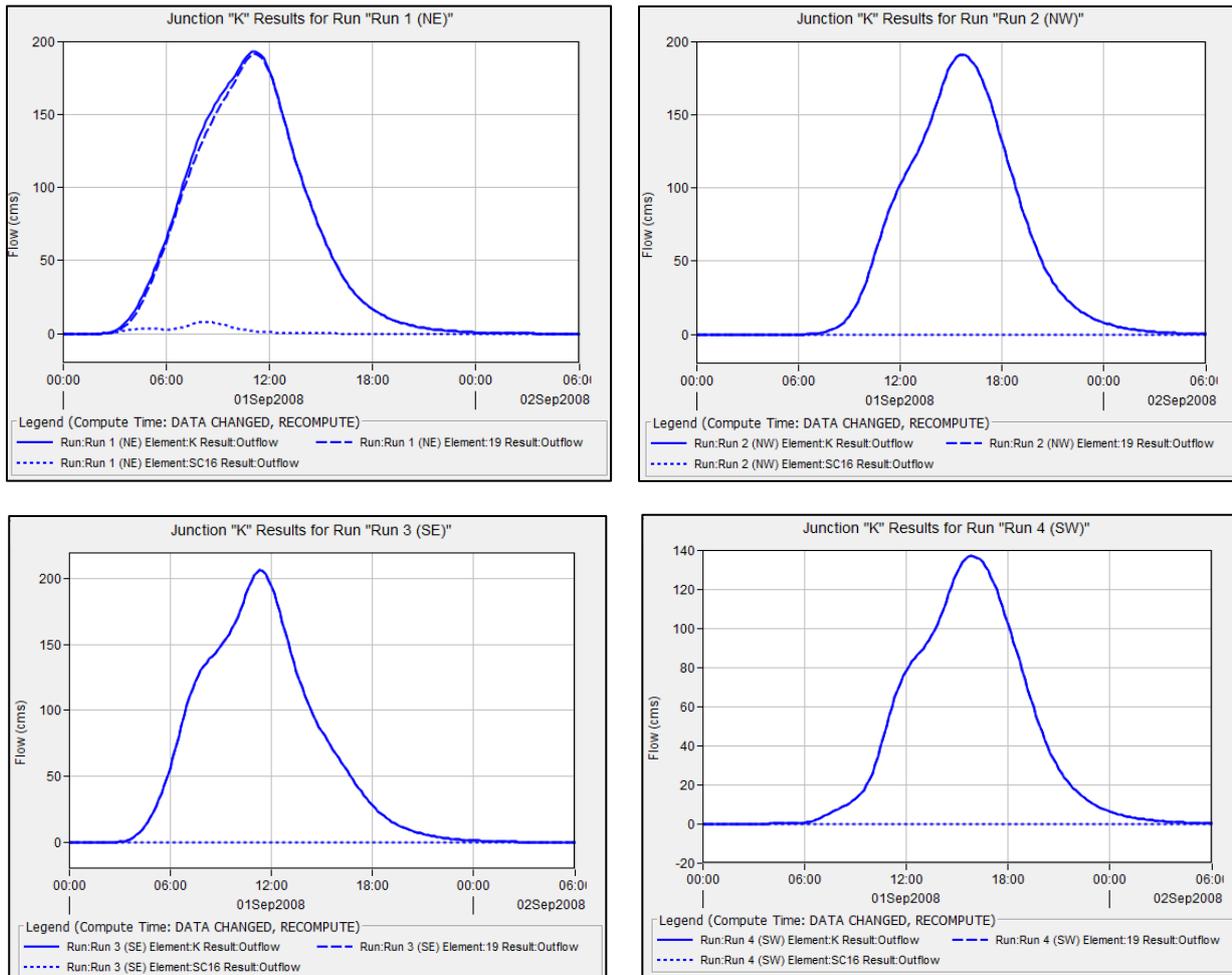


Figura 40. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR).

Se puede observar en los resultados de la Tabla 12 que cuando el núcleo de la tormenta está ubicado en el sector Sureste de la Cuenca Mayor, se produce la mayor magnitud de caudal (206,3 m³/s), en comparación a los otros sectores

Como se mencionaba anteriormente, la tormenta es única, circular y de 20 km de diámetro. Por lo tanto, que se obtengan diferentes valores de caudales y/o volúmenes de escorrentía dependiendo en que sector se produzca la tormenta, depende de los valores de CN, de la forma de las cuencas, área, etc. El CN a su vez, depende de varios factores como el uso del suelo, cobertura vegetal, tipo de suelo, pendientes, etc. Consecuentemente, al existir en la cuenca una gran variación de estos elementos, se producen distintos resultados.

Tabla 13. Resultados obtenidos (caudales máximos y volúmenes de escorrentía) para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño (100TR).
Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN BASE (SUBCUENCAS – CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II)	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	16.04	76	194.61	0	74.7	0	69.7	0	10.56	0	9.76
SC2	80.2	16.04	76	195.10	0	87.2	0	0	0	25.61	0	0
SC3	46.7	21.77	70	148.46	0	49.7	0	49.7	0	19.32	0	19.32
SC4	33.2	19.76	72	172.72	0	0	25.2	34.8	0	0	15.04	21.78
SC5	43.8	16.04	76	202.14	27.1	25.6	0	0	13.93	13.06	0	0
SC6	33.1	21.77	70	213.15	16.3	0	25.1	24	10.78	0	17.56	16.71
SC7	9.5	19.76	72	117.90	12.1	0	13.1	4.7	19.91	0	21.78	6.5
SC8	17.1	14.33	78	113.57	25.6	0	30.3	8.6	24.66	0	30.18	6.74
SC9	59.5	12.70	80	218.10	0	0	70.2	0	0	0	30.95	0
SC10	23.3	13.50	79	171.87	20.4	0	0	0	18.65	0	0	0
SC11	30.6	16.04	76	178.34	9.2	0	37.3	0	5.48	0	27.21	0
SC12	43.9	16.93	75	204.28	45.3	0	17.7	0	24.75	0	8.59	0
SC13	16.9	14.33	78	162.92	23.5	0	23.1	0	30.18	0	29.61	0
SC14	14.7	19.76	72	157.07	16.4	0	14.3	0	21.78	0	18.54	0
SC15	45.9	17.85	74	217.73	45.1	0	0	0	24.39	0	0	0
SC16	10.4	20.75	71	139.27	8.1	0	0	0	12.83	0	0	0

5.4 Análisis de Sensibilidad

En función de lo expuesto en los apartados 3.7, 4.5 y 4.6, se realizaron las variaciones de Curva Numero (CN) correspondientes para realizar el análisis de sensibilidad.

Se realizaron dos tipos de variaciones: reducciones y aumentos con respecto al CN original. Las reducciones son del 5, 10, 15, 20 y 30% y los aumentos propuestos son del 5 y 10% ya que valores mayores de CN implicarían valores que no se ajustan al método.

Una vez realizadas las variaciones correspondientes del CN junto a sus cálculos de abstracciones iniciales y tiempos de retardo, se generaron las múltiples simulaciones en el modelo HEC – HMS para obtener los resultados de volúmenes de escorrentía (mm) y caudales pico (m³/s) para cada una de las cuatro posiciones de tormenta. Se obtuvieron resultados para la salida de la Cuenca Mayor y para cada una de las dieciséis subcuencas aportantes. Con los resultados obtenidos fue posible calcular el índice ROV y Tasas de Cambio.

Los resultados de las simulaciones HEC-HMS del CN original (caso base) fueron presentados en el apartado 5.3.

A continuación, se presentan en las Tablas 14 a 20 los resultados obtenidos de las simulaciones HEC – HMS para cada una de las variaciones de CN y posiciones de tormenta a la salida de la Cuenca Mayor. Posteriormente se muestran los resultados del índice ROV, tasas de cambio y gráficos correspondientes para caudales pico (m³/s) y volúmenes de escorrentía (mm).

5.4.1 Variaciones del CN y Simulaciones HEC-HMS (Salida - Cuenca Mayor)

Tabla 14. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN aumento 5% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN AUMENTO 5% (SALIDA CUENCA MAYOR)			
Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	237,3	10,20
Run 2 (NW)	658,9	235,3	9,65
Run 3 (SE)	658,9	249,7	10,57
Run 4 (SW)	658,9	171,3	7,34

Tabla 15. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN aumento 10% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN AUMENTO 10% (SALIDA CUENCA MAYOR)			
Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	283,9	12,49
Run 2 (NW)	658,9	285,7	12,08
Run 3 (SE)	658,9	295,1	12,82
Run 4 (SW)	658,9	209,5	9,22

Tabla 16. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 5% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 5% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	153,4	6,30
Run 2 (NW)	658,9	152,3	5,74
Run 3 (SE)	658,9	167,3	6,72
Run 4 (SW)	658,9	107,7	4,19

Tabla 17. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 10% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 10% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	119,1	4,79
Run 2 (NW)	658,9	119,6	4,27
Run 3 (SE)	658,9	133,6	5,24
Run 4 (SW)	658,9	84,1	3,06

Tabla 18. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 15% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 15% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	89,6	3,53
Run 2 (NW)	658,9	91,2	3,08
Run 3 (SE)	658,9	102,9	3,91
Run 4 (SW)	658,9	62,1	2,10

Tabla 19. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 20% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 20% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	64	2,45
Run 2 (NW)	658,9	65	2,06
Run 3 (SE)	658,9	76,5	2,81
Run 4 (SW)	658,9	42,7	1,35

Tabla 20. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. Variación CN reducción 30% del original. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 30% (SALIDA CUENCA MAYOR)			
Tormenta	Área de drenaje (km²)	Caudal pico (m³/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	26	0.92
Run 2 (NW)	658,9	24,6	0.66
Run 3 (SE)	658,9	35,3	1,15
Run 4 (SW)	658,9	12,7	0.37

A continuación, en la Tabla 21 y 22 se exhiben a modo de resumen los mismos resultados presentados en las tablas anteriores, en este caso agrupados para el cálculo del índice ROV y Tasas de Cambio.

Se puede observar el valor de volumen de escorrentía (mm) y caudal pico (m³/s) que le corresponde a cada posición de tormenta y variación de CN.

Tabla 21. Caudales pico (m³/s) para cada una de las variaciones de CN y posiciones de tormenta. Los valores de 1.10, 1.05, 1.00 (CASO BASE), 0.95, 0.90, 0.85, 0.80 y 0.70 corresponden a los porcentajes de variación con respecto al CN base. Los valores fueron redondeados por simplificación para el cálculo.

CAUDALES PICO (M³/S)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	284	286	295	210
1.05	237	235	250	171
1.00	193	191	206	137
0.95	153	152	167	108
0.90	119	120	134	84
0.85	90	91	103	62
0.80	64	65	77	43
0.70	26	25	35	13

Tabla 22. Volúmenes de escorrentía (mm) para cada una de las variaciones de CN y posiciones de tormenta. Los valores de 1.10, 1.05, 1.00 (CASO BASE), 0.95, 0.90, 0.85, 0.80 y 0.70 corresponden a los porcentajes de variación con respecto al CN base. Los valores fueron redondeados por simplificación para el cálculo.

VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA (MM)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	12.49	12.08	12.82	9.22
1.05	10.20	9.65	10.57	7.34
1.00	8.10	7.53	8.51	5.62
0.95	6.30	5.74	6.72	4.19
0.90	4.79	4.27	5.24	3.06
0.85	3.53	3.08	3.91	2.10
0.80	2.45	2.06	2.81	1.35
0.70	0.92	0.66	1.15	0.37

En la Fig.41 y 42 se pueden observar los gráficos de caudales pico (m^3/s) y volúmenes de escorrentía (mm) en función de la variación del CN para las distintas posiciones de la tormenta de diseño.

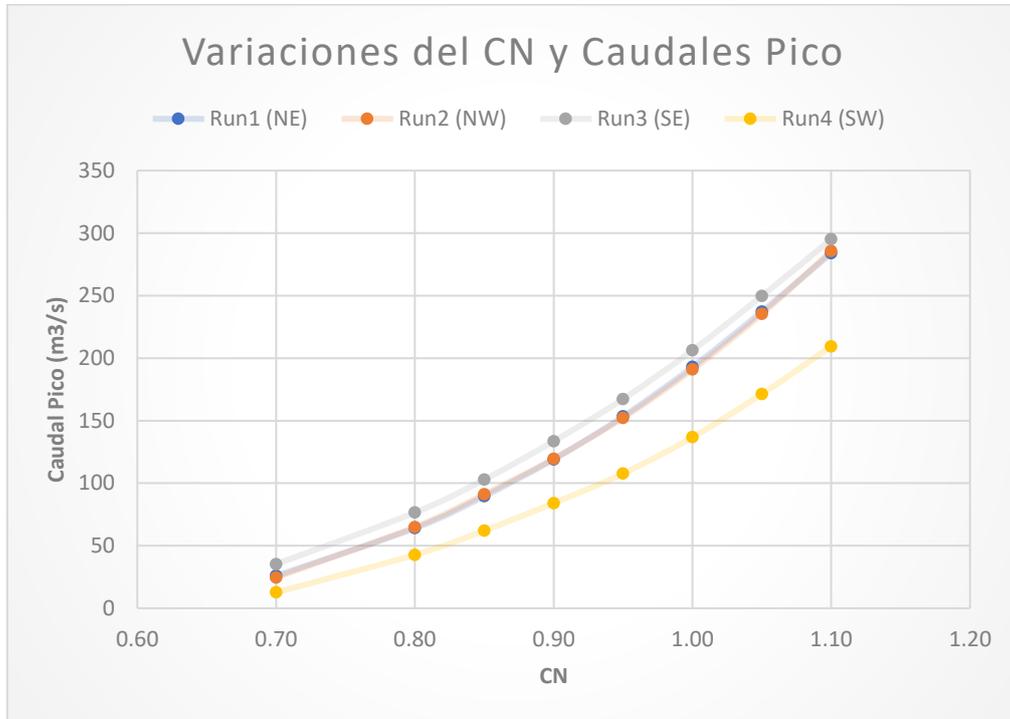


Figura 41. Caudales pico (m^3/s) para cada una de las posiciones de la tormenta de diseño en función de las variaciones del Número de Curva.

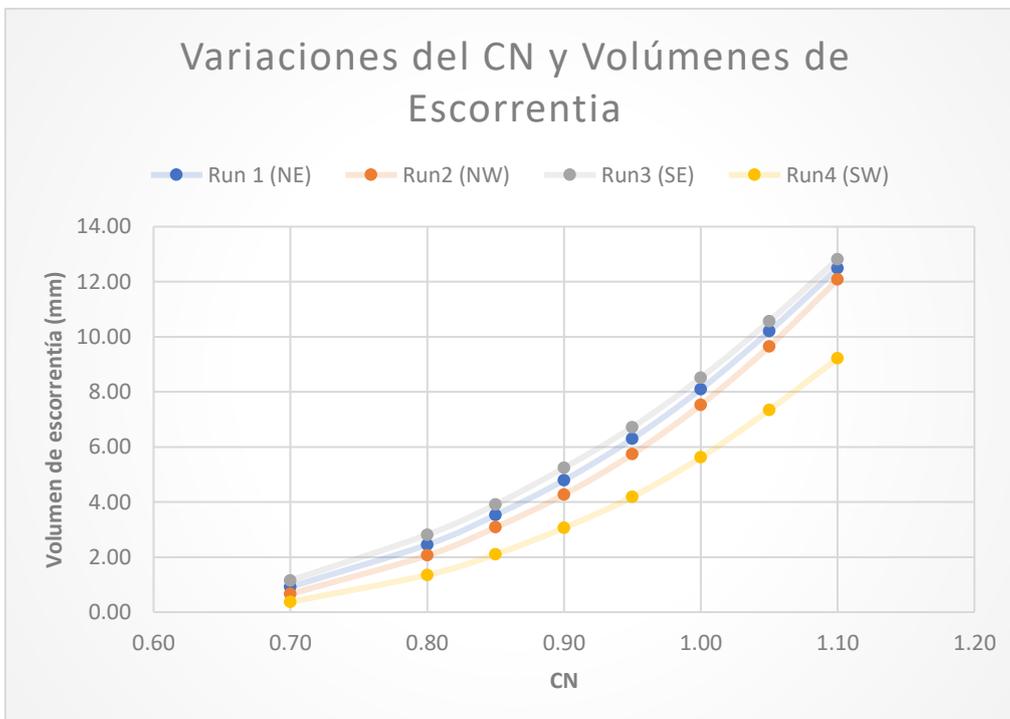


Figura 42. Volúmenes de escorrentía (mm) para cada una de las posiciones de la tormenta de diseño en función de las variaciones del Número de Curva.

A partir de los resultados de las simulaciones y de los gráficos generados (Fig.41 y 42), se observa una tendencia exponencial creciente para ambos casos: caudales pico y volúmenes de escorrentía. Esto se debe al aumento de ambas magnitudes a medida que aumenta el Curva Número.

En la Fig. 41 y en las Tablas 21 y 22 se puede observar que la situación crítica ocurre cuando el núcleo de la tormenta se encuentra en el sector Sureste de la Cuenca Mayor, generándose los caudales y volúmenes de escorrentía más elevados, para cualquier variación de CN (curva gris). De la misma manera, cuando el núcleo de la tormenta se encuentra en el sector Suroeste de la Cuenca Mayor se producen caudales y volúmenes de escorrentía de menor magnitud para cualquier variación. Cuando la tormenta se ubica tanto en el sector Noroeste como en el sector Noreste, las magnitudes son similares, motivo por el cual en la Fig.41 y 42 aparecen superpuestos. Tal como se menciona en el apartado 5.1, las subcuencas de la Cuenca Mayor presentan un comportamiento hidrológico diferente producto de la variabilidad de elementos geomorfológicos.

La situación del sector Sureste se genera por diversos motivos en los cuales se puede encontrar: que las subcuencas de este sector son las más cercanas a la salida de la cuenca en general, por lo tanto, no hay tanta atenuación de las crecidas. Si bien las formas de todas las subcuencas por índice de Gravelius se clasifican de forma alargadas, los valores no son exactamente similares. Las subcuencas de este sector no son alargadas y estrechas como las del sector Noreste, por ejemplo. En el Sureste son alargadas, pero con tendencias más ovaladas, por lo que los escurrimientos provocados por lluvias intensas se concentran más rápido y los tiempos de concentración son relativamente menores. En cuanto a las pendientes de los cauces, las subcuencas de este sector están sometidas a zonas de escarpa y talud, en comparación a zonas relativamente planas y de pendientes más bajas como otras subcuencas. Todos estos factores relacionados (forma de las subcuencas, áreas y pendientes) provocan que más allá de las variaciones de CN que se utilicen, los caudales y los volúmenes de escorrentía provenientes de esta posición de tormenta siempre serán mayores.

De la misma manera, la ubicación de núcleo de tormenta en la zona Suroeste provoca los caudales y volúmenes de escorrentía de menor magnitud, para cualquier variación de CN que se realice. Si bien las áreas de las subcuencas de este sector son relativamente más grandes que el resto, por lo que se pensaría que generarían caudales más elevados, están más alejadas de la salida de la cuenca, por lo tanto, la crecida sufre más atenuación. La cantidad de subcuencas que recibe a esta tormenta es relativamente menor que el resto y las pendientes en este sector son más bajas que las del sector Sureste. Además, si se analiza el mapa de CN (Fig.38) se puede observar que los valores son relativamente menores que en otras áreas, disminuyendo la magnitud de los caudales producidos.

5.4.1.1 Índice ROV. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Salida – Cuenca Mayor)

A continuación, en las Tablas 23 y 24 se presentan los resultados del índice ROV para los caudales y volúmenes de escorrentía obtenidos de las simulaciones HEC – HMS. Los valores utilizados para el cálculo del índice son los presentados en las Tablas 21 y 22.

Tabla 23. Índice ROV para Caudales Pico a la salida de la Cuenca Mayor. CB: Caso Base.

ÍNDICE ROV (CAUDALES PICO)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	4.71	4.97	4.30	5.31
1.05	4.59	4.65	4.21	5.04
1.00	CB	CB	CB	CB
0.95	4.10	4.04	3.78	4.25
0.90	3.83	3.73	3.52	3.85
0.85	3.57	3.48	3.34	3.64
0.80	3.34	3.30	3.15	3.44
0.70	2.88	2.90	2.76	3.02

Tabla 24. Índice ROV para Volúmenes de Escorrentía a la salida de la Cuenca Mayor. CB: Caso Base.

ÍNDICE ROV (VOLUMEN DE ESCORRENTÍA)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	5.42	6.04	5.06	6.41
1.05	5.19	5.63	4.84	6.12
1.00	CB	CB	CB	CB
0.95	4.44	4.75	4.21	5.09
0.90	4.09	4.33	3.84	4.56
0.85	3.76	3.94	3.60	4.18
0.80	3.49	3.63	3.35	3.80
0.70	2.95	3.04	2.88	3.11

Como se menciona en el apartado 4.6.1.1, el índice ROV es un índice utilizado para evaluar la sensibilidad de un modelo, utilizando la relación que hay entre las variaciones relativas del resultado junto a las variaciones relativas de los datos de entrada del modelo.

La interpretación del resultado del ROV se basa en que a mayor valor del índice mayor es la influencia que tiene un parámetro de entrada en el resultado del modelo. En este caso el parámetro de entrada es el Curva Numero (CN) y los resultados del modelo son los caudales y volúmenes de escorrentía. Las distintas variaciones del CN a partir del caso base, en aumento o reducción, provocan los diferentes resultados a la salida de la Cuenca Mayor.

Como se puede observar en las Tablas 23 y 24, es notable la influencia que tiene el parámetro de entrada CN en los resultados del modelo, ya que a medida que se producen las variaciones, el índice ROV también lo hace. Además, el valor del índice ROV varía para las distintas ubicaciones de la tormenta de diseño aún para el mismo valor de CN.

Por ejemplo, en la Tabla 24 puede observar que para la variación de CN de 1.10 (aumento del CN del 10% a partir del caso base) el valor del índice para el sector NE es de 5.42, para el sector NW es de 6.04, sector SE es de 5.06 y para el sector SW es de 6.41. Esto quiere decir que cuando se produce una variación del CN en aumento del 10% a partir del caso base, la influencia que tiene la variación de este parámetro en el resultado del modelo es mayor cuando la tormenta se da en el sector SW que en el resto. De la misma manera se puede hacer el análisis en la Tabla 23 observando el índice ROV para caudales pico.

Cabe aclarar que no es el mismo análisis que los caudales y volúmenes de escorrentía de mayor magnitud se generen cuando el núcleo de la tormenta está ubicado en el sector Sureste de la Cuenca, a que mayor es la influencia que tiene el parámetro de entrada (CN) en el resultado del modelo en el sector Suroeste. Son dos análisis distintos.

5.4.1.2 T. de Cambio. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Salida – Cuenca Mayor).

A continuación, en las Tablas 25 y 26 se presentan los resultados de las Tasas de Cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía a la salida de la Cuenca Mayore, junto a las distintas posiciones de la tormenta de diseño. Los valores utilizados para el cálculo de las tasas de cambio son los presentados en las Tablas 21 y 22.

Tabla 25. Tasas de cambio para caudales pico a la salida de la Cuenca Mayor en función de las posiciones de la tormenta de diseño.

TASA DE CAMBIO (CAUDALES PICO)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	1.47	1.50	1.43	1.53
1.05	1.23	1.23	1.21	1.25
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.95	0.79	0.80	0.81	0.79
0.90	0.62	0.63	0.65	0.61
0.85	0.46	0.48	0.50	0.45
0.80	0.33	0.34	0.37	0.31
0.70	0.13	0.13	0.17	0.09

Tabla 26. Tasas de cambio para volúmenes de escorrentía a la salida de la Cuenca Mayor en función de las posiciones de la tormenta de diseño.

TASA DE CAMBIO (VOLUMEN DE ESCORRENTÍA)				
CN	Run1 (NE)	Run2 (NW)	Run3 (SE)	Run4 (SW)
1.10	1.54	1.60	1.51	1.64
1.05	1.26	1.28	1.24	1.31
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.95	0.78	0.76	0.79	0.75
0.90	0.59	0.57	0.62	0.54
0.85	0.44	0.41	0.46	0.37
0.80	0.30	0.27	0.33	0.24
0.70	0.11	0.09	0.14	0.07

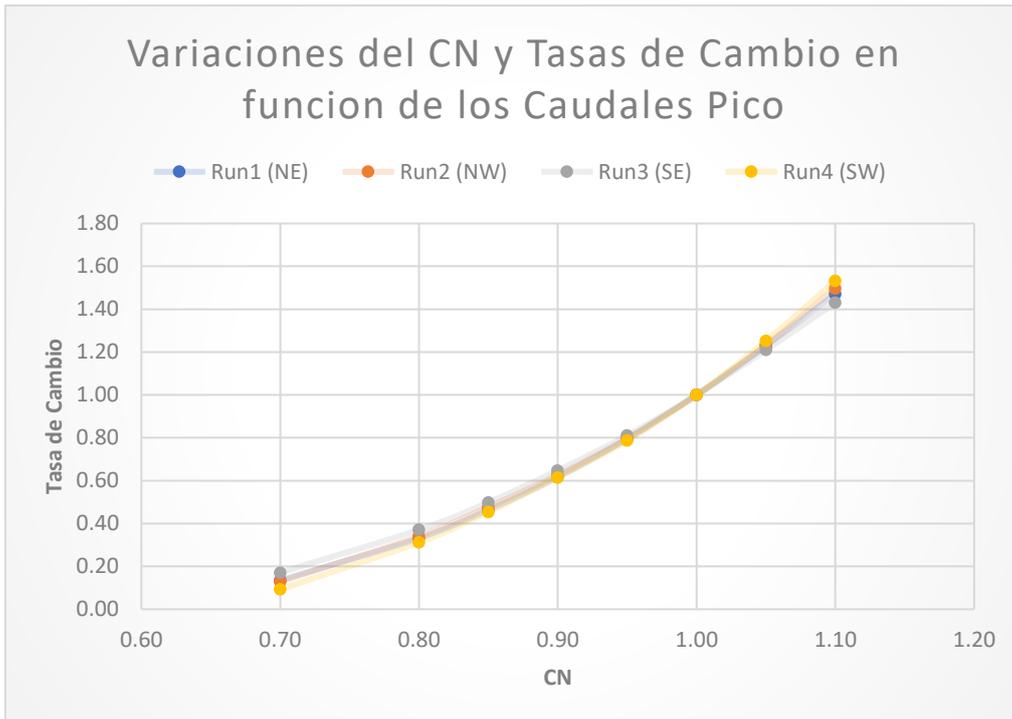


Figura 43. Variaciones del CN y tasas de cambio en función de los caudales pico para las distintas posiciones de la tormenta de diseño.

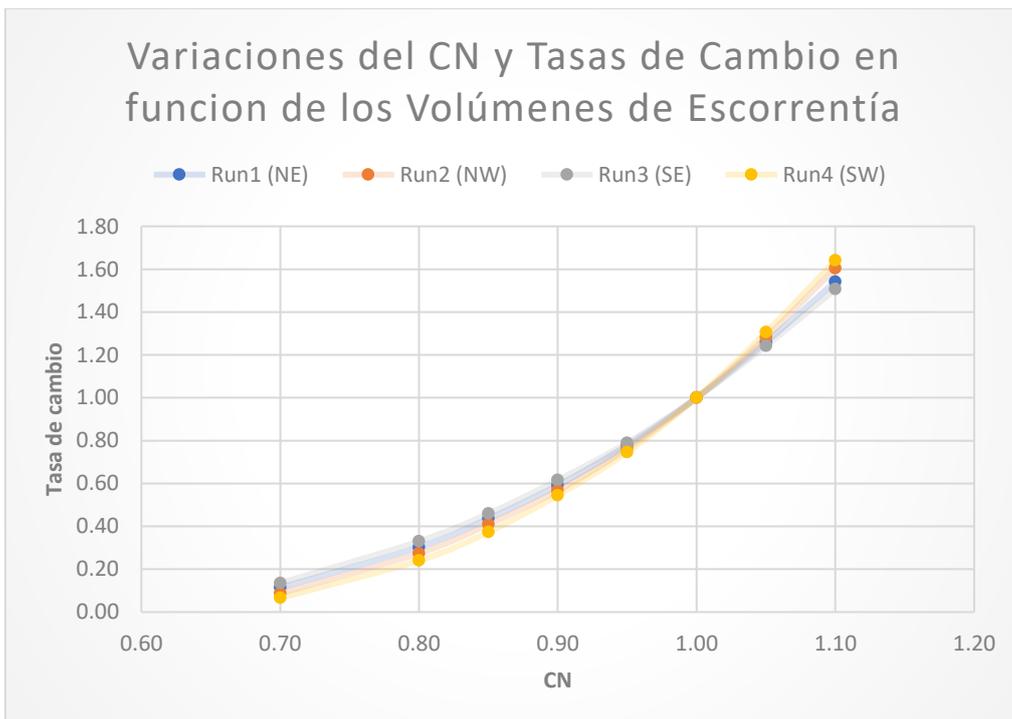


Figura 44. Variaciones del CN y tasas de cambio en función de los volúmenes de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño.

Como se pudo observar en los gráficos de las variaciones de los caudales y volúmenes de escorrentía en función de las variaciones del CN, con las tasas de cambio se puede observar el mismo comportamiento: incremento de las crecidas a medida que aumenta el Número de Curva. En las Figs. 43 y 44 la tendencia exponencial creciente expresa lo mencionado anteriormente.

Cuando se analiza la Tasa de Cambio para ambas cantidades, se analiza la magnitud del cambio de la variable con respecto a otra que esté relacionada. En este caso cuanto varían los caudales pico o volúmenes de escorrentía con respecto a los valores del caso base.

En las Tablas 25 y 26 se puede observar un comportamiento distinto en la Cuenca cuando se varía el CN en aumento y cuando se varía en reducción: en ambos casos (caudales pico y/o volúmenes de escorrentía) se observa que cuando aumenta el CN las mayores variaciones (mayores tasas de cambio) se concentran en el sector Suroeste, en cambio, cuando se disminuye el CN respecto al caso base, las mayores variaciones se concentran en el sector Sureste. Siempre el valor más alto de tasa de cambio es el que expresa la mayor variación de magnitud con respecto al caso base.

Esto demuestra que la Cuenca no responde de la misma manera ante aumentos o reducciones del CN. Se ve reflejado como la morfología de las subcuencas está vinculada a la variación de los caudales y/o volúmenes de escorrentía.

5.4.2 Variaciones del CN y Simulaciones HEC-HMS (Subcuencas – Cuenca Mayor)

A continuación, con el objetivo de realizar un análisis más detallado, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones HEC – HMS para cada una de las dieciséis subcuencas de la Cuenca Mayor.

En las Tablas 27 a 33 se podrán observar los valores de caudales pico y volúmenes de escorrentía en cada subcuenca, para cada variación de CN y para las distintas posiciones de tormenta.

Posteriormente y a partir de estos resultados, se presentan los cálculos del índice ROV y Tasas de Cambio para cada una de ellas.

Los resultados para el caso base (Subcuencas - Cuenca Mayor) se encuentran en el apartado 5.3 (Tabla 13).

Tabla 27. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN AUMENTO 5% RESPECTO AL BASE).
Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN AUMENTO 5% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	12.86	80	194.61	0	94.8	0	89.2	0	14.25	0	13.3
SC2	80.2	12.86	80	195.10	0	102.4	0	0	0	31.44	0	0
SC3	46.7	18.32	74	140.81	0	60.8	0	60.8	0	24.11	0	24.11
SC4	33.2	16.40	76	163.47	0	0	31.8	42.5	0	0	19.3	26.96
SC5	43.8	12.86	80	190.86	34.8	33.1	0	0	18.2	17.19	0	0
SC6	33.1	18.32	74	201.00	21.4	0	31.5	30.3	14.27	0	22.12	21.14
SC7	9.5	16.40	76	111.54	14.8	0	15.8	6.4	24.85	0	26.96	9.2
SC8	17.1	11.23	82	107.12	30.7	0	35.8	11.8	30.52	0	36.62	9.75
SC9	59.5	9.68	84	218.10	0	0	82	0	0	0	37.63	0
SC10	23.3	10.44	83	162.24	25.4	0	0	0	23.82	0	0	0
SC11	30.6	12.86	80	168.11	13.1	0	44.9	0	8.09	0	33.21	0
SC12	43.9	13.71	79	193.43	55.1	0	23.9	0	30.43	0	11.86	0
SC13	16.9	11.23	82	151.84	28.2	0	27.8	0	36.62	0	36	0
SC14	14.7	16.40	76	147.86	20	0	17.7	0	26.96	0	23.3	0
SC15	45.9	14.58	78	205.20	55.2	0	0	0	29.99	0	0	0
SC16	10.4	17.34	75	131.14	10.3	0	0	0	16.7	0	0	0

Tabla 28. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN AUMENTO 10% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN AUMENTO 10% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	9.97	84	194.61	0	117.7	0	111.5	0	18.75	0	17.65
SC2	80.2	9.97	84	195.10	0	118.4	0	0	0	38.07	0	0
SC3	46.7	15.17	77	133.56	0	71	0	71	0	28.67	0	28.67
SC4	33.2	13.34	79	154.67	0	0	37.9	49.5	0	0	23.46	31.85
SC5	43.8	9.97	84	180.08	43.7	41.8	0	0	23.3	22.14	0	0
SC6	33.1	15.17	77	189.48	26.4	0	37.6	36.3	17.78	0	26.49	25.42
SC7	9.5	13.34	79	105.50	17.3	0	18.4	8.1	29.55	0	31.85	12.07
SC8	17.1	8.41	86	100.92	36.2	0	41.8	15.6	37.24	0	43.91	13.64
SC9	59.5	6.93	88	218.10	0	0	94.6	0	0	0	45.23	0
SC10	23.3	7.66	87	152.98	30.9	0	0	0	29.93	0	0	0
SC11	30.6	9.97	84	158.33	17.8	0	53	0	11.46	0	40	0
SC12	43.9	10.78	83	183.07	65.8	0	31.2	0	36.87	0	15.88	0
SC13	16.9	8.41	86	141.20	33.2	0	32.7	0	43.91	0	43.24	0
SC14	14.7	13.34	79	139.11	23.4	0	20.9	0	31.85	0	27.86	0
SC15	45.9	11.61	81	193.24	64.6	0	0	0	35.22	0	0	0
SC16	10.4	14.24	78	123.42	12.5	0	0	0	20.53	0	0	0

Tabla 29. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 5% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 5% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km2)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m3/s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	19.56	72	194.61	0	56.9	0	52.6	0	7.55	0	6.89
SC2	80.2	19.56	72	195.10	0	73.1	0	0	0	20.49	0	0
SC3	46.7	25.59	67	156.57	0	39.5	0	39.5	0	15.14	0	15.14
SC4	33.2	23.47	68	182.52	0	0	19.4	27.9	0	0	11.42	17.24
SC5	43.8	19.56	72	214.02	20.4	19.1	0	0	10.36	9.62	0	0
SC6	33.1	25.59	67	226.04	11.9	0	19.5	18.5	7.86	0	13.6	12.87
SC7	9.5	23.47	68	124.63	9.7	0	10.6	3.3	15.61	0	17.24	4.35
SC8	17.1	17.76	74	120.36	20.8	0	25.1	6	19.57	0	24.47	4.41
SC9	59.5	16.04	76	218.10	0	0	59.3	0	0	0	25.07	0
SC10	23.3	16.89	75	181.97	16	0	0	0	14.27	0	0	0
SC11	30.6	19.56	72	189.13	6	0	30.3	0	3.48	0	21.9	0
SC12	43.9	20.50	71	215.73	36.4	0	12.6	0	19.75	0	5.96	0
SC13	16.9	17.76	74	174.56	19.2	0	18.9	0	24.47	0	23.97	0
SC14	14.7	23.47	68	166.83	13.1	0	11.2	0	17.24	0	14.42	0
SC15	45.9	21.46	70	230.98	36	0	0	0	19.46	0	0	0
SC16	10.4	24.52	67	147.89	6.2	0	0	0	9.56	0	0	0

Tabla 30. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 10% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 10% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	23.47	68	194.61	0	41.4	0	37.7	0	5.12	0	4.6
SC2	80.2	23.47	68	195.10	0	60.1	0	0	0	16.01	0	0
SC3	46.7	29.83	63	165.24	0	31.5	0	31.5	0	11.89	0	11.89
SC4	33.2	27.60	65	192.97	0	0	14.9	22.4	0	0	8.64	13.71
SC5	43.8	23.47	68	226.64	15.3	14.2	0	0	7.66	7.04	0	0
SC6	33.1	29.83	63	239.81	8.6	0	15.1	14.3	5.64	0	10.53	9.9
SC7	9.5	27.60	65	131.81	9.5	0	8.6	2.2	1.35	0	13.71	2.78
SC8	17.1	21.56	70	127.55	16.6	0	20.5	3.8	15.16	0	19.44	2.65
SC9	59.5	19.76	72	218.10	0	0	49.1	0	0	0	19.89	0
SC10	23.3	20.65	71	192.66	12.1	0	0	0	10.59	0	0	0
SC11	30.6	23.47	68	200.58	3.7	0	24.7	0	2.07	0	17.79	0
SC12	43.9	24.46	68	227.91	28.5	0	8.3	0	15.38	0	3.88	0
SC13	16.9	21.56	70	186.89	15.4	0	15.1	0	19.44	0	19	0
SC14	14.7	27.60	65	177.23	10.2	0	8.6	0	13.28	0	10.87	0
SC15	45.9	25.48	67	245.08	28.1	0	0	0	15.14	0	0	0
SC16	10.4	28.70	64	157.09	4.5	0	0	0	6.83	0	0	0

Tabla 31. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 15% RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 15% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	27.84	65	194.61	0	28.9	0	25.7	0	3.33	0	2.92
SC2	80.2	27.84	65	195.10	0	49.5	0	0	0	12.52	0	0
SC3	46.7	34.58	60	174.56	0	23.4	0	23.4	0	8.68	0	8.68
SC4	33.2	32.21	61	204.19	0	0	10.5	16.8	0	0	5.99	10.18
SC5	43.8	27.84	65	240.15	10.1	9.2	0	0	4.97	4.5	0	0
SC6	33.1	34.58	60	254.62	5.5	0	10.8	10.1	3.63	0	7.55	7.02
SC7	9.5	32.21	61	139.52	5.7	0	6.3	1.2	8.69	0	9.86	1.44
SC8	17.1	25.82	66	135.22	12.8	0	16.2	2.1	11.36	0	15.02	1.37
SC9	59.5	23.91	68	218.10	0	0	39.8	0	0	0	15.37	0
SC10	23.3	24.85	67	204.07	8.7	0	0	0	7.52	0	0	0
SC11	30.6	27.84	65	212.83	1.7	0	19	0	0.98	0	13.59	0
SC12	43.9	28.89	64	240.95	22.3	0	5.1	0	11.96	0	2.37	0
SC13	16.9	25.82	66	200.07	11.9	0	11.6	0	15.02	0	14.64	0
SC14	14.7	32.21	61	188.39	7.9	0	6.5	0	10.19	0	8.12	0
SC15	45.9	29.96	63	260.19	21.7	0	0	0	11.76	0	0	0
SC16	10.4	33.38	60	166.97	3.2	0	0	0	4.75	0	0	0

Tabla 32. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 20 % RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 20% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	32.75	61	194.61	0	16.9	0	14.3	0	1.82	0	1.54
SC2	80.2	32.75	61	195.10	0	38.1	0	0	0	9.08	0	0
SC3	46.7	39.91	56	184.66	0	17	0	17	0	6.19	0	6.19
SC4	33.2	37.39	58	216.32	0	0	7.1	12.3	0	0	3.99	7.43
SC5	43.8	32.75	61	254.72	6.5	5.7	0	0	3.17	2.8	0	0
SC6	33.1	39.91	56	270.65	3.2	0	7.5	6.9	2.15	0	5.24	4.82
SC7	9.5	37.39	58	147.85	4.3	0	4.9	0.5	6.44	0	7.44	0.64
SC8	17.1	30.61	62	143.49	9.4	0	12.3	0.8	8.13	0	11.18	0.53
SC9	59.5	28.58	64	218.10	0	0	31.2	0	0	0	11.44	0
SC10	23.3	29.58	63	216.34	5.9	0	0	0	4.99	0	0	0
SC11	30.6	32.75	61	226.05	0.5	0	14	0	0.3	0	9.96	0
SC12	43.9	33.87	60	255.02	16.1	0	2.5	0	8.61	0	1.16	0
SC13	16.9	30.61	62	214.26	8.9	0	8.6	0	11.17	0	10.85	0
SC14	14.7	37.39	58	200.47	5.8	0	4.6	0	7.44	0	5.72	0
SC15	45.9	35.01	59	276.52	15.6	0	0	0	8.44	0	0	0
SC16	10.4	38.64	57	177.67	2.1	0	0	0	3.01	0	0	0

Tabla 33. Caudales máximos y volúmenes de escorrentía para cada una de las dieciséis subcuencas y posiciones de la tormenta de diseño de 100TR (CN REDUCCIÓN 30 % RESPECTO AL BASE). Run: Simulación/Corrida. Observar que los valores de “0 (cero)” en los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía corresponden a que la subcuenca no está recibiendo lluvia en ese sector en función de la posición de la tormenta

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 30% (SUBCUENCAS - CUENCA MAYOR)

Subcuenca	Área de drenaje (km ²)	ABS. Inicial	CN (II) adop	T. Lag (min)	Caudal pico (m ³ /s)				Volumen de escorrentía (mm)			
					Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	150.1	44.69	53	194.61	0	1.6	0	0.9	0	0.17	0	0.09
SC2	80.2	44.69	53	195.10	0	18.2	0	0	0	3.81	0	0
SC3	46.7	52.87	49	207.80	0	6.1	0	6.1	0	2.23	0	2.23
SC4	33.2	49.99	50	244.09	0	0	1.7	4.7	0	0	1.01	2.82
SC5	43.8	44.69	53	287.93	1.2	0.9	0	0	0.64	0.5	0	0
SC6	33.1	52.87	49	307.41	0.4	0	2.3	2	0.29	0	1.7	1.48
SC7	9.5	49.99	50	166.93	1.6	0	1.9	0	2.27	0	2.84	0
SC8	17.1	42.24	55	162.31	4.1	0	6.2	0	3.38	0	5.33	0
SC9	59.5	39.91	56	218.10	0	0	16.3	0	0	0	5.29	0
SC10	23.3	41.06	55	244.24	1.8	0	0	0	1.5	0	0	0
SC11	30.6	44.69	53	256.18	0	0	6.1	0	0	0	4.33	0
SC12	43.9	45.96	53	287.14	6.8	0	0.1	0	3.65	0	0.03	0
SC13	16.9	42.24	55	246.54	4.2	0	4.1	0	5.31	0	5.09	0
SC14	14.7	49.99	50	228.11	2.2	0	1.5	0	2.83	0	1.88	0
SC15	45.9	47.27	52	313.80	6.4	0	0	0	3.54	0	0	0
SC16	10.4	51.41	50	202.17	0.4	0	0	0	0.61	0	0	0

Como se mencionaba anteriormente, en las Tablas 27 a 33 se pueden observar los caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada subcuenca de la Cuenca Mayor, en función de las variaciones de CN y posiciones de tormenta. Además, como se modifican las abstracciones iniciales y los tiempos de retardo a medida que varía este parámetro.

Cuando aumentan los valores de Curva Numero, las abstracciones iniciales (o umbral de escorrentía) disminuyen, es decir, disminuye la cantidad de precipitación necesaria para que se genere el escurrimiento superficial, por lo tanto, se genera la crecida más rápidamente. De la misma manera cuando se reducen los valores de Curva Numero las abstracciones iniciales aumentan, necesitando más cantidad de precipitación para que se genere escorrentía, por lo tanto, el escurrimiento superficial se genera más lentamente.

El tiempo de retardo funciona de la misma manera. Cuando aumenta el CN los tiempos de retardo son cada vez menores y cuando los CN son reducidos los tiempos de retardo son cada vez mayores.

El tiempo de retardo, de desfase o “lag time” se define como el tiempo de desfase que hay entre el instante en que se produce el caudal pico del hidrograma y el centroide de la tormenta asociada (hietograma) y se obtiene a partir de un porcentaje del tiempo de concentración de la cuenca (60% para este trabajo final). El tiempo de concentración es el tiempo mínimo necesario, desde el comienzo de la tormenta, para que toda la superficie de la cuenca este aportando escorrentía al punto de desagüe.

Estas dos variables son muy importantes en el diseño hidrológico, son propias para cada subcuenca y dependen de las características geomorfológicas y de la lluvia.

Otro rasgo muy importante que se puede observar en las Tablas 27 a 33 es que dependiendo de la posición de la tormenta hay subcuencas que van a recibir la precipitación y otras no, lo cual influye significativamente en los valores de caudales pico y/o volúmenes de escorrentía a la salida de la Cuenca Mayor.

Según el HEC – HMS (Fig. 39) las subcuencas que reciben precipitación son:

- Tormenta posición Noroeste: SC1, SC2, SC3 y SC5.
- Tormenta posición Noreste: SC5, SC6, SC7, SC8, SC10, SC12, SC13, SC14, SC15 y SC16.
- Tormenta posición Sureste: SC4, SC6, SC7, SC8, SC9, SC11, SC12, SC13 y SC14.
- Tormenta posición Suroeste: SC1, SC3, SC4 y SC6.

A partir de los resultados de caudales y volúmenes de escorrentía para cada subcuenca y en función de las variaciones de CN y posiciones de tormenta, se calculó el índice ROV y Tasas de cambio para cada una de ellas. Los valores utilizados para los cálculos son los presentados en las Tablas 27 a 33.

5.4.2.1 Índice ROV. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Subcuencas – Cuenca Mayor)

A continuación, en las Tablas 34 a 40, se presentan los resultados del índice ROV.

Tabla 34. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía. Subcuencas - Cuenca Mayor. CN aumento del 5% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN AUMENTO DEL 5% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volumen de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	5.38	0.00	5.60	0.00	6.99	0.00	7.25
SC2	0.00	3.49	0.00	0.00	0.00	4.55	0.00	0.00
SC3	0.00	4.47	0.00	4.47	0.00	4.96	0.00	4.96
SC4	0.00	0.00	5.24	4.43	0.00	0.00	5.66	4.76
SC5	5.68	5.86	0.00	0.00	6.13	6.32	0.00	0.00
SC6	6.26	0.00	5.10	5.25	6.47	0.00	5.19	5.30
SC7	4.46	0.00	4.12	7.23	4.96	0.00	4.76	8.31
SC8	3.98	0.00	3.63	7.44	4.75	0.00	4.27	8.93
SC9	0.00	0.00	3.36	0.00	0.00	0.00	4.32	0.00
SC10	4.90	0.00	0.00	0.00	5.54	0.00	0.00	0.00
SC11	8.48	0.00	4.08	0.00	9.53	0.00	4.41	0.00
SC12	4.33	0.00	7.01	0.00	4.59	0.00	7.61	0.00
SC13	4.00	0.00	4.07	0.00	4.27	0.00	4.32	0.00
SC14	4.39	0.00	4.76	0.00	4.76	0.00	5.13	0.00
SC15	4.48	0.00	0.00	0.00	4.59	0.00	0.00	0.00
SC16	5.43	0.00	0.00	0.00	6.03	0.00	0.00	0.00

Tabla 35. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía. Subcuencas - Cuenca Mayor. CN aumento del 10% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN AUMENTO DEL 10% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	5.76	0.00	6.00	0.00	7.76	0.00	8.08
SC2	0.00	3.58	0.00	0.00	0.00	4.87	0.00	0.00
SC3	0.00	4.29	0.00	4.29	0.00	4.84	0.00	4.84
SC4	0.00	0.00	5.04	4.22	0.00	0.00	5.60	4.62
SC5	6.13	6.33	0.00	0.00	6.73	6.95	0.00	0.00
SC6	6.20	0.00	4.98	5.12	6.49	0.00	5.09	5.21
SC7	4.30	0.00	4.05	7.23	4.84	0.00	4.62	8.57
SC8	4.14	0.00	3.80	8.14	5.10	0.00	4.55	10.24
SC9	0.00	0.00	3.48	0.00	0.00	0.00	4.61	0.00
SC10	5.15	0.00	0.00	0.00	6.05	0.00	0.00	0.00
SC11	9.35	0.00	4.21	0.00	10.91	0.00	4.70	0.00
SC12	4.53	0.00	7.63	0.00	4.90	0.00	8.49	0.00
SC13	4.13	0.00	4.16	0.00	4.55	0.00	4.60	0.00
SC14	4.27	0.00	4.62	0.00	4.62	0.00	5.03	0.00
SC15	4.32	0.00	0.00	0.00	4.44	0.00	0.00	0.00
SC16	5.43	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 36. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 5% respecto al base.

ÍNDICE ROV – CN REDUCCIÓN DEL 5% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	4.77	0.00	4.91	0.00	5.70	0.00	5.88
SC2	0.00	3.23	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00
SC3	0.00	4.10	0.00	4.10	0.00	4.33	0.00	4.33
SC4	0.00	0.00	4.60	3.97	0.00	0.00	4.81	4.17
SC5	4.94	5.08	0.00	0.00	5.13	5.27	0.00	0.00
SC6	5.40	0.00	4.46	4.58	5.42	0.00	4.51	4.60
SC7	3.97	0.00	3.82	5.96	4.32	0.00	4.17	6.62
SC8	3.75	0.00	3.43	6.05	4.13	0.00	3.78	6.91
SC9	0.00	0.00	3.11	0.00	0.00	0.00	3.80	0.00
SC10	4.31	0.00	0.00	0.00	4.70	0.00	0.00	0.00
SC11	6.96	0.00	3.75	0.00	7.30	0.00	3.90	0.00
SC12	3.93	0.00	5.76	0.00	4.04	0.00	6.12	0.00
SC13	3.66	0.00	3.64	0.00	3.78	0.00	3.81	0.00
SC14	4.02	0.00	4.34	0.00	4.17	0.00	4.44	0.00
SC15	4.04	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	0.00	0.00
SC16	4.69	0.00	0.00	0.00	5.10	0.00	0.00	0.00

Tabla 37. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 10% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN REDUCCIÓN DEL 10% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	4.46	0.00	4.59	0.00	5.15	0.00	5.29
SC2	0.00	3.11	0.00	0.00	0.00	3.75	0.00	0.00
SC3	0.00	3.66	0.00	3.66	0.00	3.85	0.00	3.85
SC4	0.00	0.00	4.09	3.56	0.00	0.00	4.26	3.71
SC5	4.35	4.45	0.00	0.00	4.50	4.61	0.00	0.00
SC6	4.72	0.00	3.98	4.04	4.77	0.00	4.00	4.08
SC7	3.55	0.00	3.44	5.32	9.32	0.00	3.71	5.72
SC8	3.52	0.00	3.23	5.58	3.85	0.00	3.56	6.07
SC9	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00	3.57	0.00
SC10	4.07	0.00	0.00	0.00	4.32	0.00	0.00	0.00
SC11	5.98	0.00	3.38	0.00	6.22	0.00	3.46	0.00
SC12	3.71	0.00	5.31	0.00	3.79	0.00	5.48	0.00
SC13	3.45	0.00	3.46	0.00	3.56	0.00	3.58	0.00
SC14	3.78	0.00	3.99	0.00	3.90	0.00	4.14	0.00
SC15	3.77	0.00	0.00	0.00	3.79	0.00	0.00	0.00
SC16	4.44	0.00	0.00	0.00	4.68	0.00	0.00	0.00

Tabla 38. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 15% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN REDUCCIÓN DEL 15% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	4.09	0.00	4.21	0.00	4.56	0.00	4.67
SC2	0.00	2.88	0.00	0.00	0.00	3.41	0.00	0.00
SC3	0.00	3.53	0.00	3.53	0.00	3.67	0.00	3.67
SC4	0.00	0.00	3.89	3.45	0.00	0.00	4.01	3.55
SC5	4.18	4.27	0.00	0.00	4.29	4.37	0.00	0.00
SC6	4.42	0.00	3.80	3.86	4.42	0.00	3.80	3.87
SC7	3.53	0.00	3.46	4.96	3.76	0.00	3.65	5.19
SC8	3.33	0.00	3.10	5.04	3.60	0.00	3.35	5.31
SC9	0.00	0.00	2.89	0.00	0.00	0.00	3.36	0.00
SC10	3.82	0.00	0.00	0.00	3.98	0.00	0.00	0.00
SC11	5.43	0.00	3.27	0.00	5.47	0.00	3.34	0.00
SC12	3.38	0.00	4.75	0.00	3.45	0.00	4.83	0.00
SC13	3.29	0.00	3.32	0.00	3.35	0.00	3.37	0.00
SC14	3.46	0.00	3.64	0.00	3.55	0.00	3.75	0.00
SC15	3.46	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00
SC16	4.03	0.00	0.00	0.00	4.20	0.00	0.00	0.00

Tabla 39. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 20% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN REDUCCIÓN DEL 20% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	3.87	0.00	3.97	0.00	4.14	0.00	4.21
SC2	0.00	2.82	0.00	0.00	0.00	3.23	0.00	0.00
SC3	0.00	3.29	0.00	3.29	0.00	3.40	0.00	3.40
SC4	0.00	0.00	3.59	3.23	0.00	0.00	3.67	3.29
SC5	3.80	3.89	0.00	0.00	3.86	3.93	0.00	0.00
SC6	4.02	0.00	3.51	3.56	4.00	0.00	3.51	3.56
SC7	3.22	0.00	3.13	4.47	3.38	0.00	3.29	4.51
SC8	3.16	0.00	2.97	4.53	3.35	0.00	3.15	4.61
SC9	0.00	0.00	2.78	0.00	0.00	0.00	3.15	0.00
SC10	3.55	0.00	0.00	0.00	3.66	0.00	0.00	0.00
SC11	4.73	0.00	3.12	0.00	4.73	0.00	3.17	0.00
SC12	3.22	0.00	4.29	0.00	3.26	0.00	4.32	0.00
SC13	3.11	0.00	3.14	0.00	3.15	0.00	3.17	0.00
SC14	3.23	0.00	3.39	0.00	3.29	0.00	3.46	0.00
SC15	3.27	0.00	0.00	0.00	3.27	0.00	0.00	0.00
SC16	3.70	0.00	0.00	0.00	3.83	0.00	0.00	0.00

Tabla 40. Índice ROV para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción del 30% respecto al base.

ÍNDICE ROV - CN REDUCCIÓN DEL 30% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudales pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	3.26	0.00	3.29	0.00	3.28	0.00	3.30
SC2	0.00	2.64	0.00	0.00	0.00	2.84	0.00	0.00
SC3	0.00	2.92	0.00	2.92	0.00	2.95	0.00	2.95
SC4	0.00	0.00	3.11	2.88	0.00	0.00	3.11	2.90
SC5	3.19	3.22	0.00	0.00	3.18	3.21	0.00	0.00
SC6	3.25	0.00	3.03	3.06	3.24	0.00	3.01	3.04
SC7	2.89	0.00	2.85	3.32	2.95	0.00	2.90	3.33
SC8	2.80	0.00	2.65	3.33	2.88	0.00	2.74	3.33
SC9	0.00	0.00	2.56	0.00	0.00	0.00	2.76	0.00
SC10	3.04	0.00	0.00	0.00	3.07	0.00	0.00	0.00
SC11	3.33	0.00	2.79	0.00	3.33	0.00	2.80	0.00
SC12	2.83	0.00	3.31	0.00	2.84	0.00	3.32	0.00
SC13	2.74	0.00	2.74	0.00	2.75	0.00	2.76	0.00
SC14	2.89	0.00	2.98	0.00	2.90	0.00	3.00	0.00
SC15	2.86	0.00	0.00	0.00	2.85	0.00	0.00	0.00
SC16	3.17	0.00	0.00	0.00	3.17	0.00	0.00	0.00

Como se mencionaba anteriormente, el índice ROV es un índice utilizado para evaluar la sensibilidad de un modelo y la interpretación de su resultado se basa en que a mayor valor del índice mayor es la influencia que tiene un parámetro de entrada en el resultado del modelo. De la misma manera, a menor valor del índice la influencia del parámetro de entrada en el resultado del modelo es menor. En este caso el parámetro de entrada es el Curva Numero (CN) y los resultados del modelo son los caudales y los volúmenes de escorrentía. Sus distintas variaciones a partir del caso base, en aumento o reducción, provocan los distintos resultados a la salida de la Cuenca Mayor.

Si se analizan detalladamente los resultados del índice para las distintas variaciones, se puede observar que la influencia que tiene el parámetro de entrada (CN) en las subcuencas no siempre es igual o constante, varía ante aumentos o reducciones.

Por ejemplo, en la Tabla 34 cuando se realiza un aumento del CN del 5% a partir del caso base, se puede observar que cuando la tormenta se ubica en el sector Noreste, el mayor valor del índice lo tiene la SC11 (8,48) y el menor valor la SC8 (3,98). Luego, cuando se realiza un aumento del 10% (Tabla 35), en la misma posición de tormenta (Noreste), el mayor valor del índice también lo presenta la SC11 (9,35), pero esta vez el menor valor del índice lo presenta otra subcuenca, la SC13 (4,13) y no la SC8 como en el caso anterior. Por lo tanto, se interpreta que a medida que aumentamos el CN, la menor influencia del parámetro de entrada en el resultado del modelo cambia de una subcuenca a la otra aun para la misma posición de tormenta. Esto se debe a que las subcuencas presentan distintas

características (de forma, relieve, red de drenaje) y no responden de la misma manera antes los aumentos del Número de Curva.

En la Tabla 36, cuando se realiza una reducción del 5% del CN respecto al base, se puede observar que cuando la tormenta está ubicada en posición Noroeste, el mayor valor del índice lo presenta la SC5 (5,08) y el menor valor del índice la SC2 (3,23). Luego, si se realiza una reducción del 10% del CN y en la misma posición de tormenta, esta vez el mayor valor del índice lo presenta la SC1 (4,46) y el menor valor del índice lo sigue presentando la SC2 (3,11). De la misma manera que el ejemplo anterior, se puede observar cómo cambia la subcuenca que sufre la mayor variación en el resultado ante la variación del parámetro de entrada. Cuando se reduce el CN un 5% la mayor influencia que tiene el parámetro de entrada en el resultado del modelo lo presenta la SC5, pero cuando se reduce el CN un 10% la mayor influencia que tiene el parámetro de entrada en el resultado del modelo lo presenta la SC1.

En general se concluye que, para una misma posición de tormenta, si se varía el CN determinado porcentaje respecto al caso base, la influencia que tiene el parámetro de entrada en el resultado del modelo puede ser mayor en una subcuenca, pero si se varía nuevamente el CN, la influencia que tiene el parámetro de entrada en el resultado del modelo puede ser mayor en otra subcuenca (puede cambiar).

5.4.2.2 T. de Cambio. Caud. Pico y Vol. de Escorrentía (Subcuencas-Cuenca Mayor)

A continuación, en las Tablas 41 – 47 se presentan los resultados de las tasas de cambio para cada una de las subcuencas en función de las variaciones de CN y distintas posiciones de tormenta.

Tabla 41. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor: CN aumento 5% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN AUMENTO DEL 5% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	1.27	0.00	1.28	0.00	1.35	0.00	1.36
SC2	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00
SC3	0.00	1.22	0.00	1.22	0.00	1.25	0.00	1.25
SC4	0.00	0.00	1.26	1.22	0.00	0.00	1.28	1.24
SC5	1.28	1.29	0.00	0.00	1.31	1.32	0.00	0.00
SC6	1.31	0.00	1.25	1.26	1.32	0.00	1.26	1.27
SC7	1.22	0.00	1.21	1.36	1.25	0.00	1.24	1.42
SC8	1.20	0.00	1.18	1.37	1.24	0.00	1.21	1.45
SC9	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	1.22	0.00
SC10	1.25	0.00	0.00	0.00	1.28	0.00	0.00	0.00
SC11	1.42	0.00	1.20	0.00	1.48	0.00	1.22	0.00
SC12	1.22	0.00	1.35	0.00	1.23	0.00	1.38	0.00
SC13	1.20	0.00	1.20	0.00	1.21	0.00	1.22	0.00
SC14	1.22	0.00	1.24	0.00	1.24	0.00	1.26	0.00
SC15	1.22	0.00	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
SC16	1.27	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00

Tabla 42. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN aumento 10% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN AUMENTO DEL 10% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	1.58	0.00	1.60	0.00	1.78	0.00	1.81
SC2	0.00	1.36	0.00	0.00	0.00	1.49	0.00	0.00
SC3	0.00	1.43	0.00	1.43	0.00	1.48	0.00	1.48
SC4	0.00	0.00	1.50	1.42	0.00	0.00	1.56	1.46
SC5	1.61	1.63	0.00	0.00	1.67	1.70	0.00	0.00
SC6	1.62	0.00	1.50	1.51	1.65	0.00	1.51	1.52
SC7	1.43	0.00	1.40	1.72	1.48	0.00	1.46	1.86
SC8	1.41	0.00	1.38	1.81	1.51	0.00	1.45	2.02
SC9	0.00	0.00	1.35	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00
SC10	1.51	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00
SC11	1.93	0.00	1.42	0.00	2.09	0.00	1.47	0.00
SC12	1.45	0.00	1.76	0.00	1.49	0.00	1.85	0.00
SC13	1.41	0.00	1.42	0.00	1.45	0.00	1.46	0.00
SC14	1.43	0.00	1.46	0.00	1.46	0.00	1.50	0.00
SC15	1.43	0.00	0.00	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00
SC16	1.54	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00

Tabla 43. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 5% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN REDUCCION DEL 5% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	0.76	0.00	0.75	0.00	0.71	0.00	0.71
SC2	0.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00
SC3	0.00	0.79	0.00	0.79	0.00	0.78	0.00	0.78
SC4	0.00	0.00	0.77	0.80	0.00	0.00	0.76	0.79
SC5	0.75	0.75	0.00	0.00	0.74	0.74	0.00	0.00
SC6	0.73	0.00	0.78	0.77	0.73	0.00	0.77	0.77
SC7	0.80	0.00	0.81	0.70	0.78	0.00	0.79	0.67
SC8	0.81	0.00	0.83	0.70	0.79	0.00	0.81	0.65
SC9	0.00	0.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00
SC10	0.78	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00
SC11	0.65	0.00	0.81	0.00	0.64	0.00	0.80	0.00
SC12	0.80	0.00	0.71	0.00	0.80	0.00	0.69	0.00
SC13	0.82	0.00	0.82	0.00	0.81	0.00	0.81	0.00
SC14	0.80	0.00	0.78	0.00	0.79	0.00	0.78	0.00
SC15	0.80	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00
SC16	0.77	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00

Tabla 44. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 10% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN REDUCCION DEL 10% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	0.55	0.00	0.54	0.00	0.48	0.00	0.47
SC2	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
SC3	0.00	0.63	0.00	0.63	0.00	0.62	0.00	0.62
SC4	0.00	0.00	0.59	0.64	0.00	0.00	0.57	0.63
SC5	0.56	0.55	0.00	0.00	0.55	0.54	0.00	0.00
SC6	0.53	0.00	0.60	0.60	0.52	0.00	0.60	0.59
SC7	0.64	0.00	0.66	0.47	0.07	0.00	0.63	0.43
SC8	0.65	0.00	0.68	0.44	0.61	0.00	0.64	0.39
SC9	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00
SC10	0.59	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00
SC11	0.40	0.00	0.66	0.00	0.38	0.00	0.65	0.00
SC12	0.63	0.00	0.47	0.00	0.62	0.00	0.45	0.00
SC13	0.66	0.00	0.65	0.00	0.64	0.00	0.64	0.00
SC14	0.62	0.00	0.60	0.00	0.61	0.00	0.59	0.00
SC15	0.62	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00
SC16	0.56	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00

Tabla 45. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor. CN reducción 15% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN REDUCCION DEL 15% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	0.39	0.00	0.37	0.00	0.32	0.00	0.30
SC2	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00
SC3	0.00	0.47	0.00	0.47	0.00	0.45	0.00	0.45
SC4	0.00	0.00	0.42	0.48	0.00	0.00	0.40	0.47
SC5	0.37	0.36	0.00	0.00	0.36	0.34	0.00	0.00
SC6	0.34	0.00	0.43	0.42	0.34	0.00	0.43	0.42
SC7	0.47	0.00	0.48	0.26	0.44	0.00	0.45	0.22
SC8	0.50	0.00	0.53	0.24	0.46	0.00	0.50	0.20
SC9	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
SC10	0.43	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00
SC11	0.18	0.00	0.51	0.00	0.18	0.00	0.50	0.00
SC12	0.49	0.00	0.29	0.00	0.48	0.00	0.28	0.00
SC13	0.51	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.49	0.00
SC14	0.48	0.00	0.45	0.00	0.47	0.00	0.44	0.00
SC15	0.48	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00
SC16	0.40	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00

Tabla 46. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor: CN reducción del 20% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN REDUCCION DEL 20% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	0.23	0.00	0.21	0.00	0.17	0.00	0.16
SC2	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00
SC3	0.00	0.34	0.00	0.34	0.00	0.32	0.00	0.32
SC4	0.00	0.00	0.28	0.35	0.00	0.00	0.27	0.34
SC5	0.24	0.22	0.00	0.00	0.23	0.21	0.00	0.00
SC6	0.20	0.00	0.30	0.29	0.20	0.00	0.30	0.29
SC7	0.36	0.00	0.37	0.11	0.32	0.00	0.34	0.10
SC8	0.37	0.00	0.41	0.09	0.33	0.00	0.37	0.08
SC9	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00
SC10	0.29	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00
SC11	0.05	0.00	0.38	0.00	0.05	0.00	0.37	0.00
SC12	0.36	0.00	0.14	0.00	0.35	0.00	0.14	0.00
SC13	0.38	0.00	0.37	0.00	0.37	0.00	0.37	0.00
SC14	0.35	0.00	0.32	0.00	0.34	0.00	0.31	0.00
SC15	0.35	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00
SC16	0.26	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00

Tabla 47. Tasas de cambio para caudales pico y volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas de la Cuenca Mayor: CN reducción 30% respecto al base.

TASA DE CAMBIO - CN REDUCCION DEL 30% (SUBCUENCAS)

Subcuenca	Caudal pico				Volúmenes de escorrentía			
	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)	Run 1 (NE)	Run 2 (NW)	Run 3 (SE)	Run 4 (SW)
SC1	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01
SC2	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
SC3	0.00	0.12	0.00	0.12	0.00	0.12	0.00	0.12
SC4	0.00	0.00	0.07	0.14	0.00	0.00	0.07	0.13
SC5	0.04	0.04	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00
SC6	0.02	0.00	0.09	0.08	0.03	0.00	0.10	0.09
SC7	0.13	0.00	0.15	0.00	0.11	0.00	0.13	0.00
SC8	0.16	0.00	0.20	0.00	0.14	0.00	0.18	0.00
SC9	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
SC10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
SC11	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00
SC12	0.15	0.00	0.01	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00
SC13	0.18	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.17	0.00
SC14	0.13	0.00	0.10	0.00	0.13	0.00	0.10	0.00
SC15	0.14	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00
SC16	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00

Cuando se analizan las tasas de cambio para los caudales o volúmenes de escorrentía, se considera la magnitud del cambio de la variable con respecto a otra que esté relacionada. En este caso cuanto varían los caudales pico o volúmenes de escorrentía con respecto a los valores del caso base.

Si se analizan detalladamente los resultados de las Tasas de Cambio para las distintas variaciones, se puede observar que los cambios más significativos (tasas de cambio más altas) no ocurren en las mismas subcuencas para los aumentos y reducciones del CN aun para la misma posición de la tormenta.

Por ejemplo, en las Tablas 41 y 42 para aumentos del CN del 5 y 10% respecto al caso base, los cambios más significativos de caudales pico y/o volúmenes de escorrentía lo asumen la SC11 (Noreste), SC5 (Noroeste), SC12 (Sureste) y SC8 (Suroeste). En cambio, si se realizan reducciones del CN del 5, 10, 15, 20 y 30% respecto al caso base, los cambios más significativos de caudales pico y/o volúmenes de escorrentía lo asumen la SC13 (Noreste), SC2 (Noroeste), SC9 (Sureste) y SC4 (Suroeste).

Estas diferencias reflejan como afectan las respectivas variaciones del CN en las subcuencas y en los resultados de los caudales pico y/o volúmenes de escorrentía. Además, del control que ejerce la geomorfología de las mismas en la variación de las magnitudes.

Mediante el análisis de los gráficos y de los índices, pudo establecerse que el comportamiento hidrológico de las subcuencas (tiempo y magnitud de avenida) está ligado a parámetros como la pendiente de los cauces, forma y pendiente de las subcuencas y, sobre todo, al CN. Las subcuencas provenientes de zonas topográficas de mayor altura tienen una respuesta hidrológica muy diferente a las subcuencas provenientes de sectores topográficos medios a bajos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante este Trabajo Final de Licenciatura se logró determinar la sensibilidad de los caudales de diseño ante la variación de los parámetros de escorrentía (CN) en un total de dieciséis subcuencas aluviales que afectan a los Yacimientos Puesto Hernández y Chihuido de la Sierra Negra.

A través del Sistema de Información Geográfica (ArgGis) y un Modelo de elevación Digital del Terreno (DEM/MDE) con resolución espacial de 30 m y extraído del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se lograron delimitar las cuencas del área de estudio y determinar sus parámetros morfométricos, de forma e hidrológicos necesarios para la caracterización de las mismas. Como objeto de estudio y dentro de las cuencas delimitadas, se decidió trabajar solamente con la Cuenca Mayor para la modelación hidrológica y el análisis de sensibilidad de los caudales de diseño en base a sus particularidades socio – ambientales.

Confeccionado el mapa de Curva Número del área de estudio y realizada la modelación hidrológica en el *software* HEC – HMS, se procedió a realizar las respectivas variaciones del CN para efectuar el análisis de sensibilidad de los caudales de diseño.

A partir de los resultados obtenidos en el caso base, se pudo determinar que cuando el núcleo de la tormenta de diseño está ubicado en el sector Sureste (SE) de la Cuenca Mayor se genera la situación más desfavorable. Es decir, los caudales y volúmenes de escorrentía generados son los más altos comparado a que si la tormenta estuviera ubicada en otros sectores de la cuenca. Los valores obtenidos para el caso base y a la salida de la Cuenca Mayor son de 206, 3 (m³/s) para caudal y 8,51 (mm) para volumen de escorrentía.

Para analizar la influencia que tiene el CN en los resultados de los caudales, se procedió a realizar cálculos del índice ROV para todas las variaciones de CN y distintas posiciones de la tormenta de diseño. Se entiende por parámetro de entrada al CN y a los resultados del modelo a los caudales pico y volúmenes de escorrentía.

A partir de estos cálculos, se pudo determinar que la influencia que tiene el parámetro de entrada en los resultados del modelo es mayor en el sector Suroeste de la Cuenca Mayor que en los otros sectores, incluso para la misma variación de CN. Esto se debe a las distintas características que presentan las subcuencas de este sector (parámetros relativos a la forma, relieve y relativos a la red de drenaje).

Las subcuencas provenientes de zonas topográficas de mayor altura tienen una respuesta hidrológica muy diferente a las subcuencas provenientes de sectores topográficos medios a bajos. Además, se pudo determinar que el comportamiento hidrológico de las subcuencas (tiempo y magnitud de avenida) está ligado a parámetros como la pendiente de los cauces, forma y pendiente y, sobre todo, al CN.

Para analizar cuanto varían los caudales pico y volúmenes de escorrentía con respecto al caso base se procedió a realizar cálculos de tasas de cambio.

Según los resultados obtenidos se pudo determinar que existe un comportamiento diferente en la cuenca. Cuando se varía el CN en aumento a partir del caso base, las mayores variaciones de caudales y volúmenes de escorrentía se concentran en el sector

SW de la cuenca, es decir, las mayores tasas de cambio. En cambio, cuando se realizan las variaciones de reducción del CN las mayores variaciones se concentran en el sector SE. Los resultados indican como la cuenca no responde de la misma manera ante aumentos y reducciones del CN y como la morfología de las subcuencas está vinculada a la variación de los caudales y los volúmenes de escorrentía.

El análisis de sensibilidad en este estudio ayudó a identificar los parámetros que requieren una mayor precisión en su determinación y que requieren más (o menos) atención a la hora de parametrizar, tal como menciona Dubus *et al.* (2003) en su trabajo.

Además, el análisis de sensibilidad se utilizó para interpretar tres situaciones: el caso base que es la situación actual y son los caudales producidos por el CN original, la situación más desfavorable que serían los caudales más elevados luego de variar el CN en aumento y, por último, la mejor situación que serían los menores caudales luego de reducir el CN.

Por lo tanto y en función del análisis del comportamiento de la cuenca, se recomienda realizar estudios aluvionales sobre las subcuencas que provocan los caudales más elevados con el fin de atenuar aguas abajo su magnitud y potencial erosivo ante los eventos extremos. Además, se resguardarían la integridad de los ductos que cruzan los cauces o instalaciones. Como se pudo observar en el apartado 5.3 de resultados y en la Tabla 13, las subcuencas que provocan los caudales más elevados son la SC12 y SC15 para la tormenta ubicada en el sector Noreste, SC2 para el sector Noroeste, SC9 para el sector Sureste y SC1 para el sector Suroeste.

Se pudo determinar el aumento exponencial que tienen los caudales a medida que aumenta el CN, por lo tanto, para disminuir los caudales generados se recomienda igualmente realizar estudios de revegetación en la cuenca para mejorar su condición hidrológica y reducir los valores de CN. Las operadoras deben implementar una medida de compensación que consiste en la rehabilitación de sitios propios ya impactados a través de técnicas de revegetación asistida con especies nativas ya que en la etapa de construcción las operadoras generan un alto impacto en lo relacionado al movimiento de suelo y desbroce de la vegetación. En la provincia del Neuquén la subsecretaría de medio ambiente a través de la disposición 226/11 establece que las operadoras serán obligadas a realizar tareas de recuperación para que al cabo de dos años cada hectárea afectada contenga de manera saludable por lo menos 1600 plantas de especies nativas.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos en este estudio como los caudales y volúmenes de escorrentía se obtienen del uso del programa HEC – HMS a su vez condicionado por los valores de CN. Estos valores son estimaciones y se obtienen mediante un procedimiento en un SIG y utilizando álgebra de mapas. Por lo tanto, como el CN genera mucha incertidumbre y para trabajos futuros, se recomienda ajustar sus valores junto a estudios de base, relevamientos de campo, estudios de suelo y ensayos de infiltración.

7 BIBLOGRAFÍA

- Aparicio Mijares, F.J., 1992. Fundamentos de la hidrología de superficie. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México.
- Bertani, L.A., Peña, O.R., 2015. Degradación de tierras y teledetección en planicies próximas a la localidad de Centenario, provincia de Neuquén. Boletín Geográfico, [S.l.], n. 37, p. 13-28, dic. 2015. ISSN 2313-903X. Disponible en: <http://revele.uncoma.edu.ar/htdoc/revele/index.php/geografia/article/view/1076>.
- Bonilla, J.F., 2018. Avances en el estudio de tormentas convectivas. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina.
- Brieva, C. 2018. Caracterización y Análisis multidisciplinario de la información hidrológica en cuencas. Programa Nacional Agua, 161 p.
- Burgos, V. H., 2008. “Estimación de la distribución espacial del Número de Curva en cuencas piedemontanas del Gran Mendoza aplicando técnicas SIG ” Workshop internacional de aplicaciones de SIG en Hidrología. Univ. Nacional del Litoral, Facultad de Ciencias Hídricas, Santa Fe., 15pp.
- Burgos, V. H. y Salcedo, A.P., 2016. Avance en el conocimiento de la respuesta hidrológica y sedimentológica de la Cuenca del Arroyo seco Casa de Piedra, Las Heras, Mendoza. 3er ENCUENTRO DE INVESTIGADORES en Formación en Recursos Hídricos (IFRH 2016). Buenos Aires, Argentina.
- Burgos, V. H., Martínez, L., Salcedo, A.P., 2018. Actualización del mapa de CN (número de curva) del Gran Mendoza. 4to ENCUENTRO DE INVESTIGADORES en Formación en Recursos Hídricos (IFRH 2018). Buenos Aires, Argentina.
- Cáceres Jilberto, D, I., 2021. Análisis de sensibilidad hidrológica en cuencas de la macrozona sur y parte de la macrozona austral frente a cambios hipotéticos en la cobertura de suelo. Universidad de Chile.
- Capua, O. y Mare, M., 2012. Problemas ambientales derivados de los condicionantes naturales y los usos del suelo en el sector norte del departamento de Aluminé – Neuquén. IX Jornadas Nacionales de Geografía Física. Bahía Blanca, 19 al 21 de abril de 2012 35 - 49 pp. ISBN 978-987-1648-32-0.
- Cazau, L.B. & M.A. Uliana. 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. *Vº Congreso Geológico Argentino*. Actas 3: 131-163.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1994. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill: 595 pp.
- Chuvieco, E., 2002. Teledetección Ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. España: Barcelona, Ariel. 534 pp.
- COIRCO. <https://www.coirco.gov.ar/>
- Dubus, I.G., Brown, C.D y Beulke, S., 2003. Sensitivity analyses for four pesticide leaching models. *Pest Management Science* 59: 962-982. DOI: 10.1002/ps.723.
- Dufilho, A.C., Horne, F., Navedo, R. y Polla, G., 2001. Diseño de obras de control de aluviones basada en simulación de procesos hidrológicos torrenciales en cuencas de la Patagonia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* – 5 (2): 198-203 pp.

- Dufilho, A. C.; Toth, A.; Valle, D., 2002. Elaboración de Bases para el Ordenamiento territorial Ambiental de la Provincia del Neuquén. Sistema de Información Geográfico (SIG-OTA). CFI, 3 Vol, 23 planos, base de datos en ArcView.
- Dufilho, A.C., Frugoni, M.C., Macchi, P. y Toth, A., 2011. Estimación de erosión hídrica de suelos para plan de manejo del Campo Forestal Aguas Frías, Patagonia Argentina. Boletín geográfico XXXII N°33. Universidad Nacional del Comahue, Departamento Geografía: 69-85 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2015. Aspectos Físicos: Suelo, Clima y Agua Provincia del Neuquén. Disponible en <http://www.fao.org/home/en>
- Fattorelli, S. y Fernández, P.C., 2011. Diseño Hidrológico. Edición digital, Water Assessment and Advisory Global Network (WASA-GN).
- Ferrer J. A., Irisarri J. A. y Mendia J. M., 1990. Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Secretaría de Estado del COPADE, CFI, (v1 - ii y iii), (viiiit1). Bs. As.
- Ferrer, M., Rodríguez, J., & Estrela, T., 1995. “Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica”. Ingeniería del agua, 1995, vol. 2, núm. 4.
- Ferrer, J.A., Irisarri, J.A. y Mendia, J.M., 2006. Suelos de la Provincia del Neuquén. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Consejo Federal de Inversiones (INTA-CFI).
- Fernández, P., Segerer, C.D., Fernández, J.M., Segerer, E.C., Delgado, S.C. y Buk, E.M., 1980. Estudio hidrológico de cuencas aluvionales en la Provincia del Neuquén y curvas generalizadas para el cálculo hidráulico de estructuras viales. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas – Centro Regional Andino: 55 pp.
- Garrido, A. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.
- Garrido, A., Kramarz, A., Forasiepi, A., Bond, M., 2012. Estratigrafía, mamíferos fósiles y edad de las secuencias volcanosedimentarias eoceno-miocenas de la sierra de Huantraico-sierra Negra y cerro Villegas (provincia del Neuquén, Argentina). Andean Geology, vol. 39, núm. 3, septiembre, 2012, pp. 482-510. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.
- Garrido, A. 2014. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista Del Museo Argentino De Ciencias Naturales Nueva Serie, 12(2), 121-177.
- Gaspari, F.J., Rodríguez Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I. y Besteiro, S.I., 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Curso de manejo de cuencas hidrográficas, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

- González Díaz E.F. y Ferrer, J.A. 1986. Geomorfología de la Provincia del Neuquén. Consejo Federal de Inversiones, con mapa geomorfológico escala 1:500.000, 111p., Buenos Aires.
- Holmberg, E. 1962. Descripción Geológica de la Hoja 32d-Chachahuen. Prov. del Neuquén- Prov. de Mendoza. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1: 200.000. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 91, 72 p., Buenos Aires
- Irisarri, J., 2006. Suelos de la provincia del Neuquén. Escala 1:500.000. INTA-CFI-UN del Comahue, 224 pp. Buenos Aires
- Ivanova, Y. y Corredor, J., 2006. Evaluación de la sensibilidad de los caudales máximos de diseño ante la influencia del cambio climático. Avances en recursos hidráulicos. Número 13, mayo de 2006. Medellín. ISSN 0121 – 5701.
- Martínez de Azagra, A. y Navarro Hevia, J., 1996. Hidrología Forestal: El ciclo hidrológico. Secretaria de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid. Manuales y textos universitarios: Ciencias 18.
- Marizza, M.S., Rapacioli, R. y Vives, L., 2010. La problemática aluvional en el Alto Valle del Río Negro, Argentina. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México 1 (1): 21-34 pp.
- Movia, C., Ower, G, Perez, C. 2007. Estudio de la Vegetación Natural de la Provincia del Neuquén. Tomo, II y III. Min.de Economía y Hacienda Prov. De Neuquén.
- Ordoñez Gálvez, J. 2011. Cartilla Técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica? – Sociedad Geográfica de Lima, Perú.
- Pereyra, F.X., Irisarri, J.A. y Ferrer, J.A., 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 871-880 pp. Neuquén.
- Pereyra, F.X., Rivas, I., Lamarca, L. y Tobío, M.I., 2013. Estudio Geocientífico aplicado al Ordenamiento Territorial de Rincon de Los Sauces. Provincia del Neuquén. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. Instituto de Geología y Recursos Minerales (SEGEMAR).
- Perilli, L.E., 2006. Plan de Ordenamiento Territorial y Ambiental en las localidades de Añelo, San Patricio del Chañar y Sauzal Bonito. Consejo Federal de inversiones. Provincia del Neuquén.
- Rabassa, J., 1977. Cuencas aluvionales de la Provincia del Neuquén, mapa de valores. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas – Centro Regional Andino: 77 pp.
- Ramos, V., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos, R. (Ed.), Geología Argentina. Anales 29 (3): 41-96. Buenos Aires.
- Saad, A. y Marizza, M., 2007. Sistemas de Información Geográfica para la evaluación de la erosión hídrica en el yacimiento Aguada Baguales (Neuquén). TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional (Ed. Martin): 193-197 pp.
- Sánchez San Román, F.J., 2011. Hidrología – Hidrogeología. Universidad de Salamanca, Departamento de Geología. Disponible en <http://web.usal.es/javisan/hidro>

- Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, disponible en U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- USACE. 2018. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, version 4.3, User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers Civils Hydrologic Engineering Center. Davis. California. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

8 ANEXOS

8.1 Hidrogramas de Salida – Cuenca Mayor (Variaciones del CN base)

- *Aumento del 5% del CN base*

Tabla 48. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN aumento del 5%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN AUMENTO 5% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	237,3	10,20
Run 2 (NW)	658,9	235,3	9,65
Run 3 (SE)	658,9	249,7	10,57
Run 4 (SW)	658,9	171,3	7,34

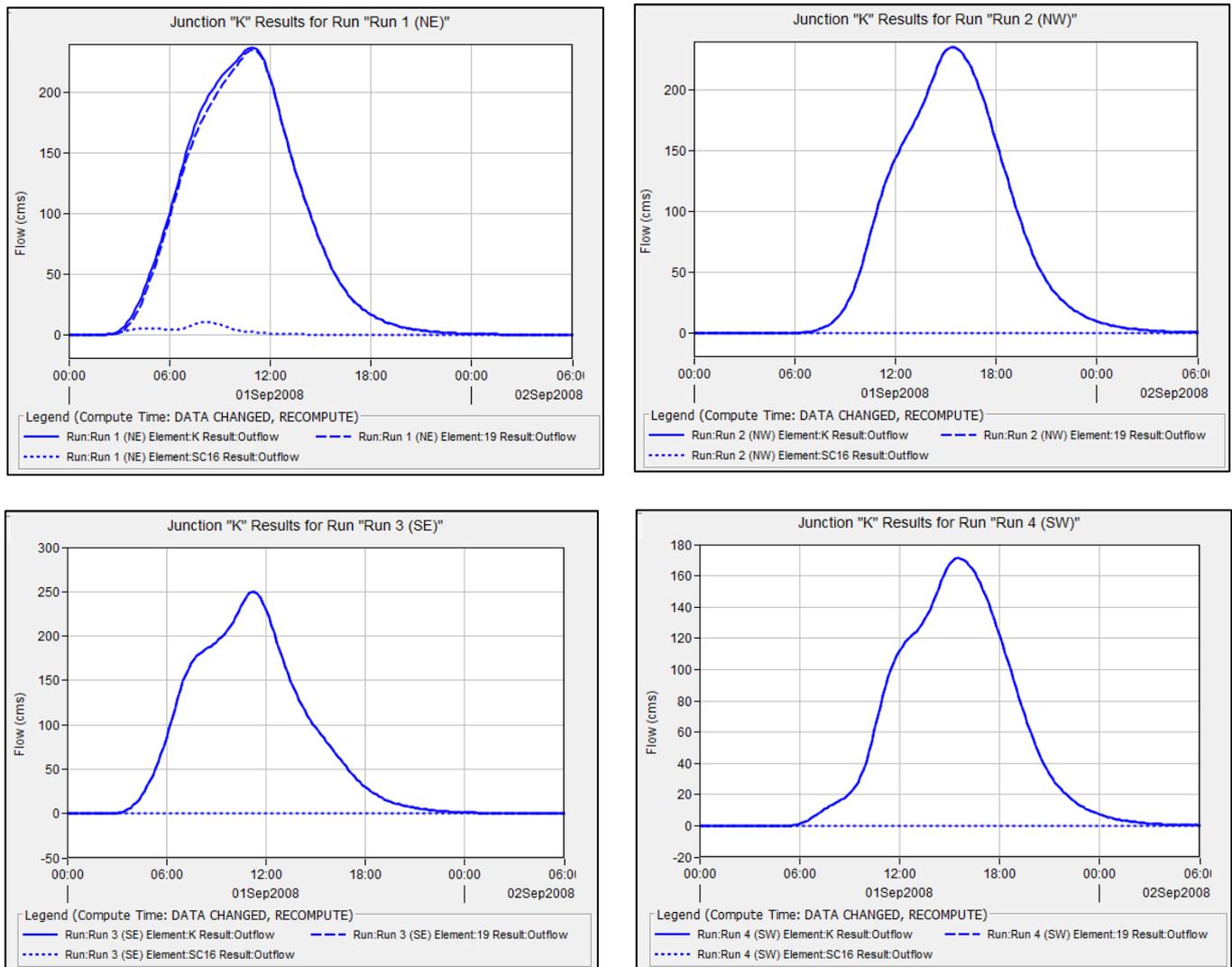


Figura 45. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN aumento del 5%.

- **Aumento del 10% del CN base**

Tabla 49. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN aumento del 10%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN AUMENTO 10% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km ²)	Caudal pico (m ³ /s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	283,9	12,49
Run 2 (NW)	658,9	285,7	12,08
Run 3 (SE)	658,9	295,1	12,82
Run 4 (SW)	658,9	209,5	9,22

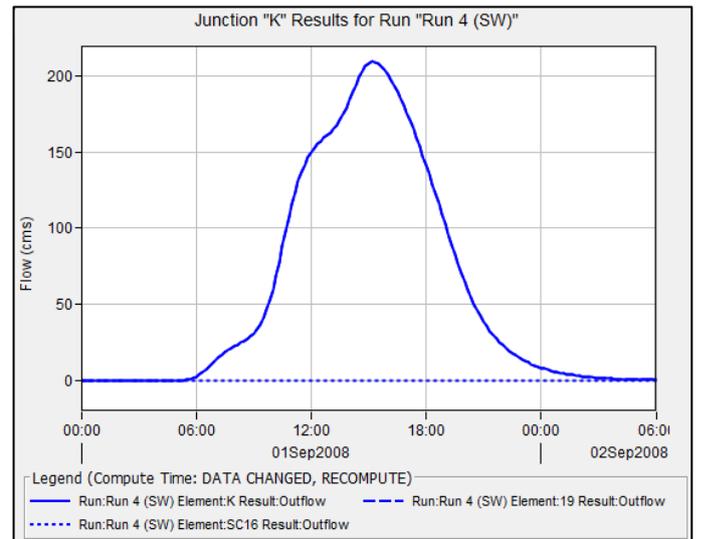
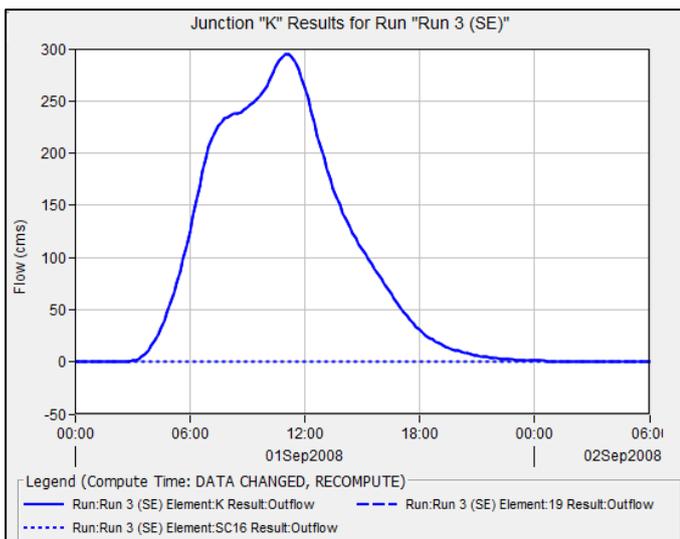
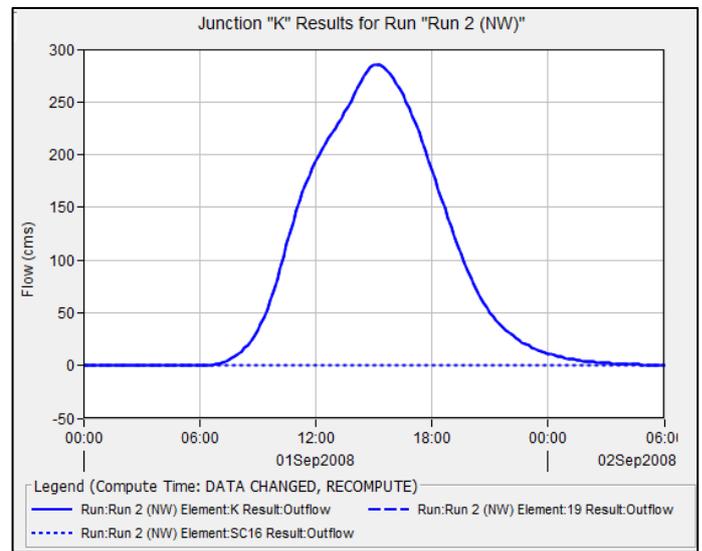
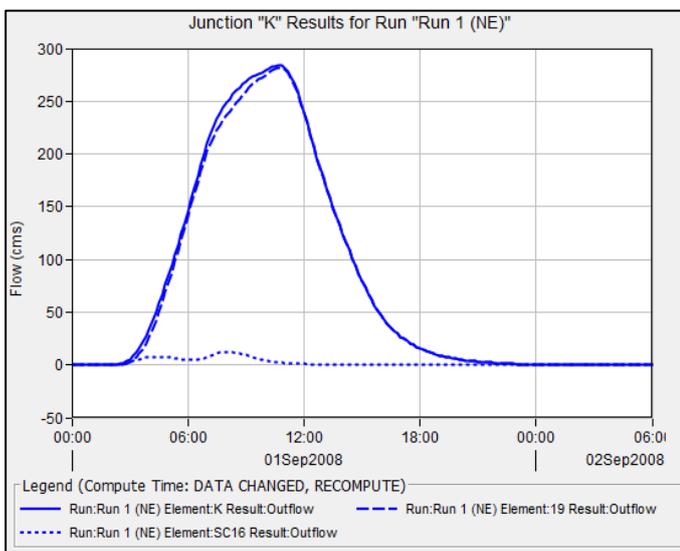


Figura 46. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN aumento del 10%.

- **Reducción del 5% del CN base**

Tabla 50. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 5%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCION 5% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	153,4	6,30
Run 2 (NW)	658,9	152,3	5,74
Run 3 (SE)	658,9	167,3	6,72
Run 4 (SW)	658,9	107,7	4,19

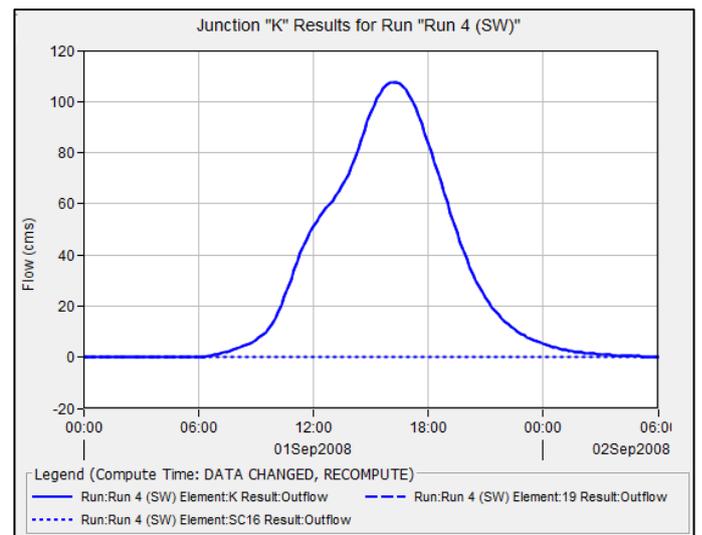
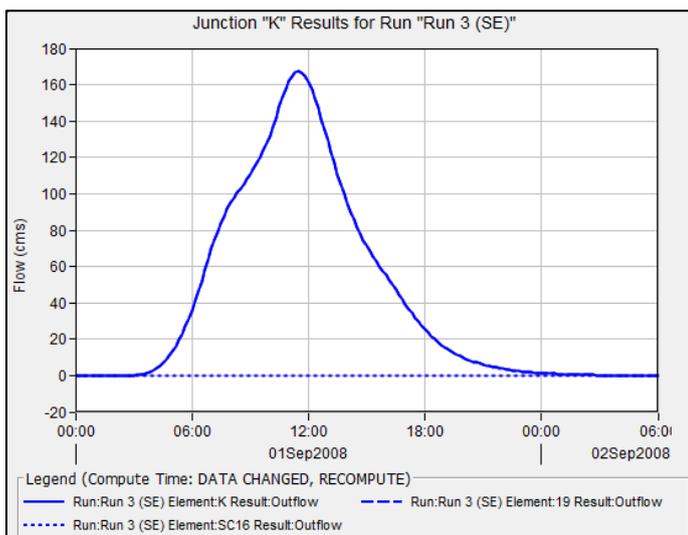
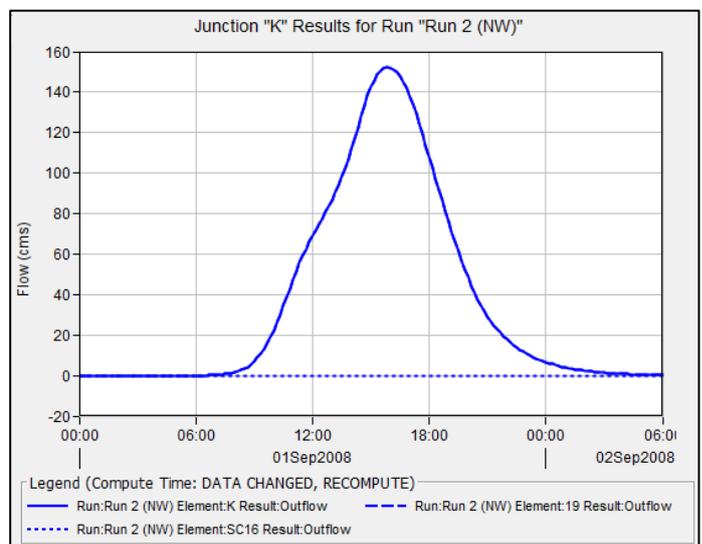
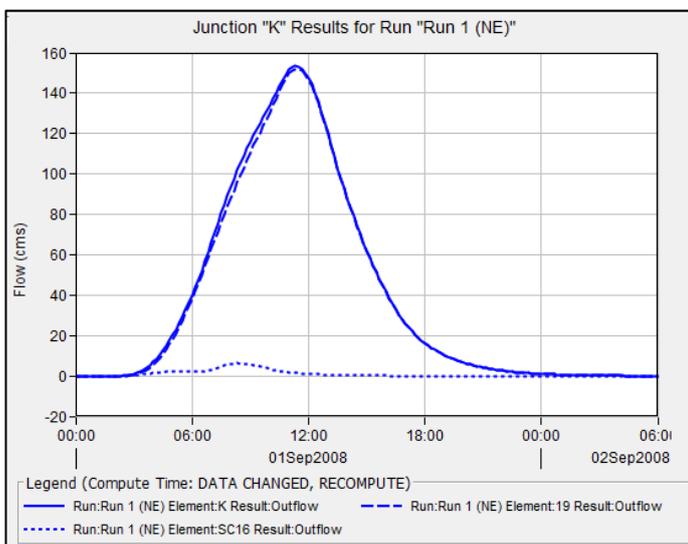


Figura 47. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 5%.

- **Reducción del 10% del CN base**

Tabla 51. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 10%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCION 10% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	119,1	4,79
Run 2 (NW)	658,9	119,6	4,27
Run 3 (SE)	658,9	133,6	5,24
Run 4 (SW)	658,9	84,1	3,06

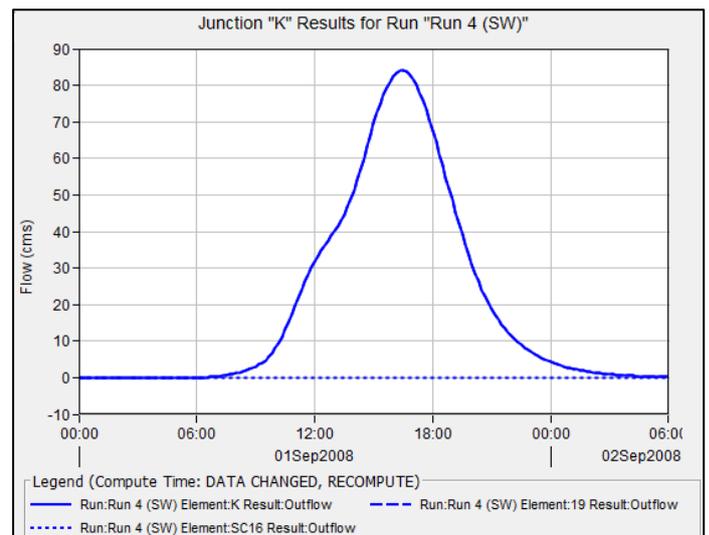
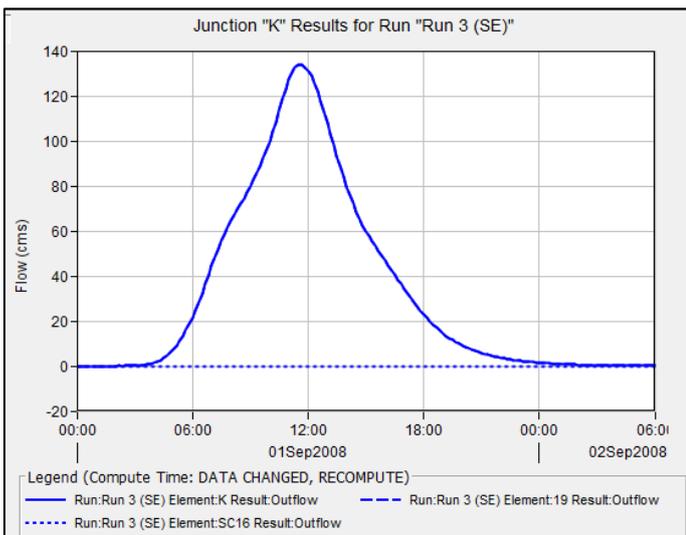
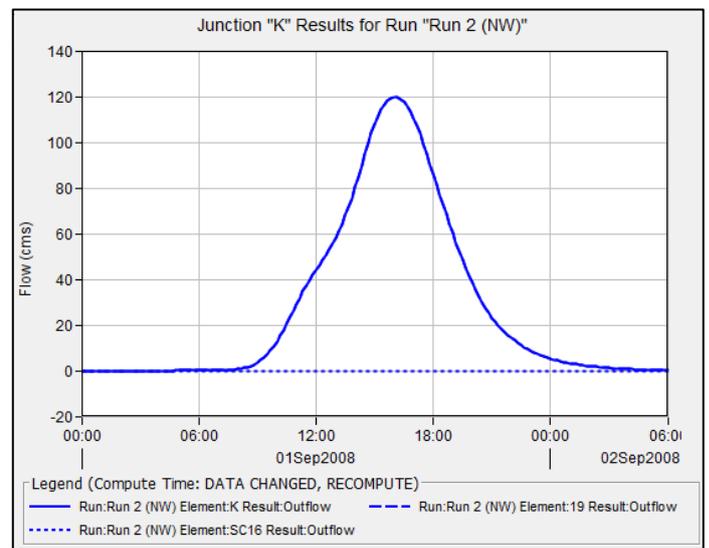
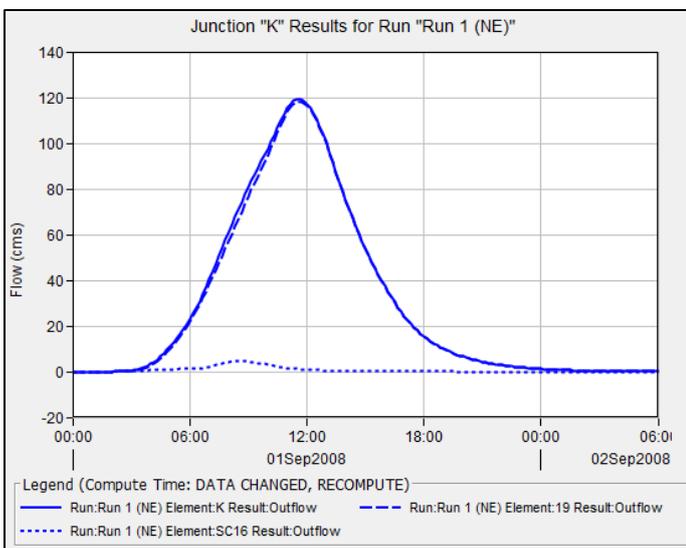


Figura 48. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 5%.

- **Reducción del 15% del CN base**

Tabla 52. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 15%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCION 15% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormentas	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	89,6	3,53
Run 2 (NW)	658,9	91,2	3,08
Run 3 (SE)	658,9	102,9	3,91
Run 4 (SW)	658,9	62,1	2,10

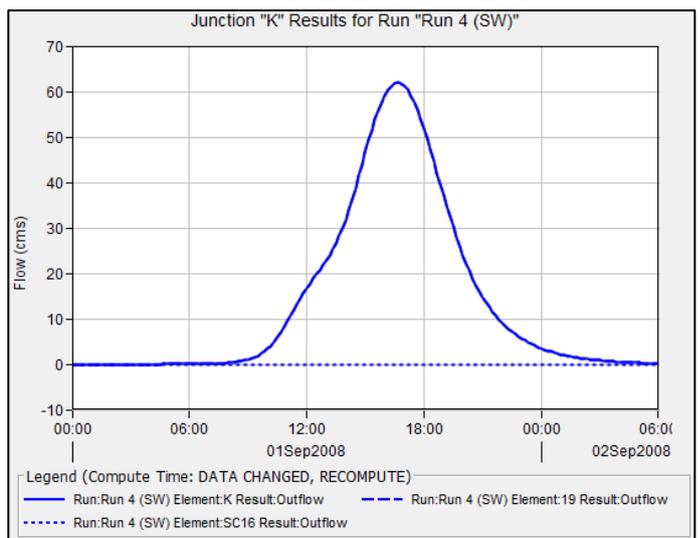
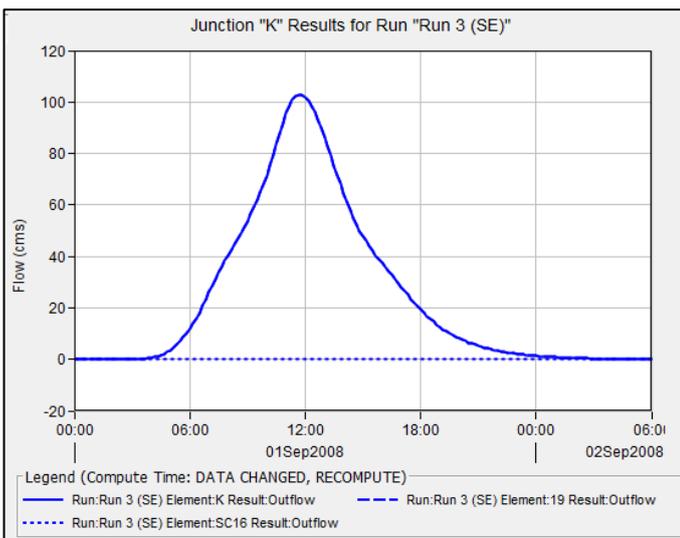
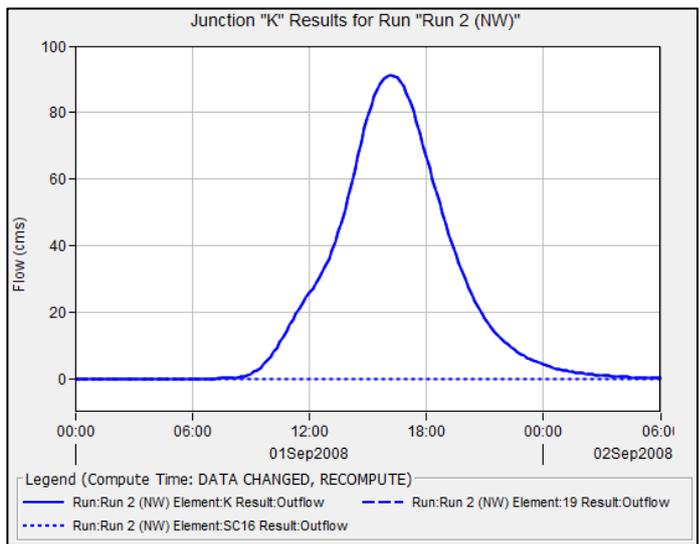
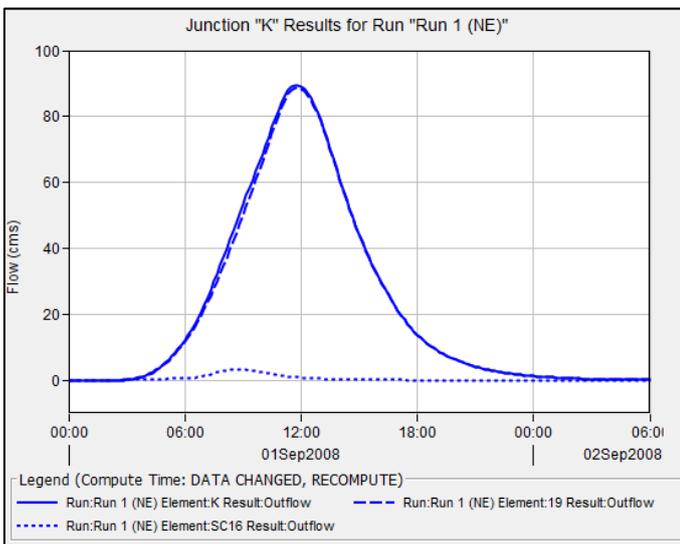


Figura 49. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 15%.

- **Reducción del 20% del CN base**

Tabla 53. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 20%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 20% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	64	2,45
Run 2 (NW)	658,9	65	2,06
Run 3 (SE)	658,9	76,5	2,81
Run 4 (SW)	658,9	42,7	1,35

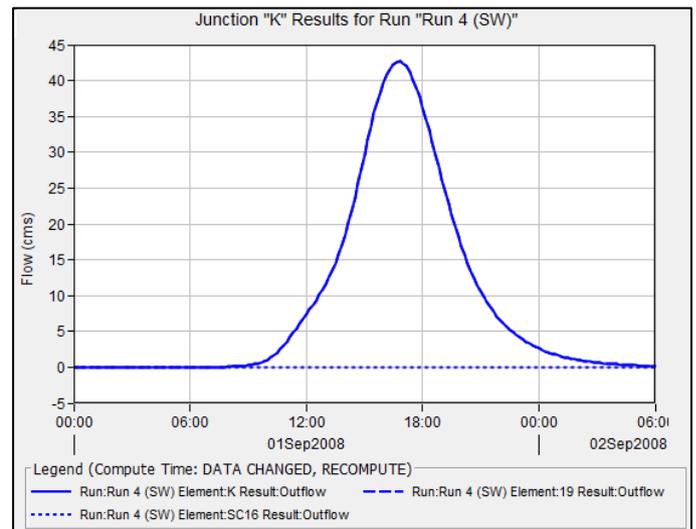
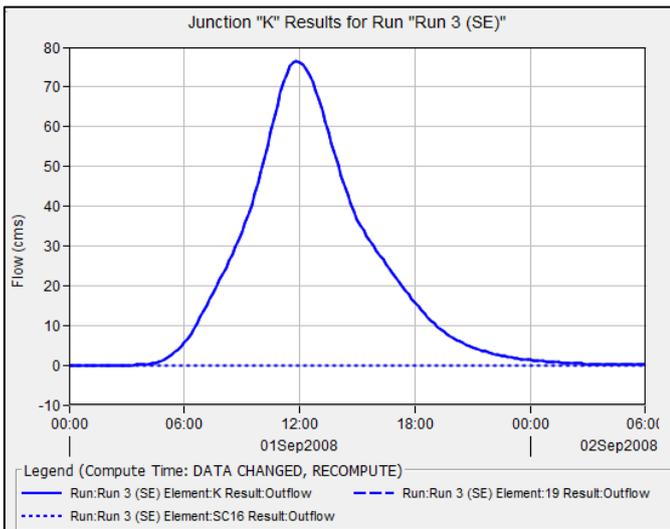
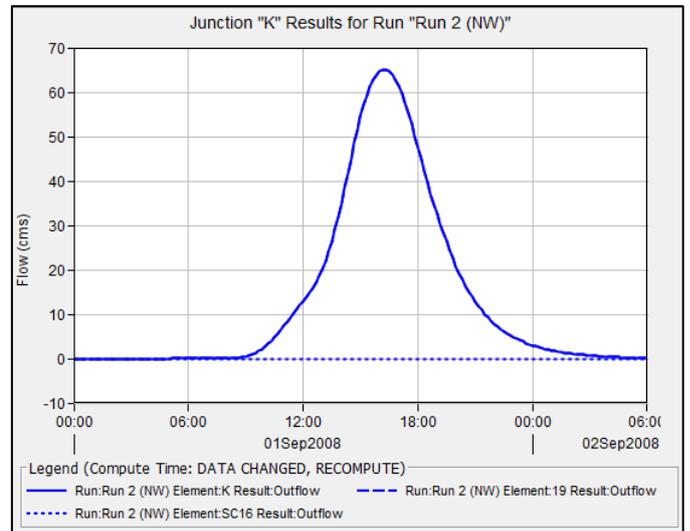
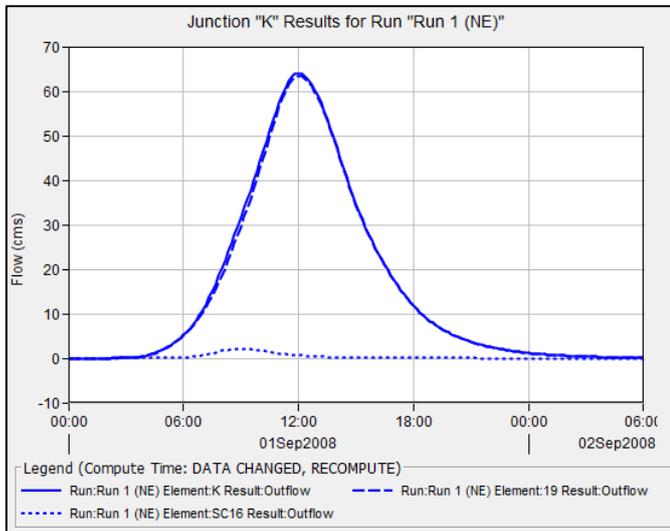


Figura 50. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 20%.

- **Reducción del 30% del CN base**

Tabla 54. Área de drenaje, caudales pico y volumen de escorrentía para las distintas posiciones de la tormenta de diseño de 100TR. CN reducción del 30%. RUN: Simulación/Corrida.

RESULTADOS CN REDUCCIÓN 30% (SALIDA CUENCA MAYOR)

Tormenta	Área de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Volumen (mm)
Run 1 (NE)	658,9	26	0.92
Run 2 (NW)	658,9	24,6	0.66
Run 3 (SE)	658,9	35,3	1,15
Run 4 (SW)	658,9	12,7	0.37

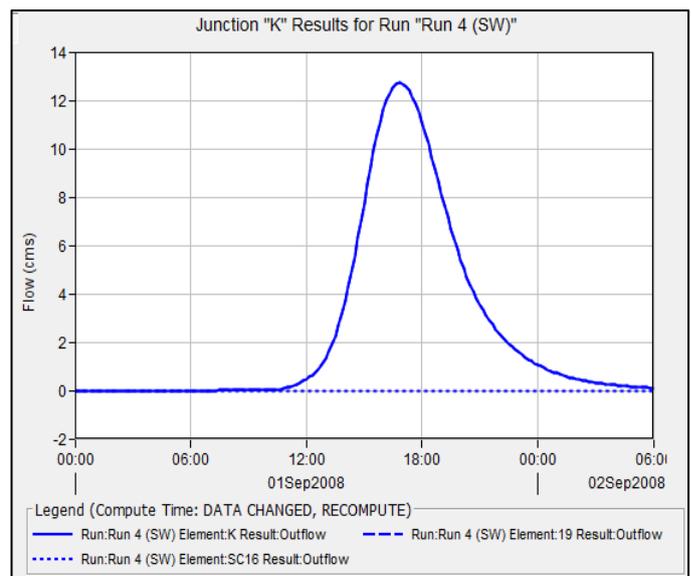
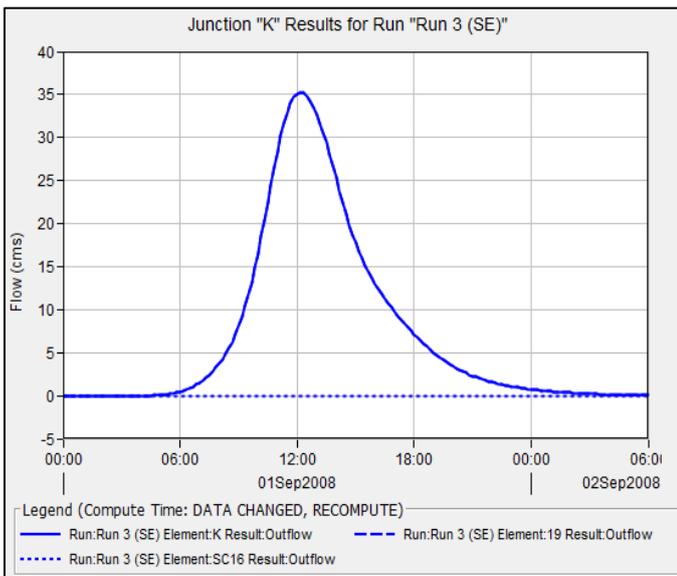
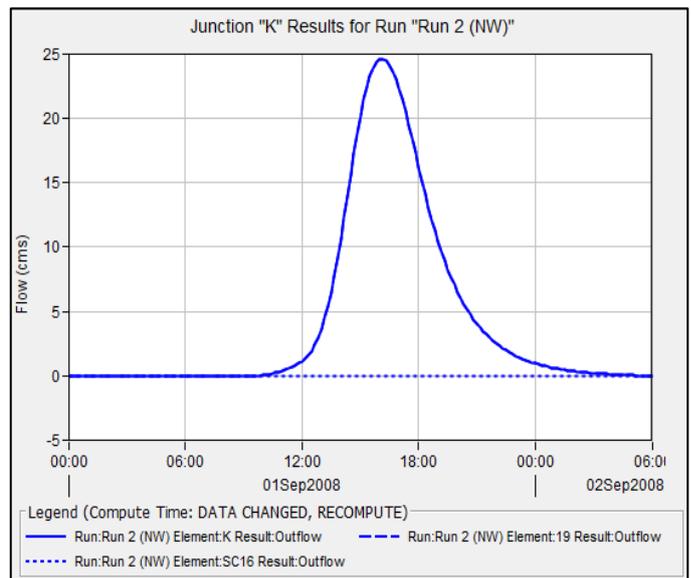
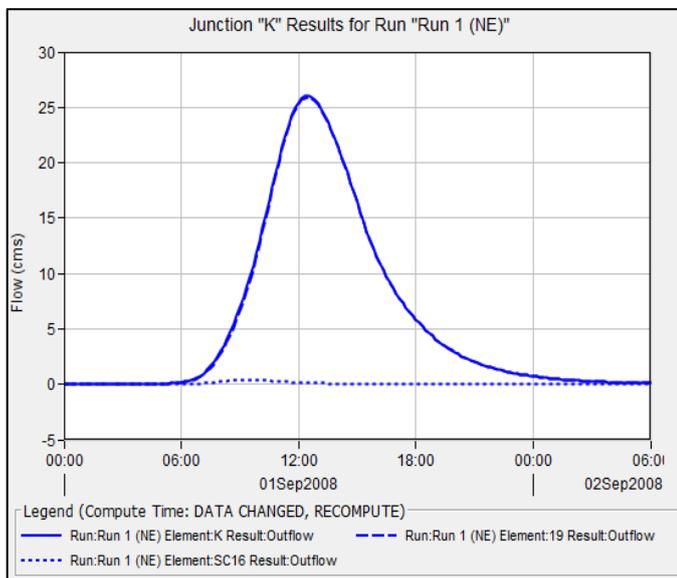


Figura 51. Hidrogramas de salida de la Cuenca Mayor en función de la posición del núcleo de la tormenta de diseño (100TR). CN reducción del 30%.