



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
Facultad de Ciencias Económicas

Escuela para Graduados FCA UNC

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Para optar al Grado Académico de
Especialista en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Zonificación por áreas homogéneas de Erosión Hídrica Potencial: una herramienta para la gestión de cuencas

Ing. Agr. Federico Ramos

Director: Ing. Agrónomo (M. Sc) Ricardo Luis Luque

Córdoba, 2024



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.



Zonificación por áreas homogéneas de Erosión Hídrica Potencial: una herramienta para la gestión de cuencas

Ing. Agr. Federico Ramos

Director: Ing. Agrónomo (M. Sc) Ricardo Luis Luque

Aprobada en estilo y contenido por la Comisión Académica de la EGCH

Tribunal Examinador del TFI

Ing. Civil. Mgtr. Mariana PAGOT

Ing. Civil Esp. Guillermo VILCHEZ

Ing. Agr. Dra. Franca GIANNINI KURINA

Presentación formal académica: Córdoba, 24 de abril de 2024)

La Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas es una instancia de capacitación integral para atender la problemática que urge en las cuencas hidrográficas, principalmente en los ambientes modificados e intervenidos por el hombre. Este programa de posgrado y formación conjunta surgió del trabajo integrado entre las Facultades de Ciencias Agropecuarias, Ciencias Exactas Físicas y Naturales y de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Córdoba, y cuenta con el apoyo del Gobierno de la Provincia de Córdoba a través del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Servicios Públicos y Ministerio de Obras Públicas, a través del Convenio Marco de Cooperación Académica (RD N° 447/2021) y sus respectivos Convenios Específicos (RD N° 475/2021, 465/2021 y 474/2021).

La Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas fue acreditada por CONEAU con Res. 517/19 y Res. Ministerio de Educación de la Nación (ME) 938/2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad Nacional de Córdoba, por brindarme la posibilidad de contar con una educación pública, gratuita y de calidad, como así también, por la creación de esta carrera.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias, que no solo me dio la posibilidad de formarme como Ingeniero Agrónomo sino como Especialista, agradeciendo principalmente a todos los que trabajan para que esa casa de estudios sea un lugar de prestigio y calidez. A la Escuela para Graduados y a los docentes de la Especialidad por el esfuerzo, conocimiento y apoyo brindado.

A mi director, el “flaco Luque”, por su acompañamiento durante la realización de este trabajo, por su tiempo, por su calidad humana y profesional, por su dedicación, y sobre todo por compartir, con pasión, sus conocimientos de manera generosa.

A Susana Hang, por ser el motor de esta carrera de posgrado. Por su apoyo y motivación permanente durante la cursada, y su especial impulso para culminar esta Especialidad.

A mis compañeros de la Cátedra de Manejo de Suelos de la FCA-UNC, especialmente a Cecilia Vettorello, por su calidad humana, por iniciarme en la investigación y acompañarme durante mis primeros años como docente. Por ese acompañamiento comprometido y guía incondicional.

A mi familia, puntal a lo largo de todos estos años. A mi papá y mi mamá por brindarme la posibilidad de estudiar y enseñarme lo valioso del conocimiento, por su apoyo incondicional y dedicado. A mis hermanos por contribuir con creces a ese entorno familiar tan favorable para mi crecimiento. A mi compañera de vida, por su apoyo para terminar esta especialidad y comprensión por las horas extras de trabajo, pero sobre todo por su compañía y calidad humana.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que de una u otra manera trabajan de forma honesta y comprometida, dedicando su vida a cuidar un recurso natural tan valioso para la humanidad como es el suelo.

RESUMEN

El suelo no solo nos proporciona el 95% de los alimentos que consumimos, sino que silenciosamente también nos aporta casi todos los servicios y las funciones de los ecosistemas, necesarios para la existencia de la vida sobre la Tierra. También es el responsable de limpiar, filtrar y almacenar agua; reciclar nutrientes; regular el clima y las inundaciones; eliminar el dióxido de carbono y otros gases de la atmósfera, todo ello a la vez que alberga cerca de un cuarto de las especies animales que habitan la Tierra (Vargas, 2022). La degradación del suelo y el agua, es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo en este momento, poniendo bajo la mirada crítica de la sociedad, a la forma en la que se utilizan estos recursos naturales en los sistemas productivos actuales. Dentro de los procesos de degradación más significativos encontramos la erosión hídrica, fenómeno muy presente en la zona central de la provincia de Córdoba. El principal desafío de la gestión sostenible del suelo es alcanzar un equilibrio entre los muchos servicios ecosistémicos que presta y la necesidad de aumentar la producción de alimentos (Vargas, 2022). En diversas ocasiones, se tiene conocimiento de las distintas prácticas de manejo y conservación del suelo para evitar o disminuir esta degradación, pero sin embargo al momento de implementarlas o ejecutarlas a través de un plan y programa para tal fin, no se cuentan con criterios suficientes para su implementación. Es así que el objetivo general de este trabajo fue desarrollar una metodología para la gestión de cuencas hidrográficas, a partir de la zonificación por áreas homogéneas de riesgo diferencial de erosión. El área en estudio es una cuenca que se ubica en el departamento Santa María de la provincia de Córdoba Argentina, al suroeste de la capital provincial. En primer lugar, lo que se hizo fue caracterizar el área en sus diversas dimensiones, pero especialmente desde el punto de vista topográfico e hidrológico logrando definir así las subcuencas y red de drenaje. Luego, y a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), se logró estimar la erosión hídrica potencial del área, la cual una vez definida, se agrupó y clasificó en distintas áreas homogéneas con riesgo diferencial de erosión. Para valorar el impacto de la zonificación realizada se propuso modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca en distintos escenarios. De este modo se evaluó como impactaba la incorporación progresiva de prácticas de manejo conservacionistas, en los volúmenes escurridos y caudales pico de la cuenca, teniendo en cuenta la zonificación realizada. Se pudo comprobar que la zonificación por zonas homogéneas de erosión hídrica potencial, sí tiene efecto en la hidrología de la cuenca presentando resultados diferenciales, no lineales, en los caudales pico y los escurrimientos generados. Además se pudo identificar un umbral de conveniencia determinando en cuáles escenarios resultaría más eficiente la aplicación de prácticas de manejo conservacionistas, obteniendo disminuciones considerables en los escurrimientos y en los caudales pico. De este modo se concluyó que la zonificación por ZHEHP resulta una herramienta sumamente valiosa para la gestión de cuencas.

Palabras clave: erosión hídrica potencial, conservación de suelos, gestión de cuencas, modelación hidrológica.

ÍNDICE

1	Introducción	15
2	Objetivos.....	23
2.1	Objetivo General	23
2.2	Objetivos Específicos.....	23
3	Ubicación del área en estudio.....	23
4	Características naturales de la región y área en estudio	25
4.1	Caracterización y análisis del clima	25
4.1.1	Falda del Carmen:	26
4.1.2	Despeñaderos:.....	27
4.2	Geomorfología	31
4.2.1	Depresión Periférica:	31
4.2.2	Sierra chica.....	33
4.3	Suelos presentes	34
	• Unidad Cartográfica CoRs	35
	• Unidad Cartográfica EPLi 17.....	36
	• Unidad Cartográfica EPLi-9.....	38
	• Unidad Cartográfica MKtc-2.....	40
	• Unidad Cartográfica MNen-6	41
	• Unidad Cartográfica MNtc2.....	42
4.4	Vegetación	44
4.5	Aspectos hidrológicos de interés	46
4.6	Aspectos socio económicos relevantes	49

5	Diagnóstico: identificación y caracterización de problemáticas	50
6	Descripción topográfica de la cuenca	66
7	Definición de red de drenaje principal.....	69
8	Delimitación de las subcuencas.....	76
9	Determinación de la Erosión Hídrica Potencial en el área de estudio	78
9.1	Metodología de cálculo	83
9.1.1	Factor R.....	83
9.1.2	Factor K.....	85
9.1.3	Factor LS	87
9.2	Integración de los factores: determinación de la erosión hídrica potencial	90
10	Delimitación de Zonas de Riesgo Diferencial de Erosión	93
11	Evaluación de la zonificación por zHEHP como herramienta para la gestión de cuencas: Metodología de trabajo	97
11.1	Determinación de parámetros morfológicos e hidrológicos de cada subcuenca.....	98
11.1.1	Elección de las tormentas de diseño	99
11.1.2	Determinación del volumen de escorrentía. Método del Número de Curva	101
11.1.3	Abstracción Inicial.....	107
11.1.4	Tránsito de Hidrogramas	108
11.2	Modelaciones hidrológicas con el programa HEC-HMS 3.3	109
12	Resultados obtenidos	112
13	Consideraciones finales.....	119

14	Bibliografia.....	123
----	-------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca en estudio.	20
Figura 2. Cuenca Villa del Prado- Dique Chico, ubicación, centros urbanos, red vial nacional y provincial primaria, secundaria y terciaria.	24
Figura 3. Temperaturas medias mensuales de la zona de Falda del Carmen y alrededores (Datos tomados en el periodo 1970-2011) (Fuente: Centro de relevamiento y evaluación de recursos agrícolas y naturales, CREAN).....	26
Figura 4. Precipitaciones mensuales de la zona de Falda del Carmen y alrededores periodo 1970-2011 (Fuente: Centro de relevamiento y evaluación de recursos agrícolas y naturales, CREAN).	27
Figura 5. Precipitación media y variabilidad	28
Figura 6. Temperatura media y variabilidad	29
Figura 7. Curvas IDF para la localidad de Rafael García (Fuente: Camaño Nelli y Dasso, 2005).	30
Figura 8. Distribución de las precipitaciones (hietogramas de diseño) para la localidad de Rafael García (Fuente: Camaño Nelli y Dasso, 2005).	30
Figura 9. Unidades geomorfológicas de la provincia de Córdoba, y área en estudio.	31
Figura 10. Unidades cartográficas del área en estudio, escala del relevamiento 1:500000.	35
Figura 11. Cuencas hidrográficas de la provincia de Córdoba y ubicación de la cuenca en estudio.	47
Figura 12. Recorte de noticia del 7 de enero de 2024 informando el estado de situación de la localidad luego de la tormenta, anunciando la ubicación del centro de evacuados, entre otros (Fuente: Mi Valle Medios).	52
Figura 13. Mapa de curvas de nivel (Eq: 5 m) y límite de la cuenca en estudio....	67
Figura 14. Mapa de pendientes de la cuenca (en porcentaje).....	69

Figura 15. Mapa de la red de drenaje principal de la cuenca Villa del Prado - Dique Chico.....	71
Figura 16. Mapa con la delimitación de subcuencas de la cuenca Villa del Prado - Dique Chico.....	77
Figura 17. Diagrama de integración de los factores de la USLE (Fuente: Spalla M.,2021).	82
Figura 18. Relación entre la PMA y el factor R para 75 localidades de la República Argentina (Fuente: Gaitán et al, 2017).	84
Figura 19. Mapa de Factor R de la USLE para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	85
Figura 20. Mapa de Factor K de la USLE para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	86
Figura 21. Mapa de Factor LS de la USLE, según Moore et al. 1991 para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	89
Figura 22. Mapa de Factor LS de la USLE, según Desmet y Govers 1996 para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	90
Figura 23. Mapa de Erosión hídrica potencial (con LS de Moore et al. 1991) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	91
Figura 24. Mapa de Erosión hídrica potencial (con LS de Desmet y Govers 1996) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	92
Figura 25. Mapa de Erosión hídrica potencial original con LS de Moore et al. 1991 (izquierda) y el mismo mapa generalizado (derecha) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	94
Figura 26. Mapa de Erosión hídrica potencial original con LS de Desmet y Govers 1996 (izquierda) y el mismo mapa generalizado (derecha) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	95
Figura 27. Mapa de zonas homogéneas de erosión hídrica potencial (ZHEHP) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.	96

Figura 28. Curva I-D para PMD=109 mm/día, y tiempo de recurrencia de 10 años.	100
Figura 29. Esquema de tránsito de un hidrograma en un cauce según Muskingum, variable K y X.	108
Figura 30. Diagrama para la simulación de la cuenca con el programa HEC-HMS.	112
Figura 31. Hidrogramas comparativos (caudal en función del tiempo para cada escenario) para la tormenta de proyecto y en el punto de salida “SINK” de la cuenca.....	115
Figura 32. Escurrimientos en mm para cada escenario en el punto de salida “SINK” de la cuenca.	116
Figura 33. Caudales pico en m ³ /s para cada escenario en el punto de salida “SINK” de la cuenca.	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cambios en la superficie y proporciones afectadas por erosión hídrica en la provincia de Córdoba (elaborado en base a Cisneros et al., 2015).....	22
Tabla 2. Valores medios normales mensuales de temperatura y precipitación.....	28
Tabla 3. Superficie y participación relativa de cada Unidad Cartográfica.....	43
Tabla 4. Denominación, superficie y participación relativa de las subcuencas que integran la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	78
Tabla 5. Zonas homogéneas de erosión hídrica potencial, superficie y participación relativa para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	97
Tabla 6. Parámetros morfológicos e hidrológicos de las subcuencas de la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.....	99
Tabla 7. Valores de lámina precipitada para los diferentes Tc de cada subcuenca.	101
Tabla 8. Valores de lámina precipitada, lámina escurrida y Numero de Curva para cuatro de las tormentas de proyecto utilizadas.	104
Tabla 9. Valor de NC para cada zona (NC) y NC ponderado por su participación (Pond. NC, en color) para cada subcuenca en función del escenario.....	106
Tabla 10. Factor K de Muskingum para cada transito (Reach).	109
Tabla 11. Resultados de las modelaciones hidrológicas para cada escenario. Caudal pico (m ³ /s), lamina escurrida (mm), y relación de escurrimiento Escenario 1/Escenario 5.	113
Tabla 12. Análisis comparativo de los escurrimientos en cada escenario para el punto de salida “SINK” de la cuenca.	116
Tabla 13. Análisis comparativo de los caudales pico en cada escenario para el punto de salida “SINK” de la cuenca.	118

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Calles, terrenos y casas inundadas en Villa del Prado. Observar el rastrojo de maíz dentro de la vivienda (Fuente: Mi Valle Medios).	52
Fotografía 2. Calle inundada en barrio Mitimay. Personal del ETAC trabajando en la zona (Fuente: Mi Valle Medios).	53
Fotografía 3. Cunetas inundadas y desbordadas en la Ruta Provincial N°5 (Fuente: Mi Valle Medios).	53
Fotografía 4. Calles, terrenos y casas inundadas en Villa del Prado (Fuente: Mi Valle Medios).	54
Fotografía 5. Cuneta y casa inundada sobre RP N° 5.	55
Fotografía 6. Camino rural intransitable llegando a la ruta C-45, funcionando como canal (todavía corría agua por el centro). Se observa rastrojo de maíz sobre el camino.	55
Fotografía 7. Salida de alcantarilla sobre RP N° 5, con descarga hacia el barrio Mitimay de Villa del Prado (se ve la calle inundada).	56
Fotografía 8. Alcantarilla sobre RP N° 5, prácticamente obstruida por rastrojo arrastrado por el agua.	56
Fotografía 9. Escurrimiento saliendo de campo sobre la RP N° 5, donde se observa el color oscuro del agua, arrastre de rastrojo y daños en el cerco.	57
Fotografía 10. Mismo lugar que la Fotografía 8, vista lateral.	57
Fotografía 11. Cuneta sobre RP N° 5 llegando a Villa del Prado, a su máxima capacidad con signos de haber sido desbordada.	58
Fotografía 12. Casa inundada sobre RP N° 5 llegando a Villa del Prado. Todavía salía agua del parque de la casa.	58
Fotografía 13. Acumulación de agua de escurrimiento sobre RP N° 5 llegando a Santa Ana (fuera de la cuenca, pero muy cerca). Observar la dimensión de la laguna formada.	59

Fotografía 14. Misma laguna que Fotografía 12, donde se pueden observar daños a los cultivos recién implantados.....	59
Fotografía 15. Misma laguna que Fotografía 12, donde se puede observar la enorme cantidad de rastrojo arrastrado por el agua.....	60
Fotografía 16. Cunetas sobre ruta C-45 con acumulación agua y rastrojo.	60
Fotografía 17. Escurrimiento saliendo de un predio industrial sobre ruta C-45, con dirección al alcantarillado.	61
Fotografía 18. Alcantarilla sobre ruta C-45, vista aguas abajo, donde se pueden observar daños por erosión en surcos en el lote.....	61
Fotografía 19. Daños por erosión en surcos en lote aguas abajo, misma ubicación que Fotografía 17.	62
Fotografía 20. Cuneta y lote agrícola anegado sobre ruta C-45, donde se pueden observar daños en los cultivos y alambrados.....	62
Fotografía 21. Cuneta y lote agrícola anegado sobre ruta C-45.....	63
Fotografía 22. Lote anegado sobre ruta C-45, con gran acumulación de rastrojo en superficie (una capa de alrededor de 40/50 cm).	63
Fotografía 23. Lote anegado sobre ruta C-45, con daños a los cultivos, acumulación de rastrojo y ramas de árboles.	64
Fotografía 24. Alcantarilla sobre RP N° 5, con descarga directamente hacia lotes y edificaciones en barrio Mitimay.	72
Fotografía 25. Alcantarilla sobre ruta C-45, obstruida por sedimentación y vegetación.....	73
Fotografía 26. Batería de alcantarillas sobre ruta C-45, aguas abajo.	73
Fotografía 27. Alcantarilla sobre ruta C-45.....	74
Fotografía 28. Alcantarilla sobre ruta C-45 vista aguas abajo, donde se observan graves daños por erosión en cárcavas.....	74
Fotografía 29. Cuneta sobre ruta C-45 con una gran acumulación de rastrojo obstruyendo una alcantarilla.....	75

Fotografía 30. Alcantarilla sobre ruta C-45, obstruida por sedimentación,
vegetación y rastrojo. 75

Zonificación por áreas homogéneas de Erosión Hídrica Potencial: una herramienta para la gestión de cuencas

1 INTRODUCCIÓN

Una de las mayores preocupaciones actuales, es la de encontrar opciones viables de desarrollo basadas en un crecimiento económico y equitativo, que perdure en el tiempo. Esto último se ha revalorizado últimamente, al percatarse el hombre de que muchos de sus llamados avances, sobre todo en materia de transformación productiva, se encuentran descompensados por los daños que ocasionan al ambiente.

La mayor conciencia y comprensión que hay actualmente de la interacción del hombre con el medio ambiente, y de la vulnerabilidad de éste ante un desarrollo que no lo toma en cuenta, se han hecho explícitas al agregarse al vocablo desarrollo, el término sustentable o sostenible. Dado que la sustentabilidad debe estar implícita en el concepto de desarrollo, la palabra sustentable o sostenible debería ser sólo un agregado transitorio, válido únicamente hasta que la necesidad de duración en el tiempo se internalice definitivamente en él.

Por otro lado, la sustentabilidad del desarrollo sólo es una idea o una aspiración abstracta si el concepto no se asocia tanto a objetivos claros para alcanzar, dentro de un territorio definido -que contiene los elementos y recursos naturales necesarios

para la subsistencia de la especie humana- como a los procesos de gestión para alcanzar dichos objetivos. Las políticas de intención deberán transformarse en políticas de ejecución, y es precisamente aquí donde surgen los mayores desafíos.

El manejo de los recursos naturales en el marco de la dinámica de una cuenca hidrográfica, que es parte del manejo integral o gestión de una cuenca, surge como una de las posibles opciones para articular la participación de los usuarios de recursos naturales en materia de gestión ambiental. La cuenca hidrográfica posee un valor insuperable como base para coordinar actores ligados a un recurso común, el agua, y para evaluar los efectos que tienen sobre este recurso, las medidas de gestión ambiental.

Una primera aproximación a la gestión de cuencas es la de limitarla a la gestión de los recursos hídricos presentes en dicho territorio. La gestión del agua es un proceso complejo, destinado a controlar el ciclo de un recurso natural cuya presencia es errática e irregular en el tiempo y en la superficie terrestre. Además, el agua es vulnerable al trato que se le dé, ya que se puede contaminar fácilmente, alterándose así todos sus usos posteriores, actuales o potenciales.

A través de este proceso de gestión del agua se busca solucionar conflictos entre múltiples usuarios que, queriéndolo o no, dependen de un recurso compartido. Por ello, aunque pueden contar con concesiones o derechos de uso, no dejan de afectarse mutuamente y de ser interdependientes. La oferta proviene, usualmente, de un sistema común, y a él se vuelven a integrar los excedentes de uso y los efluentes. Las aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas, así como las zonas de evacuación, forman de este modo una sola unidad (Dourojeanni, 1994).

Una segunda aproximación a la gestión de cuencas, pero no por eso menos importante, es la de incluir en ese sistema complejo al suelo. Este recurso, escaso si lo hay, comparte con el agua algunas características, por ejemplo, el hecho de ser un recurso altamente vulnerable en función del trato o uso que se le dé, quizás aún más susceptible de ser dañado de manera irreversible, y de ser un recurso compartido por los habitantes o usuarios del mismo (no solo a dimensión espacial, sino temporal, generación tras generación). Asimismo, presenta también algunas particularidades como el hecho de su lenta y dificultosa formación (se estima que para formar un centímetro de suelo se necesitan de cientos a miles de años) (FAO, 2015).

Entonces, las acciones que se realicen en las cuencas tienen importantes repercusiones sobre la salud humana, el medio ambiente y la producción, por lo que deben ser abordadas con suficiente base técnica. El elevado costo de las obras, hace aún más necesario que el sistema de gestión esté a cargo de expertos cuya permanencia no dependa de los cambios políticos (Dourojeanni, 1994).

La provincia de Córdoba ocupa una superficie de 16.532.100 hectáreas, y se ubica en el centro de la República Argentina. Se caracteriza por poseer una amplia diversidad de ambientes producto de su ubicación transicional entre marcados gradientes climáticos, topográficos, materiales originarios de suelos y tipos de vegetación.

Los principales procesos de degradación ambiental son en su mayoría producto de fuertes cambios en el uso y manejo de las tierras. Tenemos procesos de erosión hídrica en sus diferentes formas (laminar, surcos, cárcavas, márgenes y fondos de

cursos de agua), erosión eólica en suelos areno-limosos; degradación física, química y biológica de suelos bajo intenso uso agrícola, procesos hidrohalomórficos y afectación por napa freática, degradación de la vegetación natural y pérdida de biodiversidad (Cisneros et al, 2015).

De acuerdo con estadísticas oficiales del Ministerio de Agricultura de la provincia de Córdoba, aproximadamente un 42 % de la superficie provincial está ocupada por cultivos. En los últimos 20 años se incorporaron al uso agrícola más de 3,5 millones de ha, pasando de 3,3 a 7,06 millones. También ha cambiado la proporción de cultivos. Se ha incrementado la superficie cultivada de soja (de 1,5 a 4,7 millones de ha), y maíz (0,6 a 1,2 millones de has), y ha disminuido el área con cultivo con girasol del 10 al 1 % y trigo del 10 al 5 % de la superficie agrícola para los ciclos 95/96 al 12/13 respectivamente. El área de siembra de maní se ha mantenido relativamente constante alrededor de 250.000 has, aunque su área de localización se ha trasladado desde el centro hacia el sur y suroeste de la provincia (Cisneros et al, 2015).

Este fuerte cambio en el uso de los suelos, tanto en términos absolutos (superficie agrícola total) como relativos (tipo de cultivos) implicaron alteraciones en la rotaciones de cultivos con relaciones oleaginosas/gramíneas de 2,5:1 y soja: maíz de 3,7:1. El valor más alto de esta relación se registra en el departamento Tercero Arriba con 15:1, prácticamente monocultivo, con relaciones menores en los Departamentos Río Primero (7:1), Marcos Juárez y Juárez Celman (6:1), General Roca (2,3:1) o (Río Cuarto (2:1) (Cisneros et al, 2015).

En función de lo antedicho y entendiendo que la cuenca debe ser el área o unidad de gestión de los recursos naturales, es que resulta de particular importancia su estudio, análisis y comprensión de su dinámica de funcionamiento. Es lógico pensar que en función de la variabilidad que encontramos en la provincia (en ambientes geomorfológicos, suelos, vegetación, relieve, etc.), cada cuenca tendrá sus características o problemáticas inherentes.

Pasando ahora al área de estudio de este trabajo, la cuenca se ubica en el departamento Santa María, al suroeste de la ciudad de Córdoba (Fig. 1). Es una cuenca de 16763 ha, predominantemente de uso agrícola, de hecho aproximadamente dos tercios de su superficie son destinadas a la producción agrícola. El resto es zona de sierra y pie de sierra, donde predomina el uso ganadero.

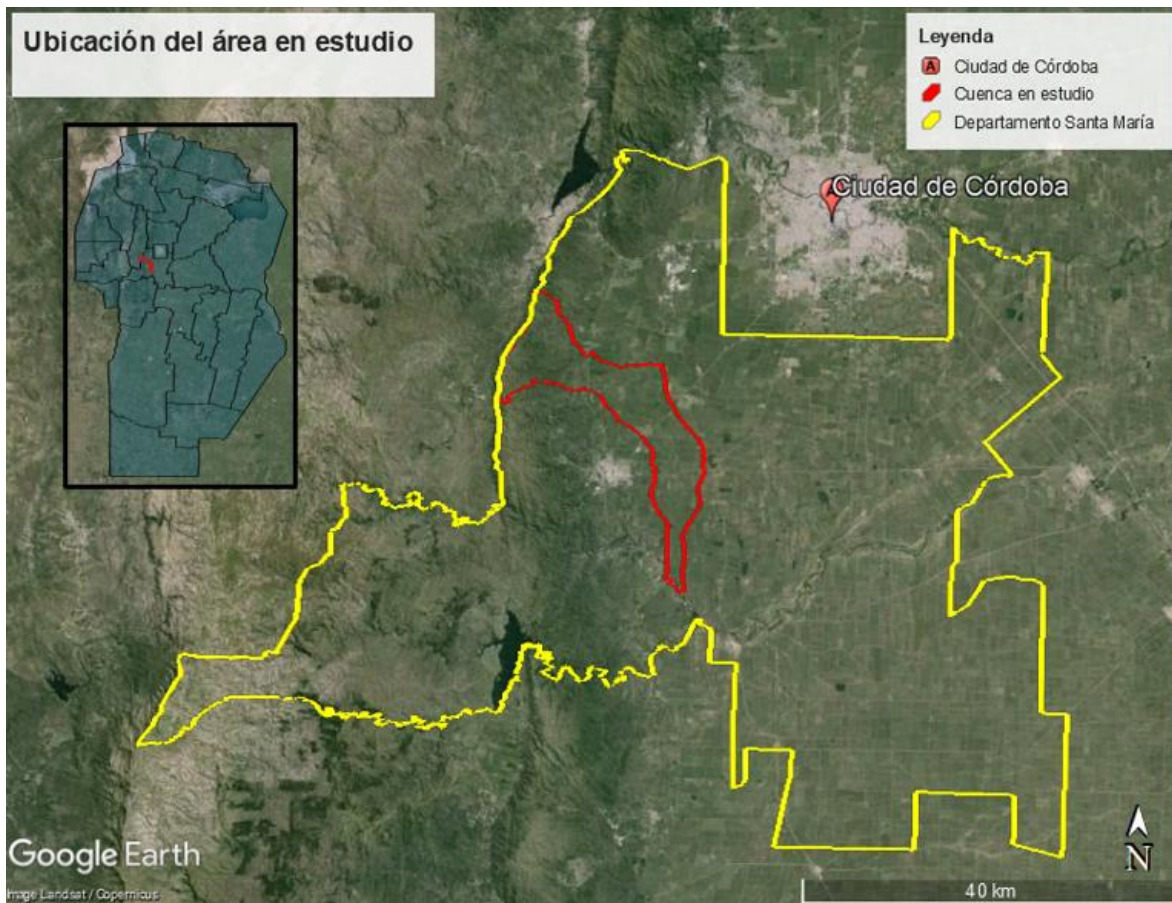


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca en estudio.

Esta cuenca, en función de sus características naturales propias y del uso y manejo actual que se le da, cuenta con las mismas problemáticas presentes en muchas otras cuencas del centro de la provincia de Córdoba. Suelos con pendientes moderadas a altas y con texturas fuertemente limosas, le confieren a estas áreas una gran susceptibilidad a ser erosionadas por el agua. Esta susceptibilidad del recurso suelo, sumado a la ocurrencia de eventos de precipitaciones, hoy en día cada vez más intensos, traen como consecuencia grandes daños en los suelos e infraestructura tales como caminos rurales, red vial primaria, áreas urbanas o centros poblados, etc., a causa del escurrimiento superficial generado.

Pese a casi un siglo de esfuerzos de investigación y extensión, la erosión del suelo por el agua y el viento, favorecida por las labranzas frecuentes, continúa siendo la mayor amenaza a la salud del suelo y a los servicios ecosistémicos del mismo en muchas regiones del mundo (Pennock, 2019). La provincia de Córdoba, y puntualmente esta cuenca, no son la excepción.

Tomando la provincia de Córdoba, las áreas agrícolas con un grado significativo de erosión hídrica abarcan una superficie de 3,2 millones de has (Cisneros et al, 2015), lo que representa un incremento de 1,2 millones de has (61 %) respecto al área estimada por Marelli (1996). Los principales departamentos afectados son Tercero Arriba, Río Cuarto, Calamuchita y Marcos Juárez.

En la Tabla 1 se representan tres grados de erosión hídrica en tierras de uso agrícola-ganadero (se excluyen las sierras) en función de la pendiente: grado leve en tierras con menos del 2 %, moderado (media) de 2 a 4 % y severa (alta) más del 4 %. En términos relativos a la evaluación de Marelli (1996) la erosión leve habría disminuido un 76 %, mientras que los grados moderados y severos se habrían incrementado entre 137 y 248 % respectivamente. Estos datos mostrarían una tendencia consistente respecto a una evaluación que detectó aumentos en las tasas de erosión hídrica entre 1986 y 1999 del orden del 47 %, estimada con el modelo RUSLE 2 para el oeste del Departamento Río Cuarto (Cisneros et al., 2004).

Tabla 1. Cambios en la superficie y proporciones afectadas por erosión hídrica en la provincia de Córdoba (elaborado en base a Cisneros et al., 2015).

Tipo y grado de erosión hídrica actual	Superficie estimada 1996	Superficie estimada 2014	Cambio % (*)
Leve	885.000	206.971	-76
Moderada	731.000	1.729.417	+ 137
Alta	357.400	1.243.612	+ 248
Total	1.973.400	3.170.000	+ 61%

(*) Nota: los porcentajes toman como base el dato de Marelli (1996)

Las cárcavas representan una de las formas más severas de erosión, por su impacto en el deterioro de la infraestructura vial y por su alta producción de sedimentos. En un trabajo sobre las cuencas alta de los Arroyos Menores Santa Catalina, del Gato y Ají (640.000 has) Cisneros (2010), determinó la existencia de 456 focos activos de erosión en cárcavas, con una pérdida de suelo estimada en 400.000 tn y un avance promedio del orden de 10 m/año. Extrapolando linealmente estos resultados al resto de las áreas con erosión en la provincia, la magnitud del fenómeno alcanzaría en el orden de las 1.800-2.000 cabeceras o focos activos, con un avance lineal de aproximadamente 20.000 m/año y una pérdida de suelo del orden de 2 millones de tn (Cisneros et al, 2015).

Considerando la magnitud de este grave problema que afecta a gran parte de los suelos de nuestra provincia, y entendiendo que, aunque a otra escala, ocurre lo mismo en el área de estudio, es que resulta de primordial importancia, generar criterios con bases técnicas, que nos permitan gestionar mejor los recursos suelo y agua de las cuencas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Desarrollar una metodología para la gestión de cuencas hidrográficas, a partir de la zonificación por áreas homogéneas de riesgo diferencial de erosión.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterizar el área en estudio.
- ❖ Describir topográfica e hidrológicamente la cuenca y sus subcuencas
- ❖ Determinar la potencialidad de la erosión hídrica en el área.
- ❖ Definir zonas de riesgo diferencial de erosión hídrica potencial.
- ❖ Modelar el comportamiento de la cuenca considerando la zonificación y diferentes escenarios.

3 UBICACIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio se la denominó cuenca Villa del Prado- Dique Chico. La misma se encuentra en la zona central del departamento Santa María de la provincia de Córdoba, hacia el suroeste de la capital provincial. Tiene forma irregular de franja curva convexa hacia el NE (Fig. 2).

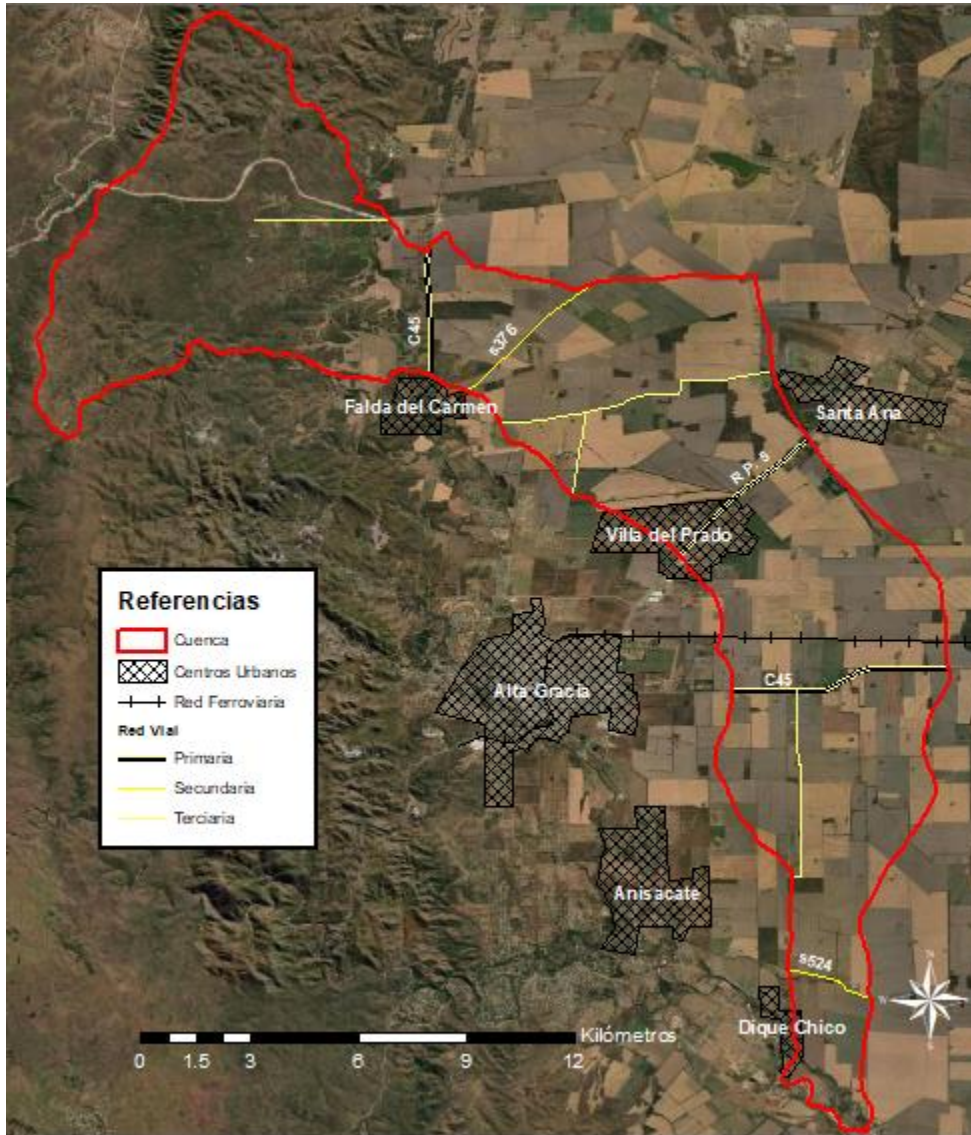


Figura 2. Cuenca Villa del Prado- Dique Chico, ubicación, centros urbanos, red vial nacional y provincial primaria, secundaria y terciaria.

La misma comienza (cabecera de cuenca) al noroeste de la localidad de Falda del Carmen en la parte alta de las sierras chicas, aproximadamente a la altura de San Antonio de Arredondo. Continúa aguas abajo y hacia el sureste, atravesando casi perpendicularmente las rutas C-45, RP5, C-45 nuevamente, donde toma una orientación franca N-S, corriendo casi paralelamente a la autovía RN36, hasta llegar

a su desembocadura en el límite sur, en el río Segundo o Xanaes en cercanías de las localidades de Dique Chico y Despeñaderos.

Dentro de la misma encontramos parte de las localidades de Villa del Prado y Dique Chico.

Primero en sentido N-S y luego en sentido O-E, el área de estudio es atravesada por la RP C-45. Así también y en sentido SO-NE la cruza la RP 5 y en el sector sur, y en sentido N-S lo hace casi paralelamente a su límite, la RN N° 36. En sentido O-E también la cruza las vías inactivas del ex-FF.CC Gral. Mitre, Tramo Alta Gracia-Río Segundo (Fig. 2).

4 CARACTERÍSTICAS NATURALES DE LA REGIÓN Y ÁREA EN ESTUDIO

4.1 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL CLIMA

A nivel regional, para Koeppen (1931), se trata de un clima templado con estación seca en invierno (Cw) y para Thornthwaite y Hare (1955), se trata de un clima de pradera baja con una eficiencia térmica de 1.050 mm y un índice hídrico de -15.

Para mayor detalle, se obtuvieron datos climáticos de dos localidades cercanas al área de estudio, Falda del Carmen al extremo noroeste, y Despeñaderos en el extremo sureste.

4.1.1 Falda del Carmen:

4.1.1.1 Régimen térmico y de heladas

El clima es cálido y templado. La temperatura media anual en la zona se encuentra a 18°C, siendo la temperatura media del mes más frío de 11,1°C, en julio y la temperatura media del mes más caluroso de 24,1 °C, en enero (Fig. 3).

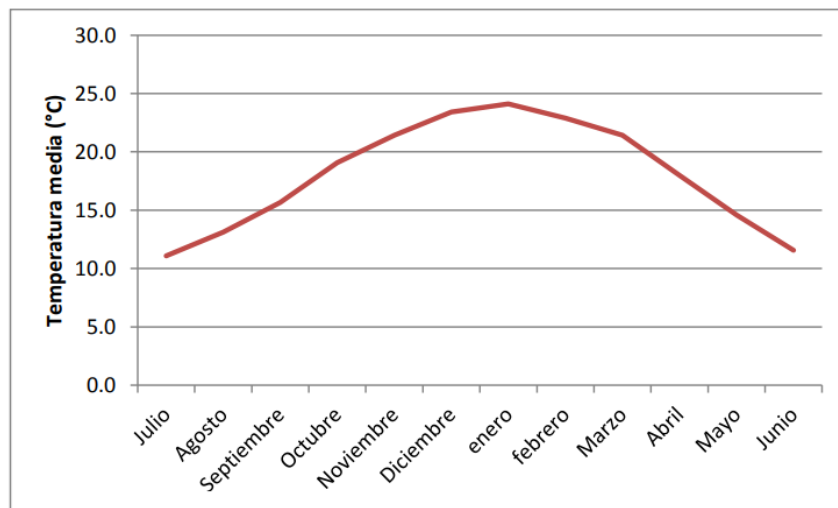


Figura 3. Temperaturas medias mensuales de la zona de Falda del Carmen y alrededores (Datos tomados en el periodo 1970-2011) (Fuente: Centro de relevamiento y evaluación de recursos agrícolas y naturales, CREAN).

En lo que respecta a temperaturas extremas registradas, las mínimas rondan los -8°C durante los meses de julio-agosto y las máximas alcanzan los 42,4°C en meses de diciembre-enero. El período de heladas se extiende desde abril a octubre en la zona, siendo de aproximadamente 210 días.

4.1.1.2 Precipitaciones

El régimen climático al que pertenece la cuenca es el semiárido, siendo la precipitación media de 800 mm al año. Presenta una distribución de las lluvias bastante marcada (Fig. 4), con aproximadamente el 80% de las mismas en los

meses más cálidos (octubre-marzo), y el 20% en los meses restantes (abril-setiembre).

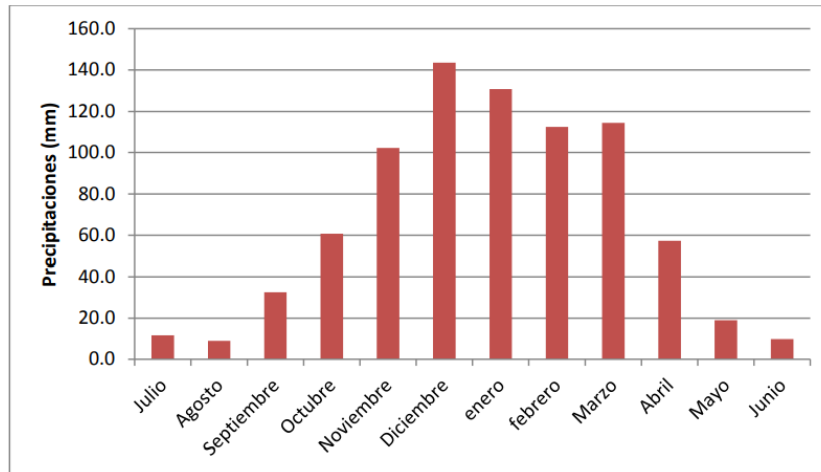


Figura 4. Precipitaciones mensuales de la zona de Falda del Carmen y alrededores periodo 1970-2011 (Fuente: Centro de relevamiento y evaluación de recursos agrícolas y naturales, CREAN).

4.1.2 Despeñaderos:

El clima de Despeñaderos se clasifica como cálido y templado. Según la clasificación climática de Köppen (1931) el clima de la región corresponde al tipo seco subhúmedo, mesotermal, con distribución monzónica de las lluvias (81,9 % en el semestre octubre – marzo, Fig. 5). La menor cantidad ocurre en agosto, el promedio de este mes es 11 mm, y la mayor precipitación cae en enero con un promedio de 108 mm (Tabla 2). La temperatura media anual es 17.3 °C y la precipitación media anual es de 686 mm.

Tabla 2. Valores medios normales mensuales de temperatura y precipitación

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	23,9	22,9	20,6	16,8	13,7	10,7	10,5	12,1	14,7	17,6	20,7	22,9
Temperatura min. (°C)	16,9	16	14,1	10,1	7,2	4,5	3,4	4,5	7,2	10,8	13,8	16,1
Temperatura máx. (°C)	30,9	29,9	27,2	23,5	20,3	16,9	17,6	19,7	22,2	24,4	27,6	29,8
Precipitación (mm)	108	85	95	41	23	12	12	11	25	81	91	102

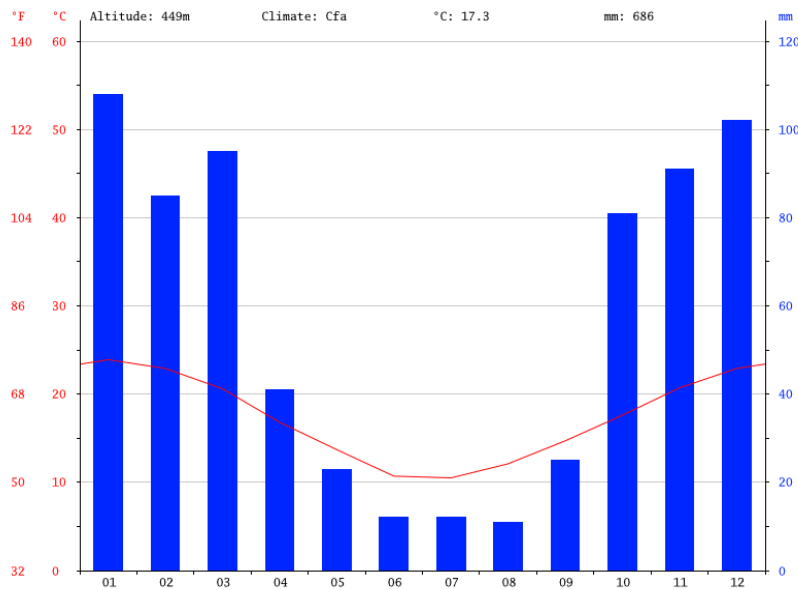


Figura 5. Precipitación media y variabilidad

Durante el año las temperaturas medias varían en 13,4 °C (Fig. 6). Las temperaturas son más altas en promedio en enero, alrededor de 23.9 °C, julio tiene la temperatura promedio más baja del año que es de 10,5 °C (Tabla 2).

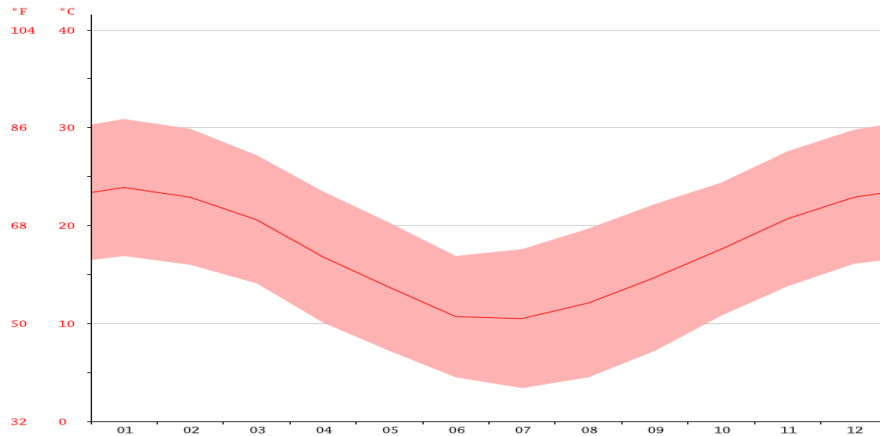


Figura 6. Temperatura media y variabilidad

En relación a los vientos, la velocidad promedio por hora en Despeñaderos tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 4,8 meses, del 17 de julio al 11 de diciembre, con velocidades promedio del viento de más de 8,8 kilómetros por hora. El día más ventoso del año es el 30 de septiembre, con una velocidad promedio del viento de 10,2 kilómetros por hora. El tiempo más calmo del año dura 7,2 meses, del 11 de diciembre al 17 de julio. El día más calmo del año es el 6 de marzo, con una velocidad promedio del viento de 7,4 kilómetros por hora.

Para la localidad de Rafael García, también cercana al área en estudio y puntualmente en relación a las precipitaciones, sus intensidades y distribuciones, se cuenta con una información muy valiosa, como es el “Informe técnico estación n° 74 - Rafael García” del Lic. Gabriel Caamaño Nelli y la Geól. Clarita María Dasso. De allí se puede obtener información muy precisa, principalmente lo que son las curvas de Intensidad- Duración- Frecuencia y distribución de las precipitaciones o hietogramas de diseño (Fig. 7 y Fig. 8).

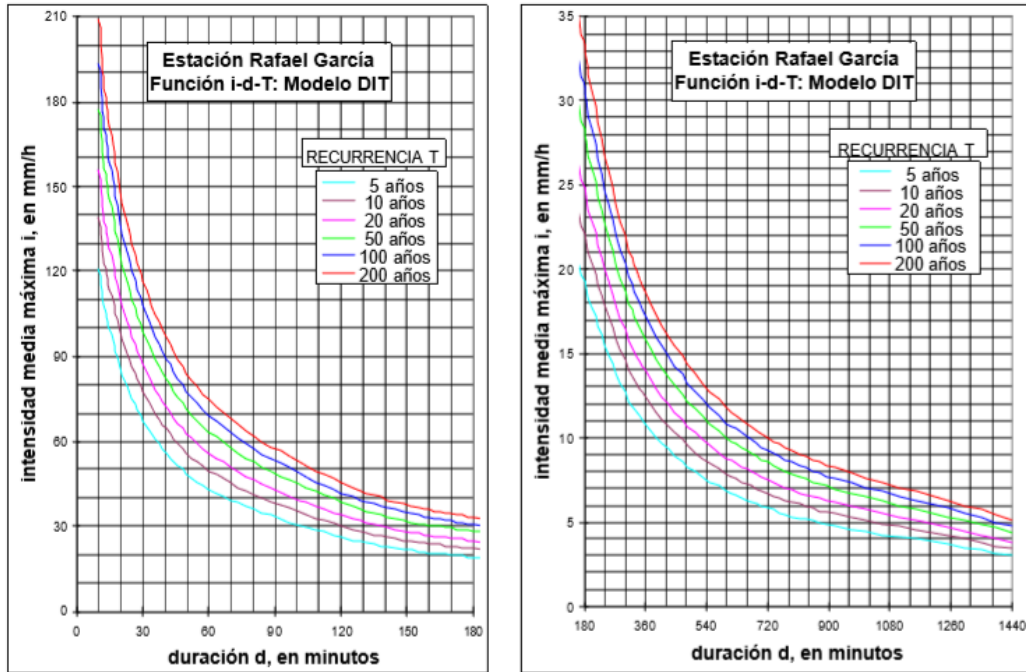


Figura 7. Curvas IDF para la localidad de Rafael García (Fuente: Camaño Nelli y Dasso, 2005).

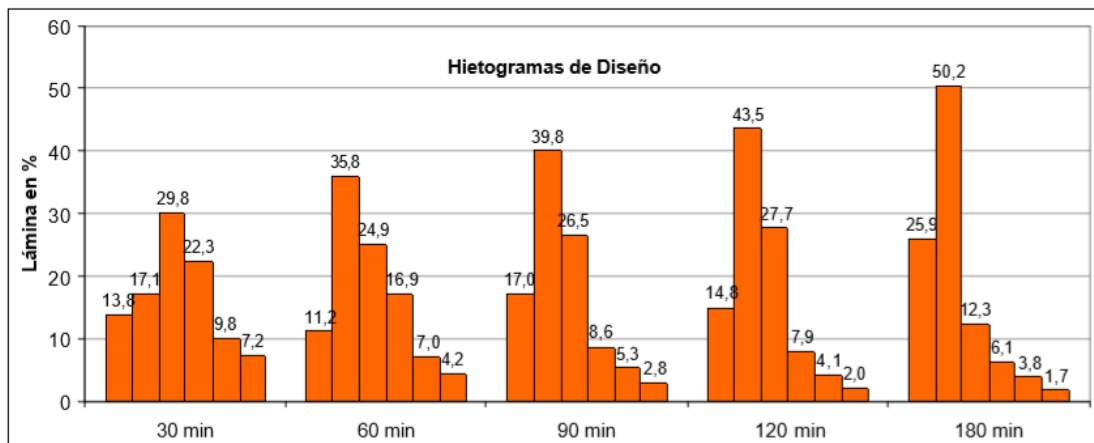


Figura 8. Distribución de las precipitaciones (hietogramas de diseño) para la localidad de Rafael García (Fuente: Camaño Nelli y Dasso, 2005).

Así también, se cuenta con el trabajo de Catalini et al., 2021, el Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias para diseño hidrológico, disponible en Mapas Córdoba (Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba), que brinda información sumamente útil en relación a las precipitaciones.

4.2 GEOMORFOLOGÍA

Dentro del área en estudio, encontramos dos unidades geomorfológicas: la Depresión Periférica y la Sierra Chica (Fig. 9). La clasificación utilizada y los nombres geomorfológicos siguen a Capitanelli (1979), Jarsún (1981), completados y ampliados por Zamora, Gorgas Tassile y otros (2003).



Figura 9. Unidades geomorfológicas de la provincia de Córdoba, y área en estudio.

4.2.1 Depresión Periférica:

Es un ambiente relativamente deprimido, longitudinal, ubicado lateralmente al este de la Sierra chica de Córdoba y al oeste de la Pampa loésica alta. Está constituido

por conos, abanicos aluviales, derrames y terrazas de ríos y arroyos parcialmente cubiertos por depósitos eólicos franco-limosos.

Este ambiente presenta características diferenciales hacia el norte y hacia el sur de la ciudad de Córdoba. En la parte sur, lugar de este estudio, constituye un valle longitudinal cuyo borde occidental está cubierto por abanicos aluviales y el oriental por depósitos loésicos. En el centro se destacan las fajas fluviales de los ríos Anisacate, Alta Gracia, Los Molinos, Soconcho y otros menores. Los procesos erosivos en los suelos por la acción del agua de lluvia son intensos, especialmente en los bordes de la depresión.

Dentro de esta concavidad tectónica longitudinal el relieve es ondulado a suavemente ondulado en su parte central, siendo el gradiente regional de 0,5 a 1 %; de 2 a 6 % en el contacto con afloramientos y de más del 30% en los cerrillos aislados (complejo metamórfico y sedimentos clásticos del Cretácico).

Los materiales originarios de los suelos tienen texturas variables; desde esqueléticas gruesas en las partes apicales de los abanicos y cerrillos, hasta franco limosas y aun arcillo limosas en el loess y derrames finos distales respectivamente

Los suelos tienen un drenaje natural libre con la capa freática profunda que no afecta los perfiles de los suelos. Los procesos erosivos en los suelos son selectivos o puntuales, siendo la susceptibilidad variable, de severa a ligera según la geoforma local considerada.

Solo se observan relictos de la vegetación natural correspondiente a la provincia del espinal, esencialmente en cerrillos y flancos de los mismos, estando la mayor parte de las tierras cultivadas (Gorgas et al., 2003).

4.2.2 Sierra chica

Cordón orientado de norte a sur, en el área central de la provincia, ubicado en el borde oriental de las sierras pampeanas. Comienza al norte con la sierra de Masa y termina al sur con la sierra de Las Peñas. Hacia el oeste está limitado por los valles de Punilla y Calamuchita y al este por un amplio piedemonte con parcial cubierta fluvio eólico y la depresión periférica.

Su extremo altitudinal es el cerro Uritorco que alcanza los 1950 m.s.n.m. Siempre los gradientes son más suaves hacia el este por el basculamiento ya mencionado. Constituye un complejo metamórfico y sedimentario e incluye algunas formas volcánicas en las proximidades de Río Tercero.

En el área del complejo metamórfico (gneis, esquistos, anfibolitas y calizas), donde el relieve es muy colinado especialmente en la ladera occidental, por factores topográficos, los suelos están muy poco desarrollados (contacto lítico). Por el contrario, en la ladera oriental con relieve más tendido, área de estudio, los suelos son más profundos e intensamente meteorizados en profundidad, proceso que se favorece además por la presencia de planos de esquistosidad subverticales que favorecen la alteración y edafización de la roca madre (contacto paralítico).

En el área norte dominan las rocas sedimentarias del Cretácico, areniscas y conglomerados con suelos calcáreos profundos (Sierras de Pajarillo, Copacabana

y Masa). Finalmente, una porción del sur de la sierra chica está constituido por afloramientos volcánicos de formas tabulares con suelos someros (área de Río Tercero)

Localmente, la red de drenaje está bien definida, con una vertiente oriental de pequeñas corrientes de agua cuyos recorridos muestran un evidente control estructural. Está atravesada por los ríos Suquía, Xanaes y Ctalamochita, cursos antecedentes que con amplias cuencas de aportes en las sierras grandes y por arroyos de menor caudal que en condiciones normales se insumen en el Piedemonte oriental o las llanuras.

La vegetación consiste en bosque serrano en las laderas más bajas y quebradas; romerillal a modo cinturón entre 1000 y 1300 m.s.n.m., y por último, en las cumbres, pastizales de altura (Gorgas et al., 2003).

4.3 SUELOS PRESENTES

Acorde la cartografía de suelos de mayor escala disponible (1:500.000) descripta en el Atlas de Suelos de la Provincia de Córdoba (Agencia Córdoba DACyT, 2003), las Unidades Cartográficas de suelos presentes en la cuenca son: CoRS, EPLi 17, EPLi 9, MKtc-2, MNen-6 y MNtc-2 (Fig. 10).

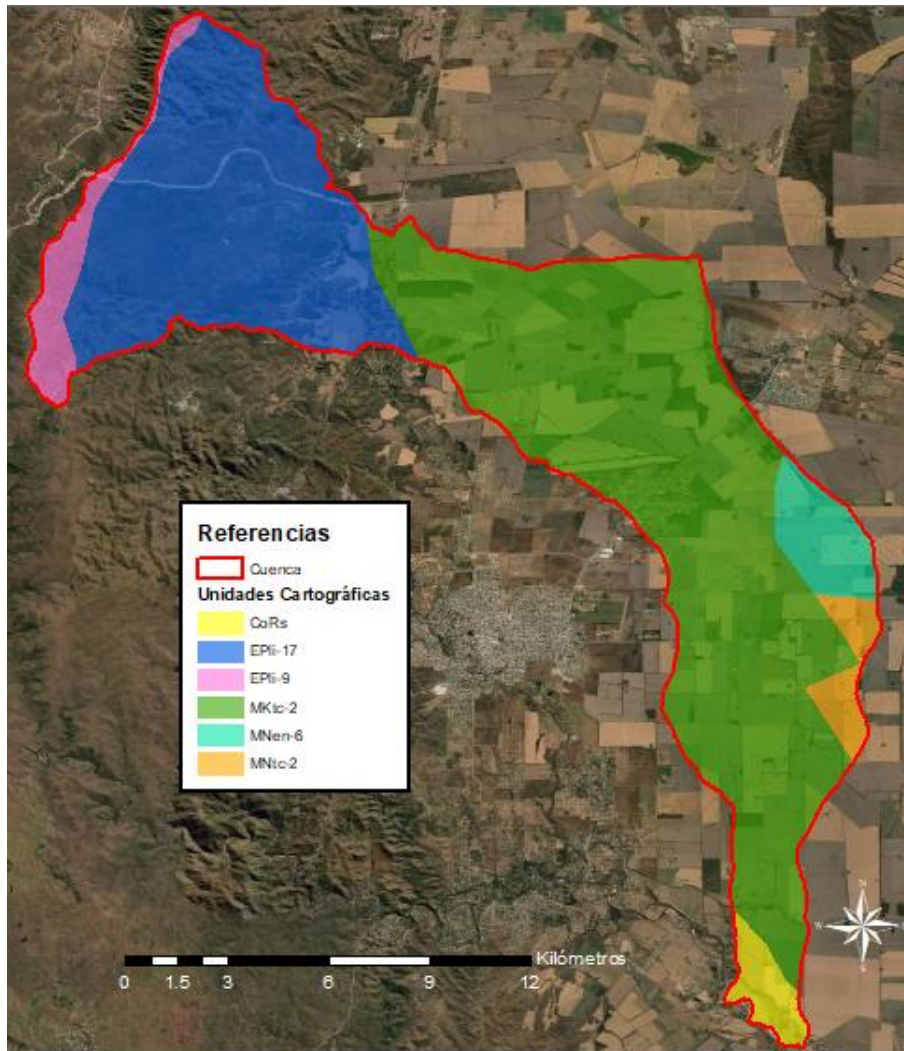


Figura 10. Unidades cartográficas del área en estudio, escala del relevamiento 1:500000.

A continuación, se detallan las características de las mismas:

- **Unidad Cartográfica CoRs**

Índice de productividad de la unidad: 5

Aptitud de uso: Clase VI.

Fisiografía: Derrames fluviales del Río Xanaes.

Suelos: La Unidad es un Complejo.

Está compuesta por:

- Suelos indiferenciados areno sódicos 100%. Imperfectamente drenado; profundo (+ de 100 cm); moderadamente salino; sódico en el subsuelo.

Índice de productividad del suelo individual: 5

Limitantes:

*Drenaje imperfecto; el suelo permanece mojado por importantes lapsos de tiempo.

*Salinidad moderada; afecta el crecimiento de gran parte de los cultivos.

*Sodicidad fuerte; alta degradación física de los suelos, sólo permite el crecimiento de algunas plantas muy tolerantes.

- **Unidad Cartográfica EPlI 17**

Índice de Productividad: 5

Aptitud de Uso: VII

Fisiografía: Sierras Chicas, sector oriental.

Suelos: La unidad es un Complejo.

Está compuesta por:

- Suelos de laderas escarpadas (Ustorthent lítico y paralítico) 40%. Excesivamente drenado, algo somero (75-50 cm); areno franco en superficie; areno franco en el subsuelo; moderadamente pobre en materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; muy fuertemente inclinado o colinado (>10%); extremadamente pedregoso; alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 1

Limitantes:

*Muy baja capacidad de retención de humedad

*Poco espesor; permite el desarrollo radicular hasta 0,75 m de profundidad.

*Pendiente fuerte.

*Alta pedregosidad/rocosidad; impracticable el uso de maquinaria agrícola.

*Alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

*Ligera susceptibilidad a la erosión eólica.

• Suelos de laderas muy colinadas (Ustorthent lítico) 30%. Excesivamente drenado; muy somero (- de 25 cm); areno franco en superficie; areno franco en el subsuelo; pobre en materia organica; moderada capacidad de intercambio; muy fuertemente inclinado o colinado (>10%); muy pedregoso; alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad individual del suelo: 1

Limitantes:

*Muy baja capacidad de retención de humedad

* Muy poco espesor; permite el desarrollo radicular hasta 0,50 m de profundidad.

*Pendiente fuerte.

*Moderada pedregosidad/rocosidad; interfiere o imposibilita el uso de maquinaria agrícola.

*Alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

- Suelos de vallecitos (Haplustol fluventico) 10%. Algo excesivamente drenado; profundo (+ de 100 cm); franco en superficie; franco en el subsuelo; bien provisto de materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; moderadamente inclinado (1,1- 3,5 %); pedregoso; ligera erosión hídrica; moderada susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad individual del suelo: 45

Limitantes:

*Baja capacidad de retención de humedad.

*Pendiente suave.

*Ligera pedregosidad/rocosidad; interfiere el uso de maquinaria agrícola.

*Erosión hídrica ligera; necesidad de prácticas ocasionales de control.

*Moderada susceptibilidad a la erosión hídrica.

*Ligera susceptibilidad a la erosión eólica.

- Roca (30%)

- **Unidad Cartográfica EPLi-9**

Índice de Productividad: 1

Aptitud de Uso: VII

Fisiografía: Sierras Chicas, laderas occidentales de falla.

Suelos: la unidad es un Complejo.

Está compuesta por:

- Suelos de laderas y pendientes escarpadas (Ustorthent lítico y paralítico) 50%. Excesivamente drenado, algo somero (75-50 cm); areno franco en superficie; areno franco en el subsuelo; pobre en materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; muy fuertemente inclinado o colinado (>10%); muy pedregoso; alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 1

Limitantes:

*Muy baja capacidad de retención de humedad

*Poco espesor; permite el desarrollo radicular hasta 0,75 m de profundidad.

*Pendiente fuerte.

*Alta pedregosidad/rocosidad; interfiere o imposibilita el uso de maquinaria agrícola.

*Alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

- Suelos de laderas muy escarpadas (Ustorthent lítico) 20%. Excesivamente drenado, muy somero (- de 25 cm); areno franco en superficie; areno franco en el subsuelo; pobre en materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; muy fuertemente inclinado o colinado (>10%); muy pedregoso; alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 1

Limitantes:

*Muy baja capacidad de retención de humedad

*Poco espesor; permite el desarrollo radicular hasta 0,50 m de profundidad.

*Pendiente fuerte.

*Moderada pedregosidad/rocosidad; interfiere o imposibilita el uso de maquinaria agrícola.

*Alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

• Roca 30%

- **Unidad Cartográfica MKtc-2**

Índice de productividad de la unidad: 61

Aptitud de uso: Clase III.

Fisiografía: Depresión periférica, valles longitudinales.

Suelos: La Unidad es una Asociación.

Está compuesta por:

- Suelos de planos suavemente deprimidos (Argiustol típico) 70%. Bien drenado; profundo (+ de 100 cm); franco en superficie; franco arcillo limoso en el subsuelo; bien provisto de materia orgánica; alta capacidad de intercambio; ligeramente inclinado (1-0.5%); ligera erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 72

Limitantes:

*Erosión hídrica ligera; necesidad de prácticas ocasionales de control.

*Ligera susceptibilidad a la erosión hídrica.

- Suelos de pendientes moderadas (Haplustol éntico) 30%. Algo excesivamente drenado; profundo (+ de 100 cm); franco limoso en superficie; franco limoso en el subsuelo; moderadamente bien provisto de materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; moderadamente inclinado (3.5-1.1%); moderada erosión hídrica; moderada susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 34

Limitantes:

*Baja capacidad de retención de humedad.

*Pendiente suave.

*Erosión hídrica moderada; necesidad de prácticas anuales de control.

*Moderada susceptibilidad a la erosión hídrica.

- **Unidad Cartográfica MNen-6**

Índice de productividad de la unidad: 58

Aptitud de uso: Clase III.

Fisiografía: Pampa loésica alta, lomas onduladas.

Suelos: La Unidad es una Consociación

Está compuesta por:

- Suelos de lomadas (Haplustol éntico;) 100%. Bueno a algo excesivamente drenado; profundo (+ de 100 cm); franco limoso en superficie; franco limoso en el subsuelo; moderadamente bien provisto de materia orgánica; moderada capacidad de intercambio; ligeramente inclinado (1-0.5%); ligera erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 58

Limitantes:

*Baja capacidad de retención de humedad.

*Erosión hídrica ligera; necesidad de prácticas ocasionales de control.

*Ligera susceptibilidad a la erosión hídrica.

*Ligera susceptibilidad a la erosión eólica.

- **Unidad Cartográfica MNtc2**

Índice de productividad de la unidad: 24

Aptitud de uso: Clase IV.

Fisiografía: Piedemonte Sierra de Las Peñas.

Suelos: La Unidad es una Consociación.

Está compuesta por:

- Suelos de pendientes pronunciadas (Haplustol típico) 100%. Bien drenado; profundo (+ de 100 cm); franco arenoso en superficie; franco en el subsuelo; moderadamente bien provisto de materia orgánica; moderada capacidad de

intercambio; fuertemente ondulado (10-3.5%); severa erosión hídrica; alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Índice de productividad del suelo individual: 24.

Limitantes:

*Pendiente moderada.

*Erosión hídrica grave; imprescindibles prácticas permanentes de control.

*Alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

*Ligera susceptibilidad a la erosión eólica.

A continuación, en la Tabla 3, se puede observar el área de ocupación (en hectáreas y en porcentaje) de cada unidad cartográfica presente en la cuenca.

Tabla 3. Superficie y participación relativa de cada Unidad Cartográfica.

Unidad Cartográfica	Superficie (ha)	Participación (%)
CoRS	384,87	2,3
EPLi 17	5130,88	30,6
EPLi 9	686,68	4,1
MKtc-2	9451,41	56,4
MNen-6	701,76	4,2
MNtc-2	412,69	2,5
Total	16768,29	100,0

4.4 VEGETACIÓN

La vegetación original corresponde a dos unidades fitogeográficas, el Espinal (Luti et.al, 1979; Ragonese, 1967; Parodi, 1964) en las zona media y baja de la cuenca, y el distrito Chaqueño Serrano (Cabrera, 1976) en la parte alta de la misma.

El primero, es un gran ecotono entre las provincias chaqueña y pampeana. Las prácticas forestales y agropecuarias han llevado a la desaparición de gran parte de los bosques de esta región, aunque algunas áreas remanentes aisladas y de poca extensión han permitido reconstruir, muy escasamente, las características del bosque que la constituía. Los relictos que aún se encuentran de la vegetación original están formados por bosques bajos, de algarrobo blanco y algarrobo negro como especies dominantes. En el sector septentrional suelen estar acompañadas por quebracho blanco, mistol, itín y chañar. Las cactáceas son menos abundantes que en el bosque chaqueño y corresponden a los géneros *Opuntia*, *Cereus*, *Gymnocalycium* y *Harrisia*.

En los sitios en los que las actividades agrícolas han sido abandonadas se presentan pastizales dominados generalmente por especies de la región pampeana. En los contactos de esta región con la zona serrana, se observan especies típicas de las montañas bajas. A lo largo de los cauces de algunos ríos y otros ambientes relativamente húmedos, aparecen: sauce criollo, sauce mimbre, saúco, tala falso, cina-cina.

Pasando al Distrito Chaqueño Serrano (Cabrera, 1976), la vegetación se distribuye a lo largo del gradiente altitudinal formando pisos o "zonas de vida", aunque esa secuencia de pisos está casi totalmente modificada por la actividad antrópica. Las

diferencias de altitud determinan cambios en la vegetación que se manifiestan con la aparición de especies típicas (Luti et al., 1979).

Algunas especies de árboles de la planicie, como quebracho blanco, algarrobo blanco, espinillos, chañar y tala, ascienden por las quebradas y fondos de valles hasta altitudes propias de la vegetación serrana, mezclándose con ésta en un ecotono de difícil delimitación.

Entre los 500 m y 1300 m.s.n.m., se desarrolla el "bosque serrano" en forma discontinua y con distintas fisonomías debidas a diferencias de exposición, a la heterogeneidad propia de esos ambientes y a las alteraciones provocadas por las actividades humanas. El bosque serrano está dominado por molle (*Lithrea molleoides*), coco, que generalmente se distribuyen como individuos aislados y orco quebracho o quebracho de las sierras. En el estrato arbustivo dominan especies espinosas del género *Acacia* como espinillos, aromitos, garabatos, piquillín de las sierras y manzano del campo. En lugares abiertos y pedregosos encontramos carqueja y carquejilla, aromáticas como peperina y tomillo. Los chaguares, bromeliáceas de hojas de bordes espinosos, forman matas sobre las rocas, también se presentan numerosas cactáceas de vistosas flores y trepadoras, epífitas y hemiparásitas. El estrato herbáceo aparece en forma discontinua. Las especies más frecuentes son los helechos como doradilla, acompañados por numerosas dicotiledóneas herbáceas y gramíneas.

A medida que se asciende, los elementos del bosque serrano van disminuyendo en tamaño y en densidad, confundiéndose con el matorral serrano o romerillal. Por arriba de las comunidades de bosque y matorral serranos, a partir de los 1.000

metros de altitud, se presentan los pastizales y bosquecillos de altura. Los pastizales varían su composición de acuerdo con la altitud. En los sectores más bajos (entre 1.000 m y 1.500 m.s.n.m.) predominan especies de linaje chaqueño, mientras que a partir de los 1.800 m.s.n.m. casi la mitad de las especies son de linaje andino - patagónico. Los pastizales y pajonales a menor altitud están dominados por *Festuca hieronymi* y distintas especies de *Stipa*, como *S. tenuissima*, *S. filiculmis*, *S. Tricótoma*, entre otras. A mayor altitud las especies dominantes en los pastizales son *Deyeuxia hieronymi*, *Festuca tucumanica* y paja de puerto, mientras que en los céspedes de pastoreo se presenta yerba de la oveja, *Carex fuscula* y *Muhlenbergia peruviana* como algunas de las especies más importantes.

A modo de cierre, vale la pena aclarar, que en la zona media/baja de la cuenca la vegetación original ha sido altamente modificada y fragmentada, ya que encontramos en esa zona suelos destinados casi en su totalidad a la producción agrícola. En la parte alta, perteneciente a la región del Bosque Serrano, todavía se conserva en gran parte la cobertura y vegetación, aunque en la mayoría de los casos, esta intervenida por pastoreo para la producción ganadera.

4.5 ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE INTERÉS

Dentro de las grandes cuencas de la provincia de Córdoba, esta pequeña cuenca pertenece a la Cuenca del Río Segundo o Xanaes (Fig. 11). De hecho, todo el límite norte y gran parte del límite este, es el límite entre las cuencas de Río Xanaes y del Río Suquía.

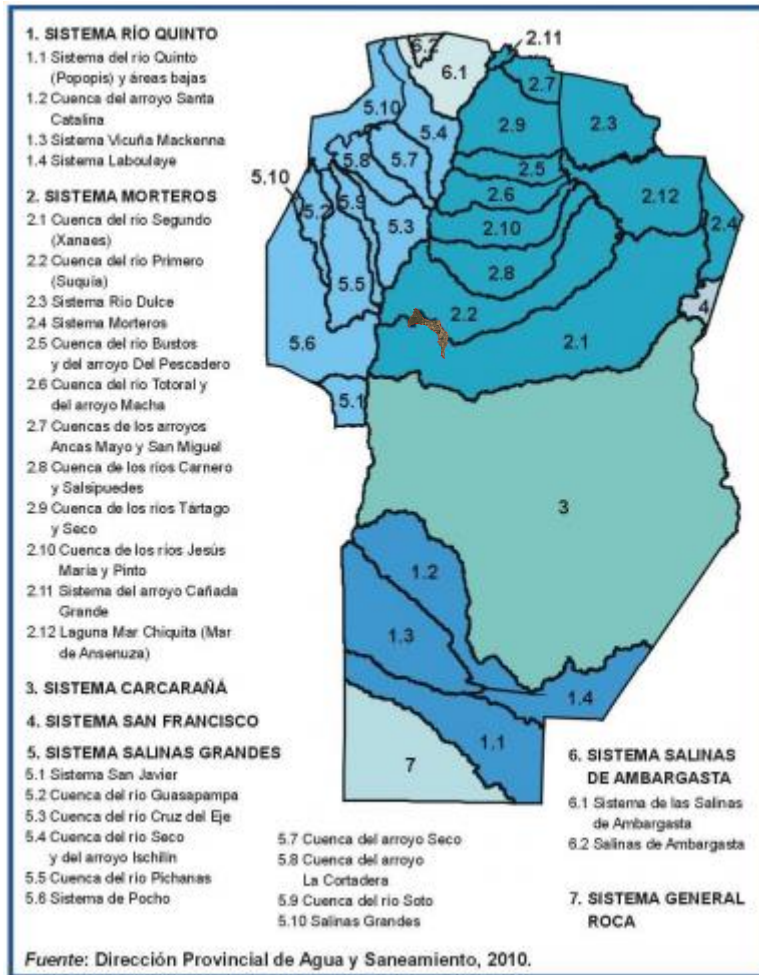


Figura 11. Cuencas hidrográficas de la provincia de Córdoba y ubicación de la cuenca en estudio.

Con relación a la cuenca del Río Segundo, el río homónimo también llamado Xanaes, nace de la confluencia del río Los Molinos y el Río Anizacate, en la Sierra Grande. Su curso, de mayor longitud que el Primero, sigue paralelo a él. El río Segundo se origina como tal a partir del Embalse Los Molinos, recibiendo posteriormente como afluentes, a los ríos San Agustín y Anizacate, punto a partir del cual corre en un cauce único sobre terreno llano. En todo este trayecto el río tiene una dirección hacia el E-NE.

La cuenca superior, serrana, está representada por los diversos afluentes que nacen en la Cumbre y la Pampa de Achala. Como ejemplos, pueden citarse los ríos del Medio, de los Reartes y de los Espinillos, que desembocan en el Embalse Los Molinos. Al norte de la cuenca se presentan los ríos La Suela y San José, cuya confluencia da origen al Río Anizacate. A partir de Villa del Rosario, el río se conecta con diversos brazos, originados por disminución de la pendiente que formó embanques, y con cañadas, como la de Los Chañaritos y el bañado del Manantial que, con recorrido sur-norte llega hasta la laguna Plata, inmediata a Mar Chiquita.

Al sur de Villa del Rosario, y en cierto modo independiente del cauce principal del río Segundo, se hallan las cañadas de Corralito y arroyo Álvarez y, más al sur y con curso paralelo al Segundo, corren los ríos Las Junturas y Calchín, los cuales se pierden en cañadas que luego se prolongan de sur a norte en grandes extensiones como las de Sacanta, de las Víboras, Mala Cara y Cabeza del Buey. Estas tres últimas parecen reunirse más al norte en la cañada de la Encrucijada, ocasionando grandes perjuicios, cuando desbordan, en las localidades de El Tío, Jeanmarie y Devoto. A partir de la localidad de Arroyito, el río Segundo tuerce hacia el norte, dirigiéndose hacia Mar Chiquita, donde desemboca, a través de la cañada de Plujunta- parcialmente canalizada- divagando también por el río de los Guevara.

La pendiente longitudinal del río Segundo presenta valores considerables que llegan en el tramo Potrero de Garay - Los Cerrillos a 11,6 m/km, disminuyendo luego hasta la confluencia con el Río Anizacate, punto de entrada a terreno llano. Los ríos del área de aporte al Segundo tienen régimen irregular, con máximos caudales en verano, durante la época lluviosa, pudiéndose producir fuertes torrentes. Durante la

época de sequía sus caudales merman considerablemente, lo que propició la construcción del Embalse Los Molinos, cuya función es la obtención de energía eléctrica y el abastecimiento para riego (Lucano et al, 2007).

En el área de estudio, no se encuentra ningún curso de agua superficial permanente, salvo el mismo río Xanaes (Segundo) en el límite sur de la misma.

4.6 ASPECTOS SOCIO ECONÓMICOS RELEVANTES

En el área perteneciente a la cuenca en estudio, la mayor superficie se encuentra destinada a la producción agropecuaria. En la parte alta de la cuenca, zona de sierra, principalmente a la producción ganadera, mientras que a medida que se va bajando y los suelos los permiten, la actividad cambia a producción agrícola extensiva, y algunos escasos establecimientos de producción animal intensiva porcina y aviar. En la misma predominan los cultivos anuales como soja, maíz, sorgo, entre otros. También, y como fenómeno creciente, se encuentran emprendimientos de desarrollo inmobiliario de envergadura, en algunos casos vinculados al turismo.

Los actores que habitan y circulan en la cuenca están casi en su totalidad relacionados de una u otra manera a la producción agropecuaria. Encontraremos productores agropecuarios, arrendatarios, técnicos relacionados a la producción, consorcios camineros, asociaciones de productores, vendedores de insumos para el agro, pobladores en general, turistas, etc.

Tal como se dijo anteriormente, dentro del área de la cuenca encontramos parte de las comunas de Villa del Prado y Dique Chico.

5 DIAGNÓSTICO: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROBLEMÁTICAS

Entre los procesos naturales que ocasionan situaciones de inestabilidad y deterioro en los suelos como así también en los bienes públicos y privados, se destacan los escurrimientos superficiales y las inundaciones provocadas por aquellos. Tal como se explicó en la introducción y luego del análisis de la información antecedente descripta, resulta evidente que la generación de escurrimientos y consecuente erosión hídrica es un problema importante en la cuenca en estudio.

Las causas de las esorrentías superficiales son muy variadas. Desde el propio relieve del área como condicionamiento natural que hace a su dinámica superficial, hasta las acciones antrópicas que modifican, en muchos casos severamente, las condiciones naturales de las cuencas.

Asimismo, el desconocimiento de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del suelo, ha generado en el curso del tiempo, planificaciones inadecuadas que se evidencian en la localización de infraestructura edilicia (urbana e industrial) en lugares naturalmente inundables, como así también la construcción de infraestructura vial sin las obras de canalización y desagüe acordes con el potencial hidrológico de las cuencas hídricas (Serenó et al., 1997). Este panorama se agrava en zonas rurales en las que no se ha priorizado la implementación de prácticas conservacionistas.

Se observa en las últimas décadas, una clara tendencia hacia los monocultivos, particularmente soja, baja tasa de rotación y pérdida muy elevada de montes naturales, situaciones que, en conjunto, sumadas a la carencia de programas

integrales conservacionistas, provocan una notoria disminución de la infiltración de las aguas de lluvia en los suelos y consecuentemente, un aumento de los caudales de escorrentía superficial que impactan progresivamente en la degradación de los suelos (Mengo et al., 2020).

El área de la cuenca Villa del Prado – Bajo Chico, no escapa a esta realidad.

Esto se pudo comprobar durante la elaboración del presente trabajo, gracias a la ocurrencia de un evento particular, una tormenta ocurrida durante la madrugada del día 7 de enero del 2024, la cual dejó como saldo inundaciones y evacuados en la localidad de Villa del Prado, con numerosos daños materiales para la localidad y sus pobladores, la ruta provincial N°5 cortada, red vial secundaria y terciaria de la zona totalmente afectada por deterioros en sus caminos, numerosos daños por erosión en los campos (creando o profundizando surcos y cárcavas), zonas con acumulación de los sedimentos erosionados, alcantarillas tapadas con el rastrojo que transporto el agua, entre otros (Fotografía 1, 2, 3, 4). La situación fue informada con preocupación por varios medios locales (Fig. 12).

REGIONALES

José Ludueña: “Hay evacuados que hemos trasladado al Polideportivo, Centro Cultural y Dispensario”

enero 7, 2024 / mivalle

Lo dijo el presidente comunal de Villa del Prado tras el temporal.

El temporal de este sábado a la noche de lluvia, viento y piedra afectó a gran parte de la provincia de Córdoba, y en Santa María otra de las localidades afectadas fue Villa del Prado.

En diálogo con Mi Valle, el presidente comunal José Ludueña, dijo: “Tenemos muchas casas con agua. En barrio Mitimay las calles son un río, la ruta se desbordó. Del lado de Villa del Prado, del lado del polideportivo, son alrededor de unas 40 casas con agua adentro”, manifestó; y agregó: “Tenemos evacuados. Nuestro centro de evacuados es el Polideportivo, Centro Cultural y Dispensario” señaló.

En la localidad trabajan ETAC, DC de Villa del Prado, Policía Ciudadana y personal de la comuna.

Figura 12. Recorte de noticia del 7 de enero de 2024 informando el estado de situación de la localidad luego de la tormenta, anunciando la ubicación del centro de evacuados, entre otros (Fuente: Mi Valle Medios).



Fotografía 1. Calles, terrenos y casas inundadas en Villa del Prado. Observar el rastrojo de maíz dentro de la vivienda (Fuente: Mi Valle Medios).



Fotografía 2. Calle inundada en barrio Mitimay. Personal del ETAC trabajando en la zona (Fuente: Mi Valle Medios).



Fotografía 3. Cunetas inundadas y desbordadas en la Ruta Provincial N°5 (Fuente: Mi Valle Medios).



Fotografía 4. Calles, terrenos y casas inundadas en Villa del Prado (Fuente: Mi Valle Medios).

A continuación, se presentan algunas fotografías tomadas en una recorrida a campo que se realizó ese mismo día, para tomar registro de las consecuencias del problema. Vale la pena aclarar que las fotos fueron tomadas alrededor de 12 horas después de finalizada la tormenta. Aun así, se puede observar cómo sigue pasando agua de escurrimiento, su color oscuro cargada de sedimentos producto de la erosión ocasionada en los campos, daños a cultivos en emergencia y crecimiento, como así también el arrastre de rastrojos y posterior taponamiento del alcantarillado, entre otros (Fotografía 5 a 23).



Fotografía 5. Cuneta y casa inundada sobre RP N° 5.



Fotografía 6. Camino rural intransitable llegando a la ruta C-45, funcionando como canal (todavía corría agua por el centro). Se observa rastrojo de maíz sobre el camino.



Fotografía 7. Salida de alcantarilla sobre RP N° 5, con descarga hacia el barrio Mitimay de Villa del Prado (se ve la calle inundada).



Fotografía 8. Alcantarilla sobre RP N° 5, prácticamente obstruida por rastrojo arrastrado por el agua.



Fotografía 9. Esguerrimiento saliendo de campo sobre la RP N° 5, donde se observa el color oscuro del agua, arrastre de rastrojo y daños en el cerco.



Fotografía 10. Mismo lugar que la Fotografía 8, vista lateral.



Fotografía 11. Cuneta sobre RP N° 5 llegando a Villa del Prado, a su máxima capacidad con signos de haber sido desbordada.



Fotografía 12. Casa inundada sobre RP N° 5 llegando a Villa del Prado. Todavía salía agua del parque de la casa.



Fotografía 13. Acumulación de agua de escurrimiento sobre RP N° 5 llegando a Santa Ana (fuera de la cuenca, pero muy cerca). Observar la dimensión de la laguna formada.



Fotografía 14. Misma laguna que Fotografía 12, donde se pueden observar daños a los cultivos recién implantados.



Fotografía 15. Misma laguna que Fotografía 12, donde se puede observar la enorme cantidad de rastrojo arrastrado por el agua.



Fotografía 16. Cunetas sobre ruta C-45 con acumulación agua y rastrojo.



Fotografía 17. Esguerrimiento saliendo de un predio industrial sobre ruta C-45, con dirección al alcantarillado.



Fotografía 18. Alcantarilla sobre ruta C-45, vista aguas abajo, donde se pueden observar daños por erosión en surcos en el lote.



Fotografía 19. Daños por erosión en surcos en lote aguas abajo, misma ubicación que Fotografía 17.



Fotografía 20. Cuneta y lote agrícola anegado sobre ruta C-45, donde se pueden observar daños en los cultivos y alambrados.



Fotografía 21. Cuneta y lote agrícola anegado sobre ruta C-45.



Fotografía 22. Lote anegado sobre ruta C-45, con gran acumulación de rastrojo en superficie (una capa de alrededor de 40/50 cm).



Fotografía 23. Lote anegado sobre ruta C-45, con daños a los cultivos, acumulación de rastrojo y ramas de árboles.

Bajo el contexto anterior, ilustrado por las fotografías, queda clara la necesidad de lograr gestionar correctamente la cuenca.

Usualmente, una salida posible frente a esta dificultad es la elaboración de planes de manejo del agua y el suelo para las cuencas, materializados en lo que se conoce como Planes Básicos de Cuenca. El problema es que en muchos casos, esos planes no sientan bases o criterios para la elaboración de programas de gestión que permitan implementar el plan elaborado anteriormente, es decir, no proponen cómo, por dónde, en qué zona, en qué plazos, con qué prioridades, etc. deberían implementarse las prácticas de manejo y conservación sugeridas en ese plan.

Esto resulta una dificultad importante para los actores intervinientes en la cuenca como productores agropecuarios, técnicos y profesionales, habitantes o pobladores,

etc., pero por sobre todo para los entes gubernamentales (que cuentan con responsabilidades y poder de acción sobre las cuencas) pero que al momento de tratar de implementar esos planes a través de políticas públicas para el sector, carecen de un criterio o lineamiento a seguir para su implementación.

Frente a esta problemática surge el interrogante de pensar de qué manera o con qué criterios técnicos, se podría llevar adelante ese programa. De este modo, es que surgió la inquietud, de evaluar a la erosión hídrica potencial y posterior zonificación por zonas homogéneas de erosión hídrica potencial, como herramienta para la gestión de cuencas. De esta manera se espera que la misma sirva como criterio útil, presente en los Planes Básicos, para la elaboración a posteriori de esos programas de gestión, permitiendo la identificación de zonas en donde las actividades y prácticas de manejo, deberán ser prioritariamente planificadas y ejecutadas.

Para lograr el objetivo general propuesto en este trabajo, se hizo una caracterización topográfica de la cuenca, se definió la red de drenaje principal y se delimitaron las subcuentas intervinientes. Luego a continuación, se realizó la determinación de la erosión hídrica potencial en el área, y su posterior zonificación por Zonas Homogéneas de Erosión Hídrica Potencial (ZHEHP). Una vez realizada la zonificación, se la evaluó a través del impacto hidrológico que tenía la aplicación de algunas prácticas de conservación de suelos (terrazas y canales de desagüe), en función de las diferentes ZHEHP delimitadas. Para esto se establecieron distintos escenarios que fueron simulados y modelados de manera de poder compararlos.

6 DESCRIPCIÓN TOPOGRÁFICA DE LA CUENCA

Para la caracterización y estudio de la topografía de la cuenca, se utilizaron diversos modelos digitales de elevación (MDE). Se trabajó con cuatro de ellos, con diferentes resoluciones espaciales y/o diferentes fuentes de elaboración. Dos de ellos fueron MDE SRTM pero de distintas resoluciones espaciales, uno de 90m x 90m y otro de 30m x 30m. Los dos restantes fueron obtenidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y son los MDE-Ar, con resolución espacial de 30m x 30m y de 5m x 5m.

Los MDE de menores resoluciones espaciales, 90 y 30 m, fueron útiles porque no diferencian detalles menores del relieve que pueden modificar la topografía o la hidrología (bosques, rutas, edificaciones, etc.). Por el contrario, el MDE-Ar de 5m se utilizó para identificar alteraciones que los anteriores no lograban identificar. Es así entonces, que el mejor análisis se pudo realizar gracias a la integración y comparación de todos los modelos, según la zona de la cuenca de la que se trate.

Los análisis y procesamientos de los MDE se realizaron con el software ArcMap 10.6.1 y 10.8.2.

En la Fig. 13 se visualiza un mapa de curvas de nivel con una equidistancia de 5 m, y el límite de la cuenca.

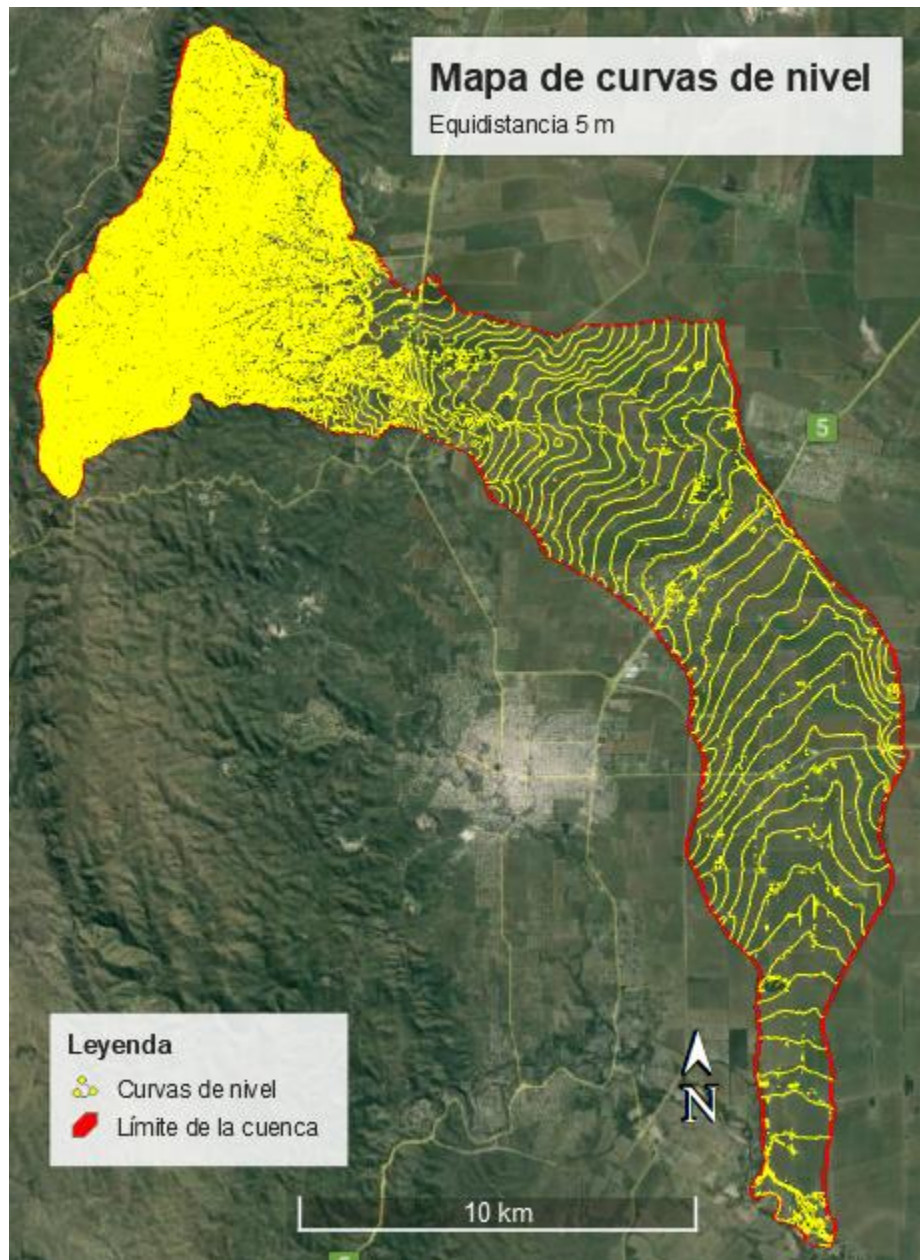


Figura 13. Mapa de curvas de nivel (Eq: 5 m) y límite de la cuenca en estudio.

Del análisis de las curvas de nivel (Fig. 13), se puede interpretar que el relieve es sumamente heterogéneo. Lo que resalta en primera instancia (Fig. 14), es la zona de sierra donde las pendientes son elevadas (>15%), luego se pasa por una zona de transición de pie de sierra con pendientes algo menores (alrededor del 5,0%). En este lugar, se puede observar cómo algunas lomas o divisorias que bajan de la

sierra se prolongan dentro de los suelos agrícolas. También se puede observar claramente como en esta zona norte de la cuenca, pero ya en suelos agrícolas, los límites o divisorias de la misma son muy marcados, con valores de pendiente elevados (2,0/3,0 o 4,0%), que disminuyen a medida que uno se ubica en el centro de la cuenca o valle (0,8/1%). A medida que nos alejamos de la parte más alta pasando a la zona sur de la cuenca, las pendientes en la zona central de valle van bajando (0,6/0,7 %), mientras que en los límites o divisorias todavía se observan valores de pendientes moderados (2,0/3,0 %). Ya en cercanías a la desembocadura de la cuenca y el Río Xanaes, nos encontramos con una zona bastante plana (0,5%).

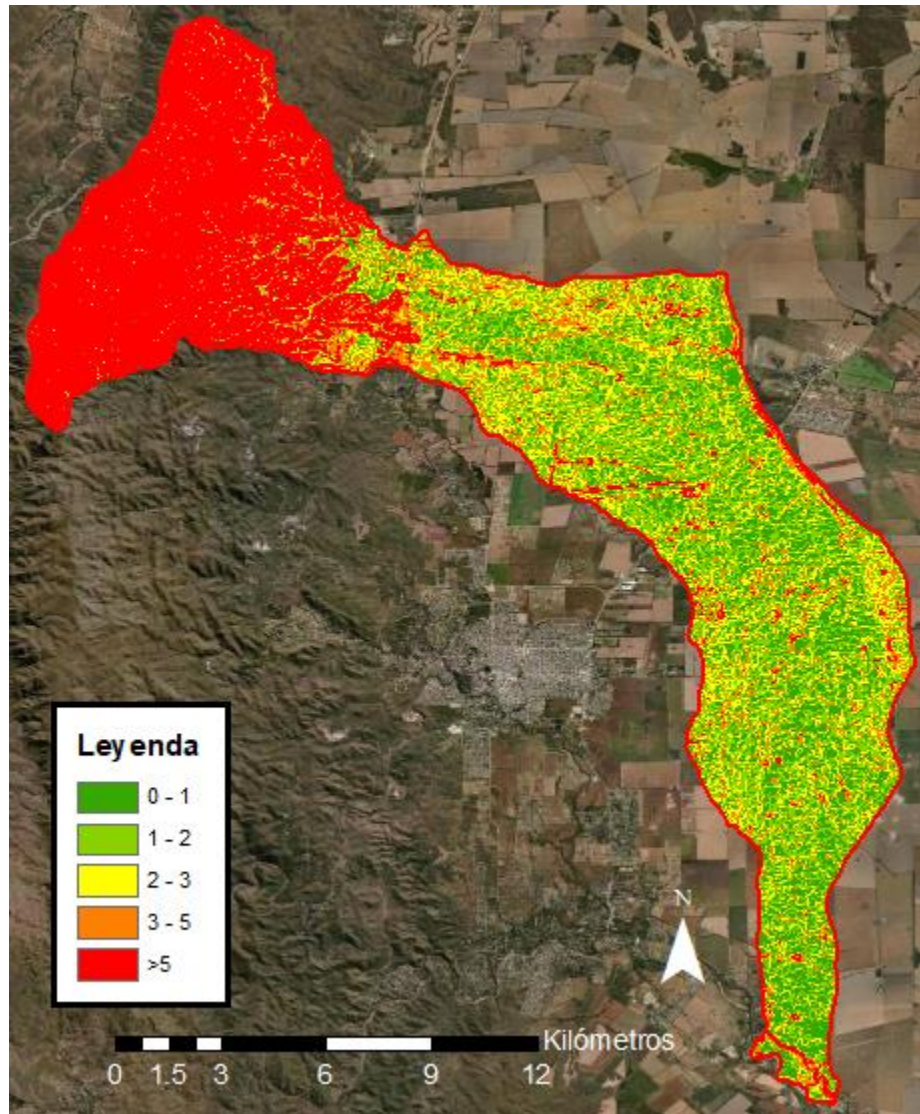


Figura 14. Mapa de pendientes de la cuenca (en porcentaje).

7 DEFINICIÓN DE RED DE DRENAJE PRINCIPAL

Para esta labor se utilizaron los cuatro MDE nombrados anteriormente, teniendo en cuenta las virtudes y desventajas de cada uno de ellos. Como se dijo anteriormente los DEM de menores resolución (30mx30m y 90mx90m) permiten generar redes hídricas más acordes a la situación “natural” de la cuenca, debido a que son sensibles solamente a los macro relieves presentes en el área y no así a los micro relieves, normalmente alteraciones antrópicas. Por otra parte, el DEM de mayor

resolución (5mx5m) reconoce meso y micro relieves, como así también es más sensible a alteraciones de origen antrópico como caminos, cortinas forestales, límites de campos, etc., obteniendo así redes de drenaje más acordes a la situación “actual” de la cuenca.

En este contexto, vale la pena aclarar que ninguno de los DEM utilizados, permitió obtener una red de drenaje de calidad aceptable o representativa en toda la extensión de la cuenca, sino que dependiendo de la zona, unos u otros generaban errores, por lo que se optó por la siguiente metodología. Luego de construir las cuatro redes de drenaje, se fueron contrastando y comparando entre ellas, junto a un proceso intenso de fotointerpretación de imágenes satelitales, y análisis del relieve a través de mapas de curvas de nivel con distintas equidistancias. Es así entonces que éstas se fueron ajustando y se logró construir la red de drenaje principal que se presenta a continuación en la Fig. 15.



Figura 15. Mapa de la red de drenaje principal de la cuenca Villa del Prado - Dique Chico.

La red de drenaje anterior fue corroborada con algunas recorridas a campo o in situ, que permitieron evacuar dudas de algunos puntos en los que aún no había claridad sobre la dirección de los escurrimientos. En esas mismas recorridas fue que se pudo relevar la ubicación del alcantarillado en la red vial primaria (C-45, RP5, C-45

nuevamente), para identificar los principales pasos de agua, aunque no se relevaron sus dimensiones.

Una de esas recorridas, fue efectuada el día de la tormenta nombrada anteriormente. Con esta recorrida se pudieron evacuar algunas dudas sobre la hidrología de la cuenca, además de tomar registro de las consecuencias de un fenómeno climático de esta envergadura.

A continuación, las Fotografías 24 a 30 muestran algunas alcantarillas y pasos de agua sobre red vial primaria luego de la tormenta nombrada anteriormente.



Fotografía 24. Alcantarilla sobre RP N° 5, con descarga directamente hacia lotes y edificaciones en barrio Mitimay.



Fotografía 25. Alcantarilla sobre ruta C-45, obstruida por sedimentación y vegetación.



Fotografía 26. Batería de alcantarillas sobre ruta C-45, aguas abajo.



Fotografía 27. Alcantarilla sobre ruta C-45.



Fotografía 28. Alcantarilla sobre ruta C-45 vista aguas abajo, donde se observan graves daños por erosión en cárcavas.



Fotografía 29. Cuneta sobre ruta C-45 con una gran acumulación de rastrojo obstruyendo una alcantarilla.



Fotografía 30. Alcantarilla sobre ruta C-45, obstruida por sedimentación, vegetación y rastrojo.

Para terminar, vale la pena aclarar que las recorridas a campo efectuadas se consideran suficientes para esta instancia académica, pero que para la elaboración de un estudio más profundo, por ejemplo un Plan Básico definitivo, se deberían intensificar las recorridas y observaciones a campo para poder identificar correctamente cualquier desvío de los escurrimientos, sobre todo por los caminos rurales y la regulación que puedan generar éstos a través de su alcantarillado.

8 DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS

Una vez definida la red de drenaje principal e identificadas las divisorias de agua, se procedió a la delimitación de las cuencas con el software ArcMap. Las subcuencas se definieron teniendo en cuenta aquellas estructuras que funcionan como reguladoras de escurrimientos en la red vial primaria (C-45, RP5). Es a partir de estos puntos que se delimitaron 9 subcuencas como se puede observar en la siguiente Fig. 16, y cuyas características se describen en la Tabla 4.

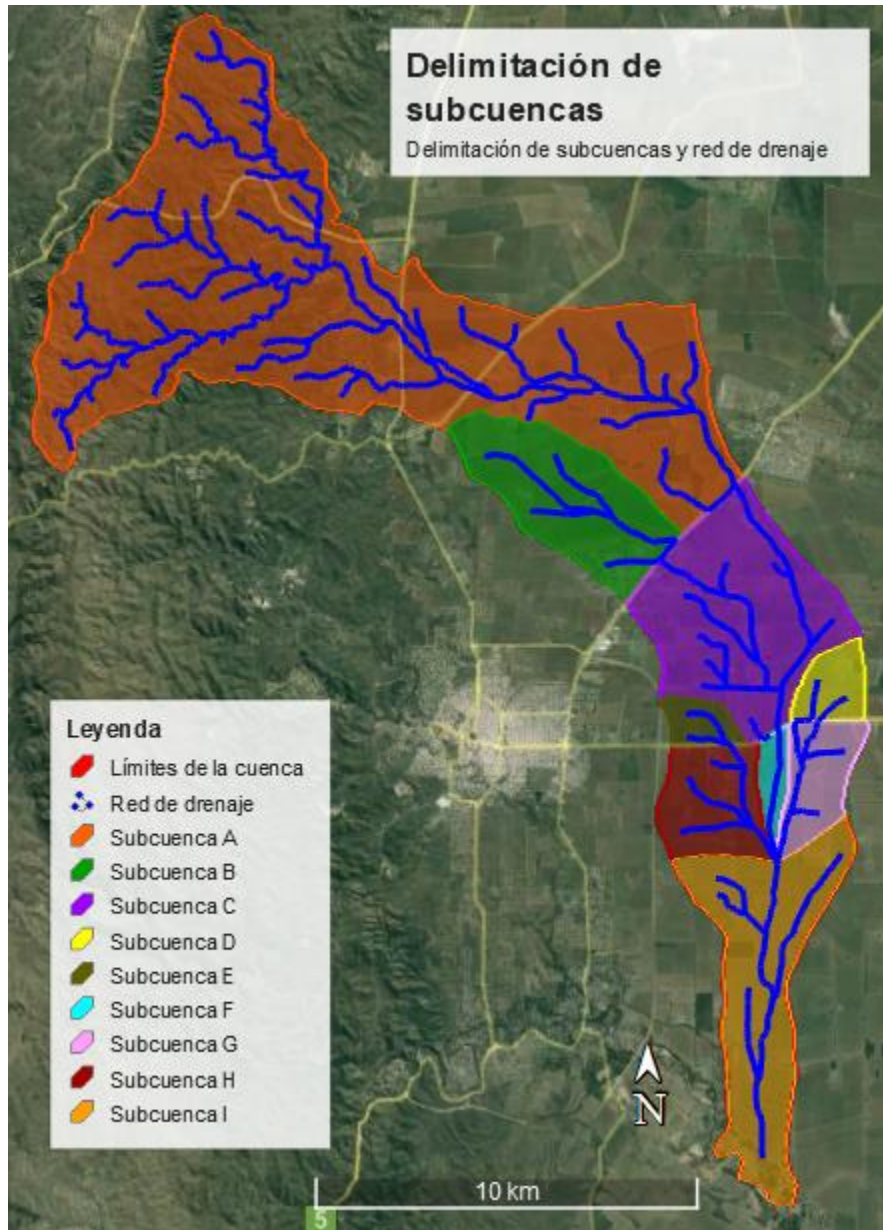


Figura 16. Mapa con la delimitación de subcuencas de la cuenca Villa del Prado - Dique Chico.

Tabla 4. Denominación, superficie y participación relativa de las subcuencas que integran la cuenca Villa del Prado – Dique Chico

Nombre	Superficie (ha)	Participación (%)
Subcuenca A	9095	54,26
Subcuenca B	1414	8,44
Subcuenca C	2236	13,34
Subcuenca D	315	1,88
Subcuenca E	202	1,21
Subcuenca F	203	1,21
Subcuenca G	538	3,21
Subcuenca H	749	4,47
Subcuenca I	2011	12,00
Total cuenca	16763	100,00

Como se puede observar, la subcuenca de mayor tamaño es la “A”, la cual incluye en su extensión a toda el área de sierra y pie de sierra.

9 DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Tal como se dijo anteriormente, la erosión hídrica es uno de los mayores problemas que enfrenta la agricultura en el área central de la provincia de Córdoba. La estimación de las pérdidas de suelo por este fenómeno es una información de suma importancia para la planificación y toma de decisiones a diferentes niveles.

Debido a que los procesos erosivos muestran variabilidad espacial, resulta útil diferenciar zonas con diversa susceptibilidad a esos procesos y de esta manera, reconocer aquellas que requieran de mayor atención en un plan gestión, manejo y conservación de suelos.

Para determinar las tasas de erosión del suelo muchos autores han desarrollado distintos modelos.

Dentro de estos modelos, los denominados “empíricos” se destacan por su amplia utilización. De todos ellos, el más usado ha sido el de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo – USLE (Universal Soil Loss Equation), desarrollada en el US Department of Agriculture en 1965 y modificada en 1978 (Wischmeier y Smith, 1978). En este trabajo se ha empleado el modelo USLE para estimar la erosión hídrica.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo evalúa principalmente la erosión laminar o erosión “entre surcos”, no así la erosión por escurrimiento o flujo concentrado, cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, 1988). Su bondad depende del rigor con que los factores que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox et al., 1994).

La USLE considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado de la interacción de factores naturales (lluvia, suelo y topografía) y del impacto de factores influenciados directamente por el hombre (uso y manejo de la tierra). A partir de los mismos, predice la tasa de pérdida de suelo en cualquier combinación de factores.

El método se fundamenta en la capacidad que poseen las lluvias para provocar erosión y en la resistencia natural de la tierra (Wischmeier y Smith, 1978). Es un método que se puede aplicar en cualquier región (de allí el término universal), ya

que considera los principales factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (precipitaciones, suelo, relieve, coberturas y prácticas de conservación). Además de predecir la erosión, permite realizar simulaciones con diferentes escenarios posibles modificando alguno de sus factores.

El modelo USLE utiliza seis factores para estimar la pérdida de suelos promedio (A): erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y gradiente de la pendiente (LS), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P).

El resultado depende del periodo de tiempo considerado en el factor R, generalmente un año. Entonces la pérdida de suelo se calcula como:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

A: es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R. Generalmente toneladas por hectárea por año ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).

R: es el factor de erosividad de las lluvias; representa los factores de lluvia y escurrimiento ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$). Se calcula a partir de la sumatoria anual de la energía de la lluvia en cada evento (E_c), que se encuentra correlacionada al tamaño de las gotas, multiplicado por su máxima intensidad en 30 minutos (I30).

K: es el factor susceptibilidad del suelo frente a la erosión ($t \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$). Representa la susceptibilidad del suelo y reconoce que sus propiedades físicas están

estrechamente relacionadas a las tasas de erosión. Cuantifica el carácter cohesivo de un tipo de suelo y su resistencia a desprenderse y ser transportado debido al impacto de las gotas de lluvia y al flujo superficial de agua.

LS: es el factor topográfico (adimensional) y establece la influencia del relieve en la erosión hídrica. Está conformado por el factor de largo de la pendiente (L) y el factor de gradiente de la pendiente (S).

C: es el factor de cobertura y manejo (adimensional); es la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho con labranza continua.

P: el factor de prácticas de conservación (adimensional), es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como por ejemplo cultivos en contorno, barreras vivas, cultivos en terrazas, etc., con respecto a cultivos realizados con labranzas en el sentido de la pendiente.

El factor más determinante dentro de la ecuación es el de erosividad (factor R), que mide la potencialidad de las lluvias para provocar erosión. Su acción es regulada en función de las características del relieve (longitud y grado de la pendiente, factor LS), de las propiedades del suelo (erodabilidad del suelo, factor K), del tipo de cobertura (factor C) y de las prácticas conservacionistas (factor P).

El valor de los tres primeros factores (R, K y LS) depende únicamente de las condiciones naturales del lugar y determinan la erosión hídrica potencial (EHP). Por otra parte, los valores de C y P pueden ser modificados por la acción del hombre.

Con el agregado de estos dos factores a la EHP se obtiene la Erosión Hídrica Actual (Fig. 17).

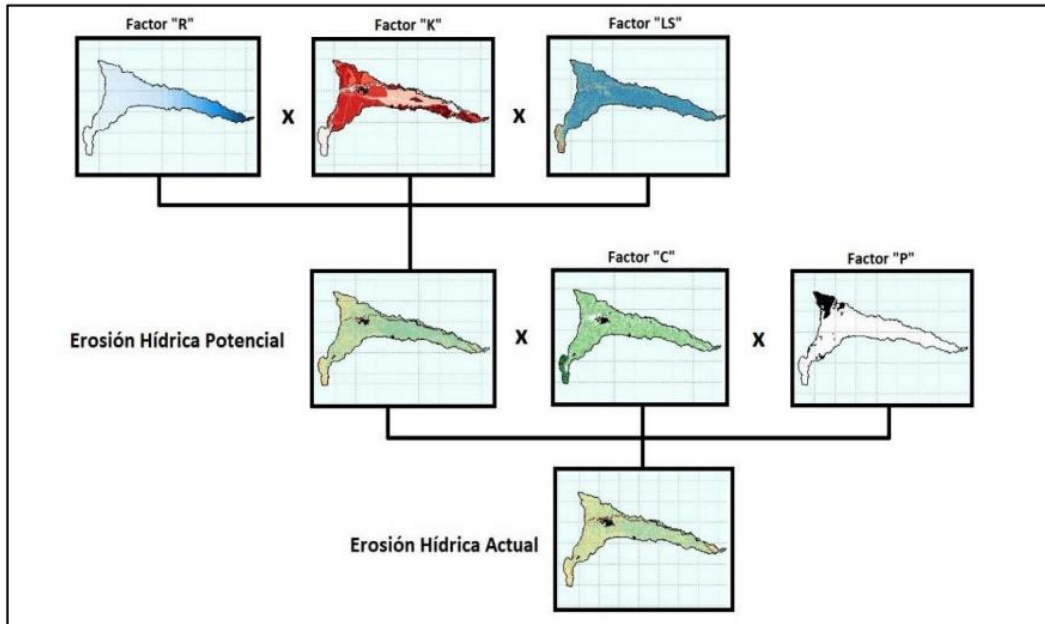


Figura 17. Diagrama de integración de los factores de la USLE (Fuente: Spalla M.,2021).

Atendiendo a los antecedentes descriptos, en este trabajo resultó de particular interés estimar la erosión hídrica potencial (EHP) en el área de la cuenca, con la intención o fin último de dividir el área total, en áreas homogéneas más pequeñas, con características similares de potencialidad de erosión.

Esto permitió identificar las zonas donde la potencialidad de erosión era mayor y, consecuentemente dónde las tareas, prácticas de conservación, asignación de recursos, implementación de políticas públicas, etc., deberán ser a futuro, prioritariamente planificadas y ejecutadas.

9.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La metodología utilizada para el cálculo de la EHP consistió en estimar los factores intervinientes en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), y luego haciendo uso de los sistemas de información geográfica (SIG) y álgebra de mapas, integrar los factores.

Para la determinación de cada uno de los factores de la USLE se siguió el siguiente procedimiento:

9.1.1 Factor R

Este factor, es difícil de calcular ya que es necesario contar con registros pluviográficos confiables que no siempre están disponibles.

En este caso particular, se hizo una revisión bibliográfica de diferentes autores que ya han estimado el factor para distintas localidades cercanas al área en estudio. Se recolectaron dos datos para la ciudad de Córdoba (Rojas y Conde, 1985) (Saluso, 2008), uno para la localidad de Rafael García (Ispizua Yamati et al., 2012) y dos mas provenientes de los Planes Básicos de cuenca de dos consorcios de conservación de suelo cercanos al área en estudio, Consorcio Paso del Puma (Mengo et al., 2020) y Consorcio Santa Rita.

Además, y de manera complementaria, se utilizó una metodología propuesta por Gaitán et al. (2017), en la cual el factor R es estimado a partir de la precipitación media anual (PMA) de una localidad.

En ese trabajo, se recopilaron datos del Factor R para 75 localidades de la República Argentina, calculados por Codromaz de Rojas et al. 1976, Codromaz de

Rojas y Conde 1985 y Codromaz de Rojas y Saluso 1988, de acuerdo a la metodología de cálculo original. Además, para cada localidad se obtuvo el valor de precipitación media anual (PMA) del “Atlas climático digital de la República Argentina” (Bianchi y Cravero, 2010). Para esas 75 localidades se encontró que la PMA era un buen estimador del factor R (Fig. 18), logrando obtener la siguiente ecuación:

$$\text{Factor R} = 0,2266 * \text{PMA}^{1,1289}$$

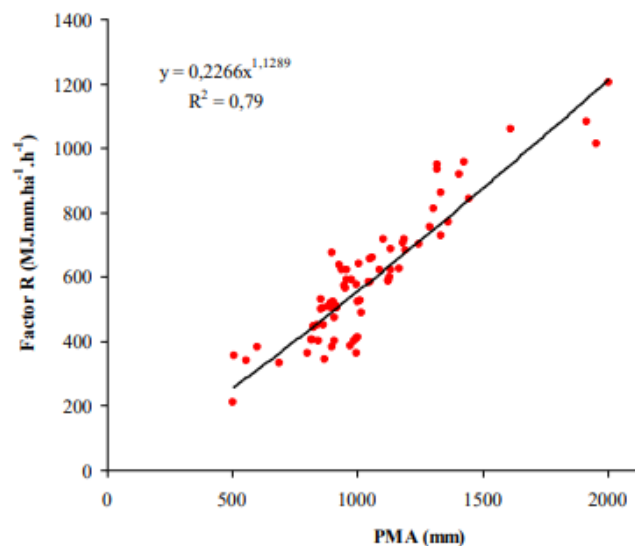


Figura 18. Relación entre la PMA y el factor R para 75 localidades de la República Argentina (Fuente: Gaitán et al, 2017).

Es así entonces, que se utilizó la ecuación anterior para obtener valores de R a partir de las PMA de distintas localidades cercanas al área en estudio (Córdoba, Despeñaderos, Falda del Carmen, Rafael García).

Por último, lo que se hizo fue contrastar y comparar los datos brindados por las fuentes bibliográficas, con los estimados a través de la PMA, observando que arrojaron valores similares, haciendo más confiable éstas últimas. Es así entonces,

que el factor R utilizado en este trabajo fue un promedio de todos los valores obtenidos (Fig. 19).

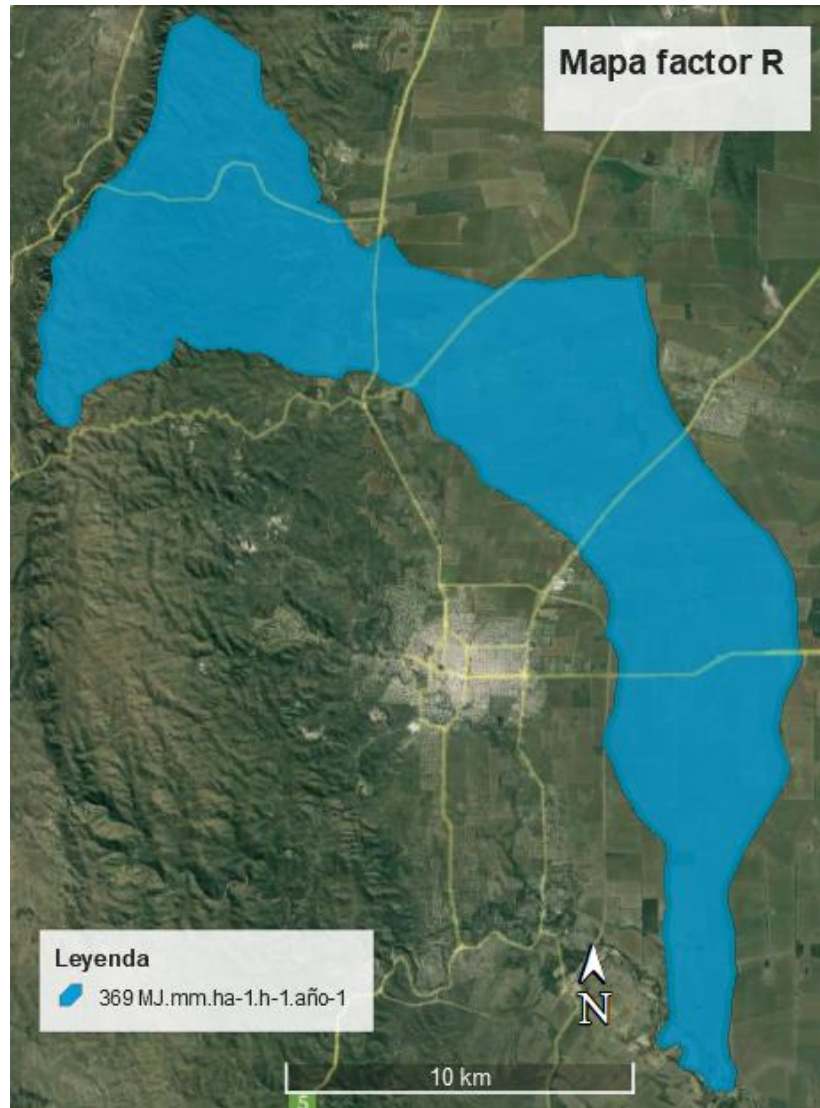


Figura 19. Mapa de Factor R de la USLE para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

9.1.2 Factor K

Para el cálculo del factor K, se considera el porcentaje de limos más arenas muy finas, porcentaje de arcillas, materia orgánica, estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo.

A través de la aplicación web INTA USLE-RUSLE, y a partir del mapa de unidades cartográficas (Fig. 10) y la descripción de los perfiles típicos asociados a cada unidad cartográfica, se calculó un valor de factor K para cada una de las unidades cartográficas presentes en el área en estudio (Fig. 20). En el caso de las unidades cartográficas con más de una serie asociada se calculó un “K” ponderado.

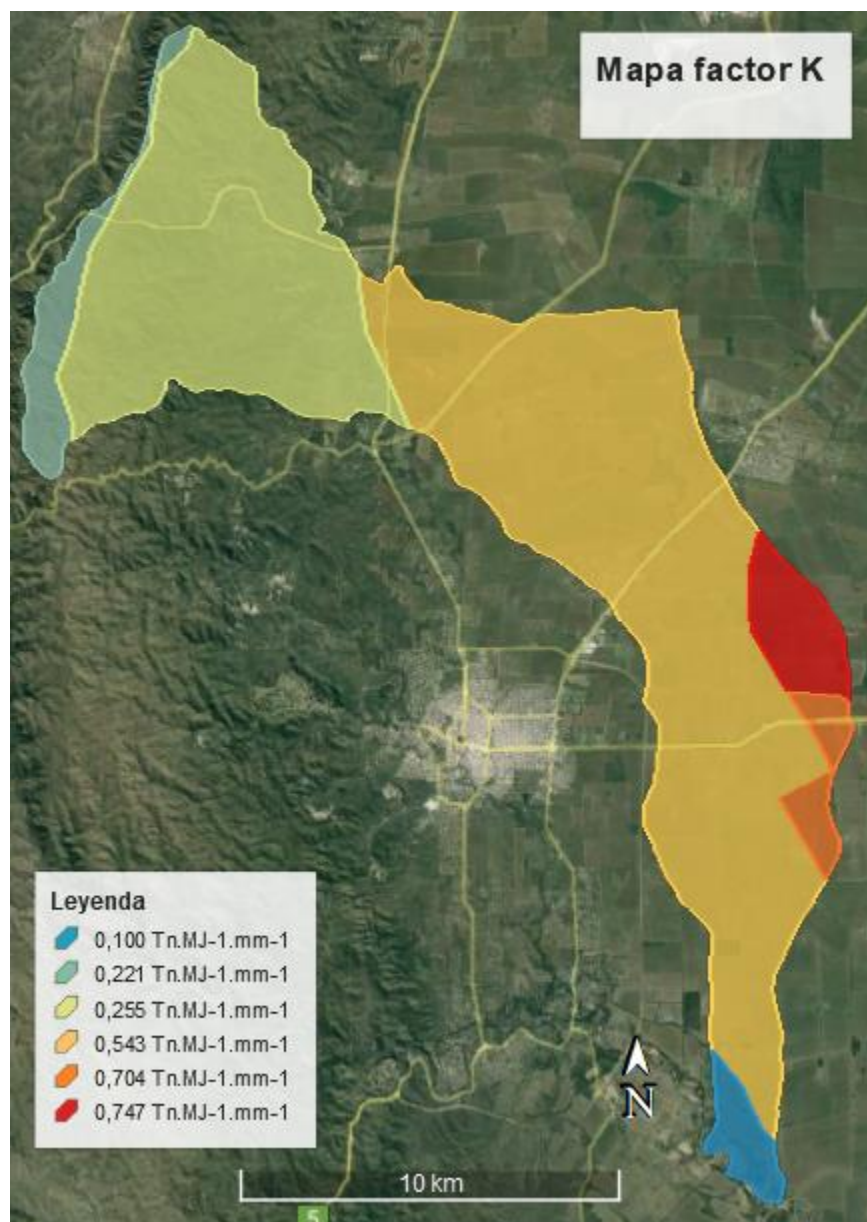


Figura 20. Mapa de Factor K de la USLE para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

Cabe destacar que la herramienta fue utilizada para suelos con menos del 70% de limo, ya que INTA Paraná desarrolló la aplicación a partir de datos medidos en parcelas experimentales con suelos de esa característica textural. Para suelos de mayor contenido de limo, se procedió de manera tradicional con el nomograma para la obtención del factor K (Spalla, 2021).

9.1.3 Factor LS

La influencia del relieve en la erosión hídrica se expresa en la ecuación USLE a través del factor topográfico, resultante de la combinación del gradiente de la pendiente (S) con la longitud de la pendiente (L).

A partir de los avances tecnológicos y la disponibilidad de los modelos digitales de elevación de la superficie terrestre, la ecuación original para el cálculo del Factor LS de Wischmeier y Smith (1978) ha sido modificada con la incorporación del impacto de la acumulación o convergencia de flujo (Moore et al., 1991, Desmet y Govers, 1996). En este trabajo, el factor se calculó con ambos métodos, para usar sus resultados de manera comparativa y complementaria. Se obtuvieron a través del uso del módulo Índices Topográficos del Análisis del Terreno (Terrain Analysis) del programa SAGA GIS.

La pendiente y el área de contribución específica se calcularon a partir del MDE-SRTM (Farr et al., 2006) con una resolución espacial de 3 arcseg ($\approx 90\text{m}$). Si bien para la zona de estudio se encuentran disponibles MDE de mayor resolución espacial (SRTM de 30m, MDE-Ar de 30m, MDE-Ar de 5m), se optó por trabajar con el de 90 m teniendo como base que, a mayor resolución espacial, el MDE resulta

más sensible a elementos presentes en la superficie (árboles, cultivos, construcciones, etc.), que se traducen en el mismo como barreras para el escurrimiento superficial, modificando también los valores de LS, no por un cambio en el terreno sino por un cambio en la elevación por la presencia de algún elemento puntual. Esta sensibilidad repercute más intensamente en zonas relativamente llanas debido a que los saltos abruptos en los valores de elevación que provocan estos elementos que no hacen a la topografía del terreno, contrastan con los cambios graduales correspondientes a pendientes de bajo gradiente (Thomas et al., 2015), incorporando en muchos casos un "ruido" no deseado (Gaitán et al., 2017).

Los mapas de factor LS obtenidos, se presentan a continuación en las Fig. 21 y 22. En los mismos se puede observar que los valores más altos de LS se corresponden con las sierras y pie de sierra, y con las principales divisorias y valles.

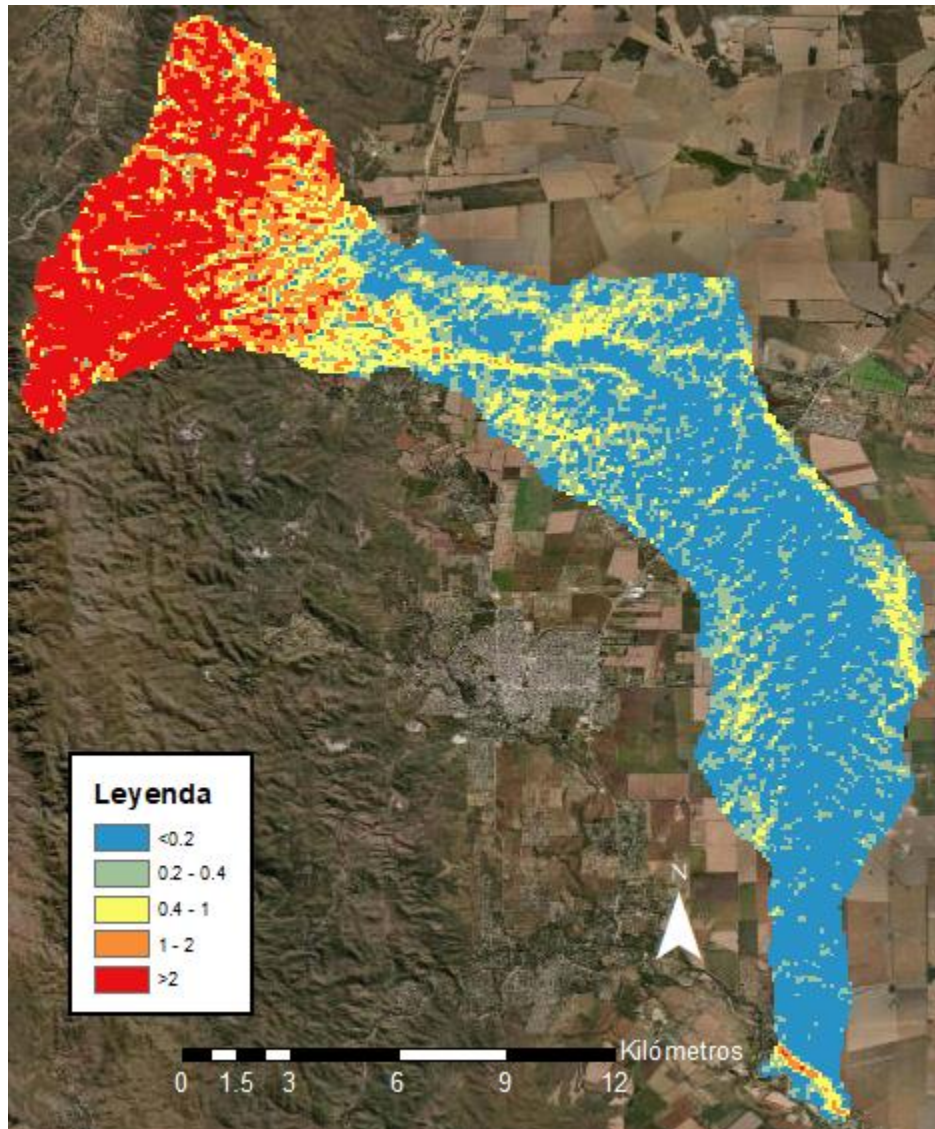


Figura 21. Mapa de Factor LS de la USLE, según Moore et al. 1991 para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

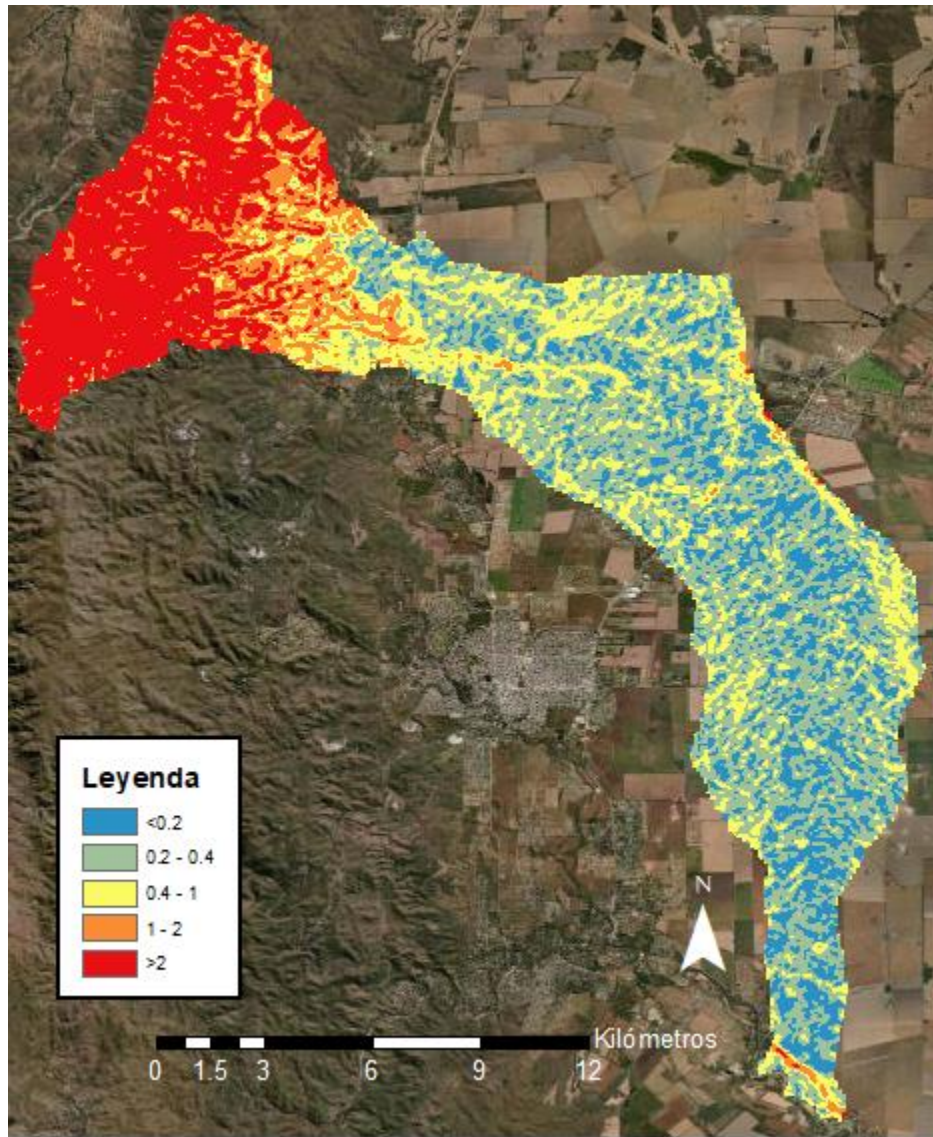


Figura 22. Mapa de Factor LS de la USLE, según Desmet y Govers 1996 para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

9.2 INTEGRACIÓN DE LOS FACTORES: DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL

Una vez obtenidos los factores “R”, “K” y “LS”, y a partir del software ArcMap 10.8.2 y álgebra de mapas, se realizó el producto de los mismos a fin de obtener los mapas de erosión hídrica potencial. Los mapas obtenidos, según ambos factores LS, se presentan a continuación en las Fig. 23 y 24.

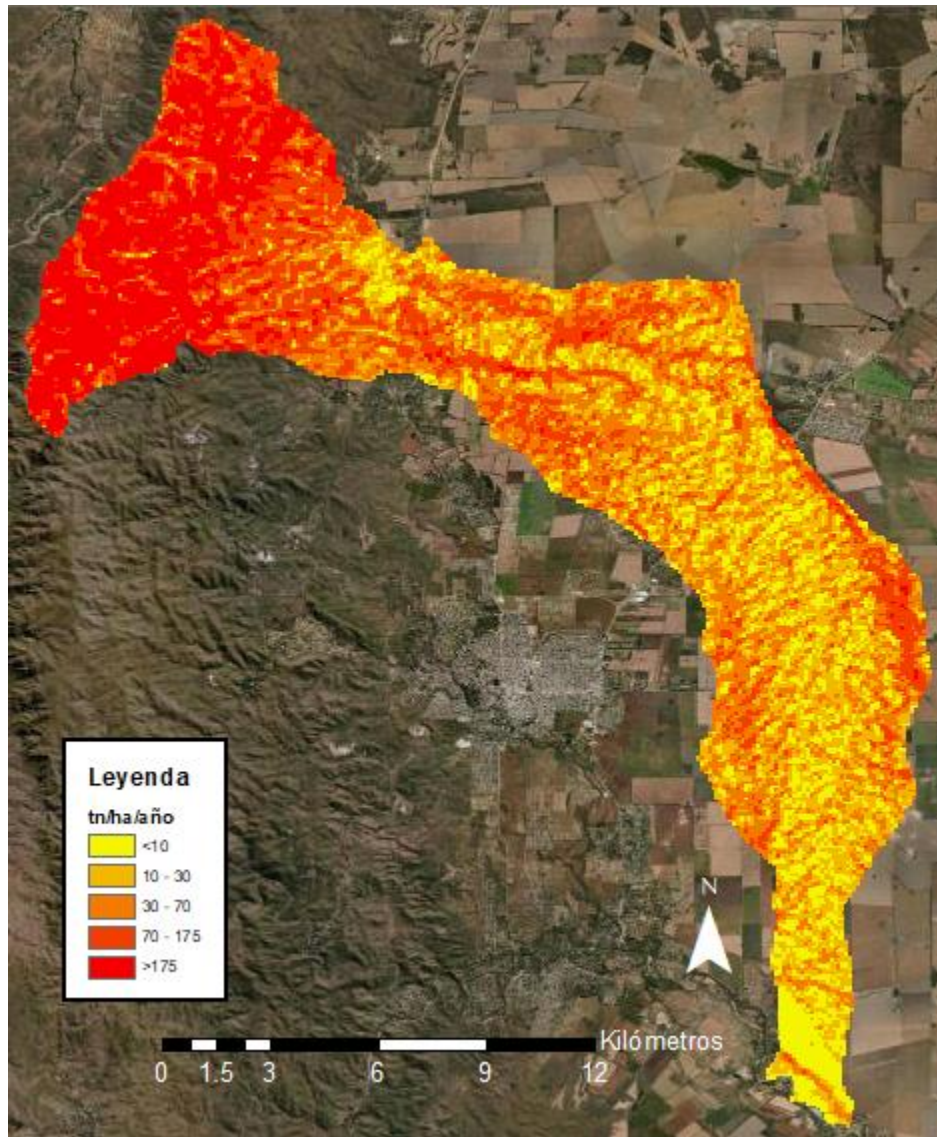


Figura 23. Mapa de Erosión hídrica potencial (con LS de Moore et al. 1991) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

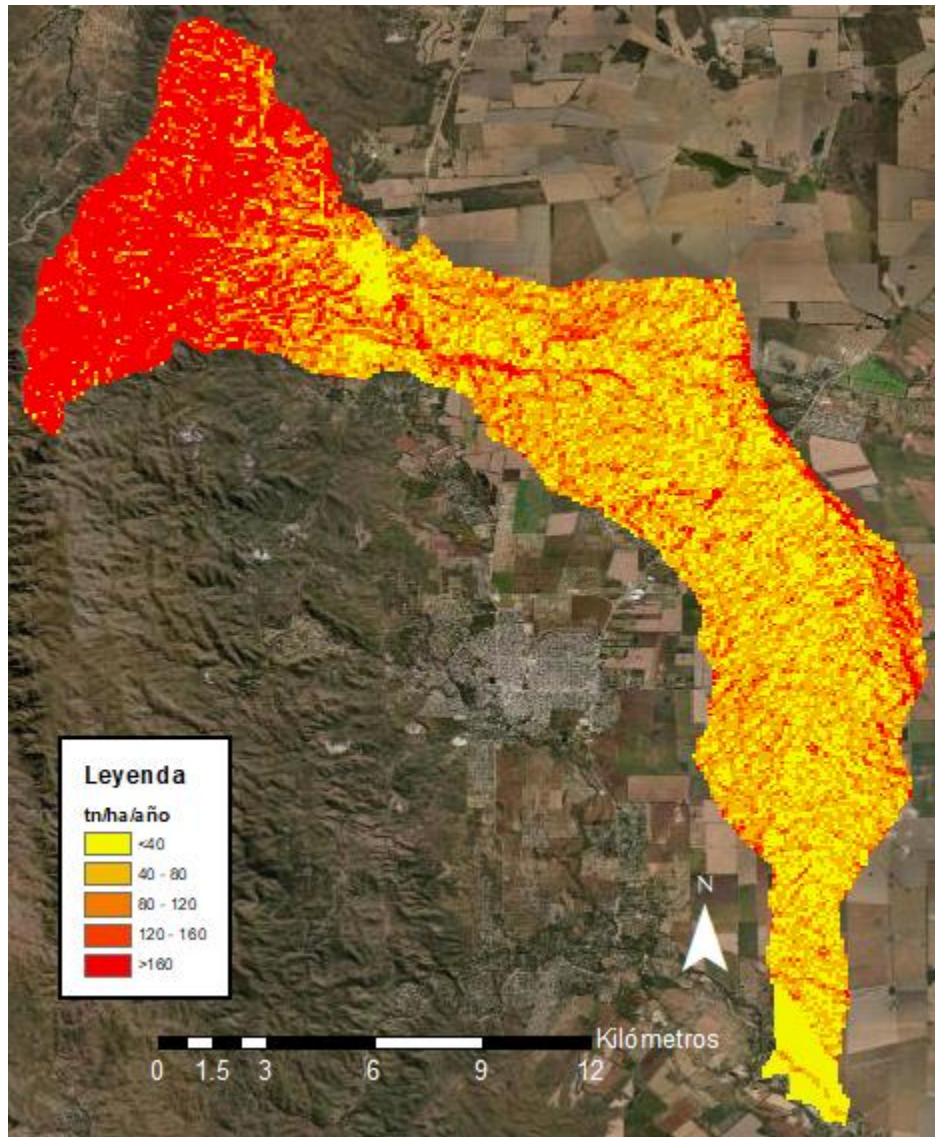


Figura 24. Mapa de Erosión hídrica potencial (con LS de Desmet y Govers 1996) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

Claramente se puede ver cómo la pendiente es el factor que modela los diferentes grados de erosión. Las pérdidas de suelo máximas se observan en el sector noroeste y hacia los límites o divisorias de la cuenca, coincidentes con los valores más importantes de pendiente.

10 DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RIESGO DIFERENCIAL DE EROSIÓN

A partir de los mapas de erosión hídrica potencial obtenidos, se procedió a identificar zonas homogéneas en cuanto a su susceptibilidad a la erosión. De esta forma, se dividió el área total de la cuenca en cuatro clases denominadas numéricamente Clase 1, 2, 3 y 4, en orden decreciente de potencialidad de erosión, siendo la Clase 1 la de mayor riesgo o potencial.

Para facilitar esta tarea se procedió de la siguiente manera. A cada uno de los mapas de EHP y a través de las cajas de herramientas de 3D Analyst y Spatial Analyst del software ArcMap 10.8.2, se realizó una serie de procesos o generalizaciones para “limpiar” los ráster y poder hacer un mejor análisis de los datos.

Los procesamientos realizados fueron: reclasificación (reclasifica o cambia los valores en un ráster), filtro mayoritario: (reemplaza las celdas en un ráster según la mayoría de sus celdas vecinas contiguas), refinado de límites (suaviza el límite entre zonas mediante la expansión y contracción del mismo), grupo de regiones (para cada celda en la salida, se registra la identidad de la región conectada a la que pertenece esa celda; se asigna un número único a cada región), extracción por atributos (extrae las celdas de un ráster según una consulta lógica), nibble (reemplaza las celdas de un ráster que corresponden a una máscara, con los valores de los vecinos más cercanos), entre otros.

Esto permitió obtener al final de esta serie de procesos, una capa vectorial en la cual se podía identificar y observar con mayor facilidad distintas zonas homogéneas.

En las Fig. 25 y 26 se observan de manera comparativa los mapas de EHP originales, y los mapas de EHP generalizados o “limpiados”.

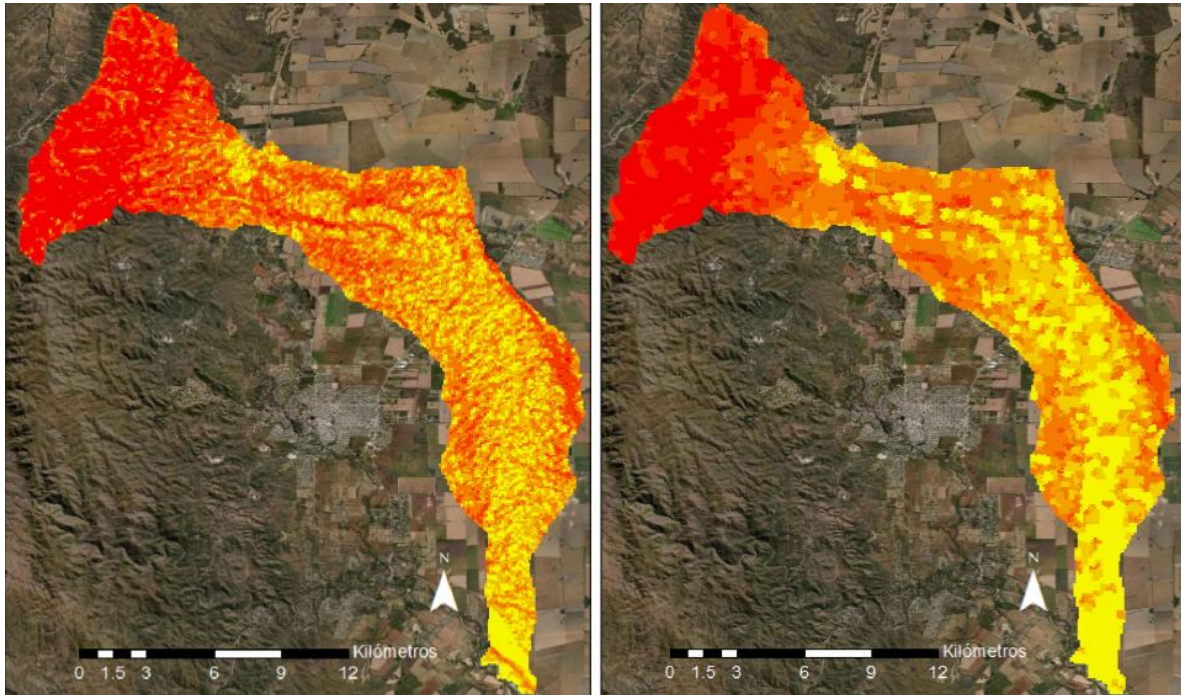


Figura 25. Mapa de Erosión hídrica potencial original con LS de Moore et al. 1991 (izquierda) y el mismo mapa generalizado (derecha) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

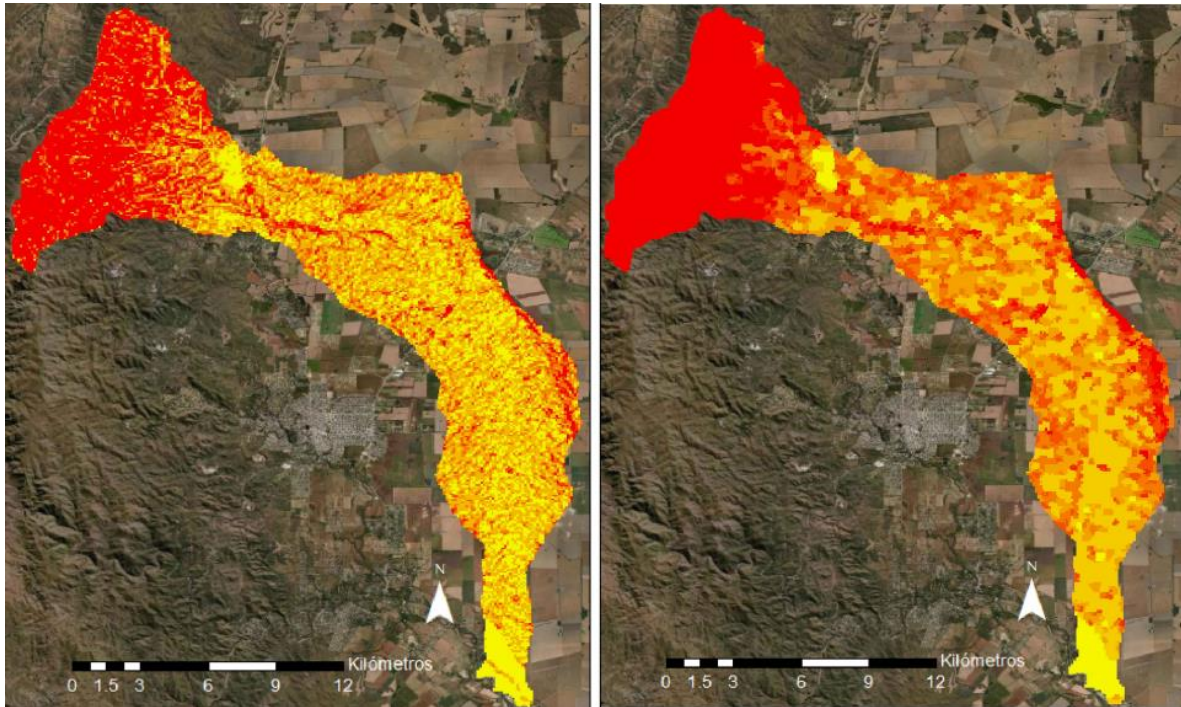


Figura 26. Mapa de Erosión hídrica potencial original con LS de Desmet y Govers 1996 (izquierda) y el mismo mapa generalizado (derecha) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

A partir de la observación, análisis crítico y comparativo de los mapas de EHP originales y los generalizados, se pudo discriminar y delimitar zonas homogéneas con potencialidad o riesgo diferencial de erosión, para los suelos agrícolas de la cuenca. En la Fig. 27 se puede observar lo zonificación lograda, y en la Tabla 5 se muestra por cada zona definida, la superficie involucrada y la participación relativa con relación al área total de la cuenca. Vale la pena explicitar, que estas áreas no tienen nada que ver con las superficies de las subcuencas de la Tabla 4.

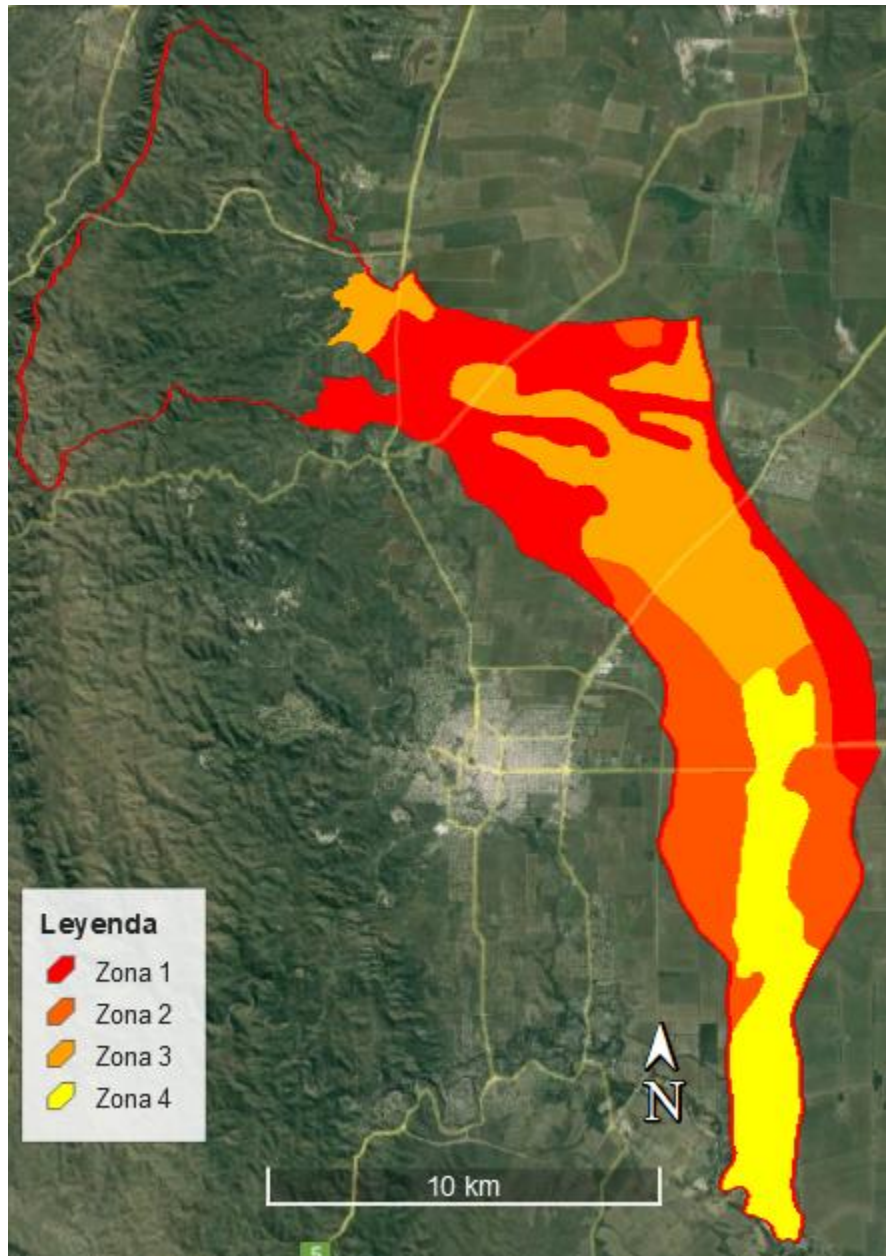


Figura 27. Mapa de zonas homogéneas de erosión hídrica potencial (ZHEHP) para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

Tabla 5. Zonas homogéneas de erosión hídrica potencial, superficie y participación relativa para la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

Zonas EHP	Superficie (ha)	Participación (%)
Sierra	5373	32,1
Zona 1	3452	20,6
Zona 2	2698	16,1
Zona 3	3058	18,2
Zona 4	2182	13,0
Total	16763	100,0

11 EVALUACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN POR ZHEHP COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE CUENCAS: METODOLOGÍA DE TRABAJO

Una vez obtenida la zonificación, el objetivo fue evaluarla como herramienta para la gestión de cuencas hidrográficas. Para lograr ese objetivo es que se propuso evaluar el impacto hidrológico que tenían algunas prácticas de conservación de suelos (terrazas y canales de desagüe), en función de las distintas ZHEHP delimitadas. Para esto se modeló el comportamiento hidrológico frente a tormentas máximas considerando cinco escenarios, partiendo desde la no implementación de las técnicas de conservación mencionadas, hasta la aplicación en toda el área de la cuenca, pasando por la incorporación paulatina de las prácticas en las distintas ZHEHP. Se definieron entonces los siguientes escenarios:

- Escenario 1: la totalidad de la cuenca sin sistematización de suelos (situación inicial).
- Escenario 2: la cuenca con sistematización de suelos en la Zona 1.
- Escenario 3: la cuenca con sistematización de suelos en la Zona 1 y 2.

- Escenario 4: la cuenca con sistematización de suelos en la Zona 1, 2 y 3.
- Escenario 5: la cuenca con sistematización de suelos en la Zona 1, 2, 3 y 4 (la totalidad de la cuenca).

Las modelaciones hidrológicas se realizaron con el programa HEC-HMS, versión 3.3.

11.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS DE CADA SUBCUENCA

Para cada una de las subcuencas se determinaron los parámetros morfológicos tales como el área (A), longitud del cauce principal (Lc), desnivel medio del cauce principal (H), pendiente media del cauce principal (Sc) y pendiente media de la subcuenca (Sa). Con esta información fueron calculados los parámetros hidrológicos como tiempo de concentración de las subcuencas (Tc) y tasa de infiltración del suelo (Tabla 6).

El tiempo de concentración (Tc) de una cuenca se define como el tiempo que precisa el escurrimiento superficial generado en el punto hidrológicamente más alejado de la cuenca, para llegar hasta el punto de salida de ésta. Existen diversos métodos para su estimación. En este caso, el método utilizado fue el de Ramser-Kerby:

$$T_c = 0,02 L_c^{0,77} S_c^{-0,385} + \left(\frac{2 \cdot n \cdot L_c}{S_o^{0,5}} \right)^{0,467}$$

En donde:

Tc = tiempo de concentración (min).

Lc = Longitud del cauce principal o línea de escurrimiento encauzado (m).

Sc = pendiente media del tramo encauzado (m/m).

Lo = longitud del escurrimiento sobre el terreno o flujo laminar (m).

So = pendiente media del plano de escurrimiento sobre el terreno (m/m).

n = coeficiente de rugosidad de Manning para flujo laminar.

Tabla 6. Parámetros morfológicos e hidrológicos de las subcuencas de la cuenca Villa del Prado – Dique Chico.

Subcuenca	Área (ha)	Longitud cauce principal. Lc (m)	Desnivel (m)	Pendiente cauce principal. Sc (m/m)	Pendiente media cuenca. So (m/m)	Tc (min)
A	9095	25045	541	0,0216	0,1500	224
B	1414	6850	67	0,0098	0,0161	124
C	2236	7100	46	0,0065	0,0117	148
D	315	2971	31	0,0104	0,0158	73
E	202	1846	31	0,0168	0,0132	50
F	203	3402	21	0,0062	0,0097	94
G	538	3912	23	0,0059	0,0127	103
H	749	3423	24	0,0070	0,0123	90
I	2011	7945	41	0,0052	0,0084	174

11.1.1 Elección de las tormentas de diseño

Las tormentas de diseño utilizadas para realizar una modelación hidrológica, deben tener un valor de precipitación histórica capaz de provocar una escorrentía elevada.

La determinación de esta lluvia implica definir en primera instancia su duración, la lámina caída durante ese período de tiempo y su distribución temporal y espacial para el tiempo de retorno elegido (Mengo et al., 2020).

Para definir las tormentas de proyecto en este trabajo, se optó por utilizar el Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias para diseño hidrológico (Catalini et al., 2021), disponible en Mapas Córdoba (Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba), utilizando para la modelación un tiempo de recurrencia de 10 años. El valor de precipitación máxima diaria adoptado fue de 109 mm/día.

Una vez definida esta lluvia máxima diaria, se desagregó según la ecuación de Sherman, y se construyó, a partir de estos datos, una curva I-D (Fig. 28).

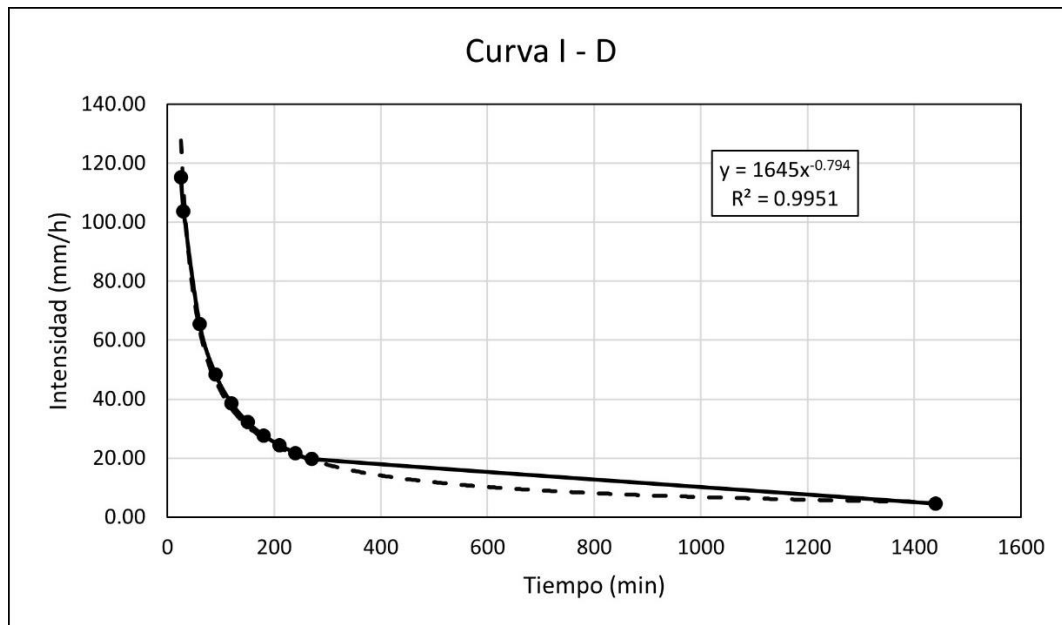


Figura 28. Curva I-D para PMD=109 mm/día, y tiempo de recurrencia de 10 años.

A partir de esta curva se obtuvo la intensidad media máxima en mm/h, para una duración igual al tiempo de concentración de cada subcuenca, proporcionando la lámina precipitada para cada una de las tormentas de proyecto.

En base a los tiempos de concentración calculados, se asignaron a las subcuencas los siguientes valores de precipitación para un tiempo de recurrencia de 10 años (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de lámina precipitada para los diferentes Tc de cada subcuenca.

Subcuenca	Tc (min)	Intensidad (mm/h)	Lamina (mm)
A	224	22	82,1
B	124	36	74,4
C	148	31	76,5
D	73	55	66,9
E	50	74	61,7
F	94	45	70,5
G	103	41	70,4
H	90	46	69,0
I	174	27	78,3

Las distribuciones temporales de las tormentas se hicieron de acuerdo a los patrones adimensionales de distribución interna (hietogramas de diseño, Fig. 8) que corresponden a zona centro, determinados a partir de la relación i-d-T de la localidad de Rafael García (Camaño Nelli y Dasso, 2005). Se eligieron los hietogramas para cada subcuenca en función de la duración de la tormenta proyectada.

11.1.2 Determinación del volumen de escorrentía. Método del Número de Curva

El Número de Curva (NC) es un método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos para determinar volumen de escorrentía. Es un modelo empírico, determinístico,

concentrado y de eventos, que está orientado principalmente a su utilización en el área de proyectos. No obstante, es empleado por diversos modelos hidrológicos orientados tanto a tareas de simulación como de diseño hidrológico (Luque, 2008).

Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, las que varían entre 0 y 100, donde un área con $NC = 0$ no tiene escurrimiento y otra con $NC = 100$ es impermeable y toda la precipitación genera escorrentía.

Es un método de fácil aplicación muy utilizado en cuencas rurales y contempla los siguientes parámetros:

- Uso del suelo (discrimina entre diferentes formas de aprovechamiento: monte, pastizal, distintos tipos de cultivos, etc.)
- Tratamiento o prácticas de manejo.
- Prácticas conservacionistas.
- Condición hidrológica (inclusión de rotaciones favorables)
- Características del suelo referidas a su capacidad de infiltración y producción de escurrimiento (textura, capas de diferente permeabilidad, etc.)
- Humedad antecedente (Antecedent Moist Condition); normal: AMC II. seca: AMC I ó húmeda: AMC III, cuyos límites dependen de la lámina de lluvia acumulada durante los 5 días previos al evento considerado (Luque, 2008).

11.1.2.1 Determinación de los NC utilizados para la modelación

Los valores de NC utilizados en la modelación se determinaron a partir de dos métodos o fuentes de información. En primer lugar, a través de valores de infiltración básica obtenidos en mediciones realizadas en el Consorcio de conservación de suelos Paso del Puma, colindante a la cuenca en estudio (a solo 6 Km aproximadamente) y con suelos muy similares. En segundo lugar, con registros de

eventos reales de lluvia-escorrentía (medidos a campo), que dispone el Grupo de Gestión Ambiental de Suelo y Agua de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC), en dos cuencas experimentales aforadas (una con y otra sin terrazas de desagüe), dentro del área del consorcio nombrado anteriormente. Estas cuencas experimentales se caracterizan por tener una pendiente del 1,2% y suelos franco-limosos. A su vez, la cuenca que se encuentra sistematizada posee terrazas paralelas de desagüe, espaciadas a 49 m.

Para el primer método lo que se hizo fue construir curvas de infiltración, mediante el modelo de Horton, para algunos valores de infiltración básica medidos en ese consorcio. Vale la pena aclarar que los datos de infiltración indicaron que los suelos corresponden a clase hidrológica C de acuerdo al método del número de curva del SCS. Luego se determinó la lámina neta escurrida para las tormentas de proyecto, mediante la superposición de los hidrogramas con las curvas de infiltración.

Por último, se calcularon los valores de NC (según la fórmula de Boughton, 1989) que ajustaban para cada relación lámina precipitada/lámina escurrida (lámina neta) de las tormentas utilizadas. A modo de ejemplo se muestran en la Tabla 8, los valores de NC calculados para cuatro tormentas de proyecto.

Tabla 8. Valores de lámina precipitada, lámina escurrida y Numero de Curva para cuatro de las tormentas de proyecto utilizadas.

Duración de la tormenta (min)	73	90	124	224
Lamina precipitada (mm)	66,9	69	74,4	82,1
Lamina escurrida (neta) para una infiltración básica de 12,7 mm/h	39	37,2	42,8	38
numero de curva calculado	89	87	87	81
Lamina escurrida (neta) para una infiltración básica de 22,0 mm/h	31,6	30	31,5	28,2
numero de curva calculado	84	82	83	75

En cuanto al segundo método utilizado, lo que se hizo fue calcular los NC (también según Boughton) para eventos lluvia-escorrentía de las cuencas experimentales nombradas anteriormente, en primer lugar, para la cuenca no sistematizada. Los valores calculados para distintos eventos fueron: 88,6;90,6,89,4;67,8;85,3 y 75,7, obteniendo un promedio de 83.

De la comparación e integración de los valores obtenidos a través de ambas metodologías se definió un NC para el área sin sistematizar de 82.

A continuación, se calculó el NC para los mismos eventos, pero en la cuenca experimental sistematizada. Los valores calculados para los mismos eventos fueron: 75,1;79,2;58,0;42,3;70,0 y 58,8, obteniendo un promedio de 63.

De este modo entonces, el NC para el escenario con sistematización con terrazas de desagüe, se determinó evaluando las diferencias de escurrimientos entre las dos cuencas experimentales, observando que los NC calculados diferían entre 11 y 31

puntos para todos los eventos. Es así que se definió para el área sistematizada un valor de 60.

Por último, para definir el valor de NC para el área ocupada por la sierra, se optó por calcularlo a través de las tablas del SCS. En primera instancia y en función de los tipos de suelo descritos en las unidades cartográficas, se trató de definir a que grupo hidrológico pertenecían. Apoyándose en mediciones de infiltración realizadas por Karlin et al. (2019), para suelos de similares características (Usthorcents líticos y paralíticos), se definió que pertenecían al grupo hidrológico A. De este modo se obtuvo un valor de NC de 36. Teniendo en cuenta, y según las unidades cartográficas descritas en la caracterización, que las mismas cuentan con un 30% de roca en su composición, se definió un NC de 97 para esta, para finalmente y luego de una ponderación por superficie, llegar al valor final de 54.

Una vez definidos estos tres NC principales, lo que se hizo fue, a través de una ponderación por superficie, calcular para cada uno de los escenarios y para cada subcuenca, el valor de NC correspondiente. La ponderación nombrada se puede observar a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Valor de NC para cada zona (NC) y NC ponderado por su participación (Pond. NC, en color) para cada subcuena en función del escenario.

Subcuena	Zona HEHP	Sup. Zona (ha)	Participación (%)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
				NC	Pond. NC	NC	Pond. NC	NC	Pond. NC	NC	Pond. NC	NC	Pond. NC
A	Sierra	5373	59,08	54	31,90	54	31,9	54	31,9	54	31,9	54	31,9
	Zona 1	2038	22,41	82	18,37	60	13,4	60	13,4	60	13,4	60	13,4
	Zona 2	75	0,82	82	0,68	82	0,7	60	0,5	60	0,5	60	0,5
	Zona 3	1609	17,69	82	14,51	82	14,5	82	14,5	60	10,6	60	10,6
	Total	9095	100,00		65,5		60,5		60,3		56,5		56,5
B	Zona 1	764	54,03	82	82,00	60	32,4	60	32,4	60	32,4	60	60
	Zona 2	129	9,12	82	82,00	82	7,5	60	5,5	60	5,5	60	60
	Zona 3	521	36,85	82	82,00	82	30,2	82	30,2	60	22,1	60	60
	Total	1414	100,00		82		70,1		68,1		60,0		60
C	Zona 1	352	15,74	82	82	60	9,4	60	9,4	60	9,4	60	60
	Zona 2	663	29,65	82	82	82	24,3	60	17,8	60	17,8	60	60
	Zona 3	931	41,64	82	82	82	34,1	82	34,1	60	25,0	60	60
	Zona 4	290	12,97	82	82	82	10,6	82	10,6	82	10,6	60	60
	Total	2236	100,00		82		78,5		72,0		62,9		60
D	Zona 1	207	65,71	82	82	60	39,4	60	39,4	60	39,4	60	60
	Zona 2	66	20,95	82	82	82	17,2	60	12,6	60	12,6	60	60
	Zona 4	42	13,33	82	82	82	10,9	82	10,9	82	10,9	60	60
	Total	315	100,00		82		67,5		62,9		62,9		60
E	Zona 2	202	100,00	82	82	82	82	60	60	60	60	60	60
	Total	202	100,00		82		82		60		60		60
F	Zona 2	20	9,85	82	82	82	82	60	5,9	60	5,9	60	60
	Zona 4	183	90,15	82	82	82	82	82	73,9	82	73,9	60	60
	Total	203	100,00		82		82		79,8		79,8		60
G	Zona 1	89	16,54	82	82	60	9,9	60	9,9	60	9,9	60	60
	Zona 2	390	72,49	82	82	82	59,4	60	43,5	60	43,5	60	60
	Zona 4	59	10,97	82	82	82	9,0	82	9,0	82	9,0	60	60
	Total	538	100,00		82		78,4		62,4		62,4		60
H	Zona 2	579	77,30	82	82	82	82	60	46,4	60	46,4	60	60
	Zona 4	170	22,70	82	82	82	82	82	18,6	82	18,6	60	60
	Total	749	100,00		82		82		65,0		65,0		60
I	Zona 2	577	28,69	82	82	82	82	60	17,2	60	17,2	60	60
	Zona 4	1434	71,31	82	82	82	82	82	58,5	82	58,5	60	60
	Total	2011	100,00		82		82		75,7		75,7		60

11.1.3 Abstracción Inicial

El método considera “pérdidas iniciales” (I_a) a la lámina de lluvia caída desde el inicio de la precipitación hasta el momento en que comienza el escurrimiento. Estas pérdidas están constituidas por: retención superficial + interceptación por la vegetación + infiltración previa a la iniciación del escurrimiento (Luque, 2008).

Para evitar la necesidad de estimar las variables I_a y S , el SCS desarrolló una relación entre ellas por medio de datos de precipitación y escurrimiento de pequeñas cuencas experimentales, resultando empíricamente de la graficación de (I_a) versus (S) para tormentas individuales. La relación resultante queda entonces:

$$I_a = 0.2S$$

Donde:

I_a = infiltración inicial o pérdidas iniciales.

S = la capacidad de almacenamiento actual del suelo.

A su vez, el NC se relaciona con el escurrimiento a través de la capacidad del suelo para almacenar agua (S). El valor de S varía entre cero (nula retención y máximo escurrimiento) e infinito (situación inversa) (Luque, 2008). S , como es evidente, depende de los mismos factores que el NC y su valor será:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254$$

Por lo tanto, para los valores de NC principales de 82, 60 y 54 definidos anteriormente, la abstracción inicial (I_a) resultante fue: 11,15 mm, 33,87 mm y 43,27

mm respectivamente. También se calculó para los NC secundarios resultantes de la ponderación de la Tabla 9.

11.1.4 Tránsito de Hidrogramas

Para el cálculo de los efectos de transmisión y laminación de un hidrograma a lo largo de un cauce, se seleccionó el método de Muskingum que supone el movimiento del agua en ondas por un cauce que combina la forma de almacenamiento en cuña y prisma (Fig. 29).

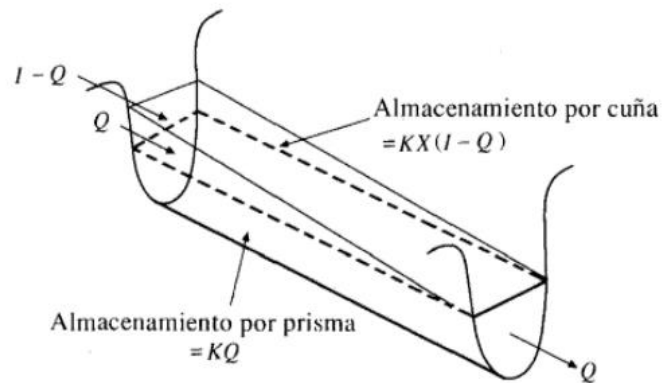


Figura 29. Esquema de tránsito de un hidrograma en un cauce según Muskingum, variable K y X.

El método de tránsito de Muskingum se basa en la premisa de que el caudal de ingreso difiere del caudal de salida según la relación:

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{\Delta V_{ol}}{\Delta t}$$

La variable K se determinó según la siguiente ecuación:

$$K = 0.18 * (\Delta x / (i^{(0.25)}))^{0.76}$$

Donde:

Δx : es la distancia máxima del cauce en Km.

i : es la pendiente máxima de la subcuenca.

La variable Δx adopta valores desde 0,1 a 0,5 y depende de la pendiente de la cuenca. En general se usan valores entre 0,2 para las pendientes más bajas y 0,35 para las pendientes más altas. Para la modelación se utilizó un valor de $X = 0,2$ en todos los casos.

Los factores K calculados para cada transito se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Factor K de Muskingum para cada transito (Reach).

Nombre del transito	Factor K
Reach A-JnC	1,859
Reach B-JnC	1,726
Reach JnC-JnFGH	1,101
Reach D-JnFGH	1,164
Reach E-JnFGH	1,058
Reach JnFGH-Sink	2,155

11.2 MODELACIONES HIDROLÓGICAS CON EL PROGRAMA HEC-HMS 3.3

HEC-HMS™ (Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System) es un programa informático de simulación hidrológica, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del Institute for Water Resources, Corps of Engineers, Department of The Army, en Davis, California, para estimar escurrimientos de agua a partir de datos de precipitaciones para una cuenca. En este programa existen

numerosos elementos hidrológicos que se encuentran interconectados para arrojar un resultado final.

El uso del software hace comparable la información obtenida con otros estudios, debido a que es mundialmente utilizado para estimaciones de este tipo. El programa permite introducir los datos necesarios para la simulación y obtener así, resultados numéricos, gráficos y tabulados.

Los elementos requeridos por el programa incluyen un módulo de cuenca, un módulo meteorológico y uno de especificaciones de control. Dentro del módulo de cuenca podemos mencionar los siguientes elementos utilizados para el estudio:

- Subcuenca: se utiliza para representar cuencas de diferentes características. Este tipo de elemento se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en la subcuenca a partir de los datos de todos los elementos.
- Tramo de cauce: este elemento se utiliza para representar tramos de escurrimientos que normalmente transitan por otra subcuenca que no es la de origen.
- Embalse: es un tipo de elemento que normalmente genera una retención del escurrimiento recibido de una o varias subcuencas, para liberarlo de manera gradual. Es el caso de lagunas, embalses u otros.
- Confluencia: se utiliza para representar la unión de uno o más flujos superiores, siendo el flujo de salida la suma de los hidrogramas.

- Sumidero: es un elemento que posee uno o varios flujos de entrada y no posee un flujo de salida. Es el punto final en el cual desembocan distintos escurrimientos.

El módulo meteorológico permite cargar todos los datos de las precipitaciones para generar la relación precipitación-escurrimiento. La precipitación corresponde a un evento histórico o uno hipotético con una probabilidad de ocurrencia asociada. En este ítem también se establece el método de escurrimiento, pérdidas iniciales, y todo lo que permita simular el movimiento del agua a través del suelo, su intercepción y almacenamiento, dando lugar al escurrimiento del exceso de agua.

El módulo de control permite el ingreso de variables de tiempo para definir límites en la simulación. En él se establece fecha y hora de inicio y final del período que se pretende analizar y dentro de éste, el intervalo de tiempo de cálculo para la posterior obtención de resultados (Mengo et al., 2020).

A continuación, en la Fig. 30, se muestra el diagrama hidrológico elaborado en HEC-HMS para las simulaciones.

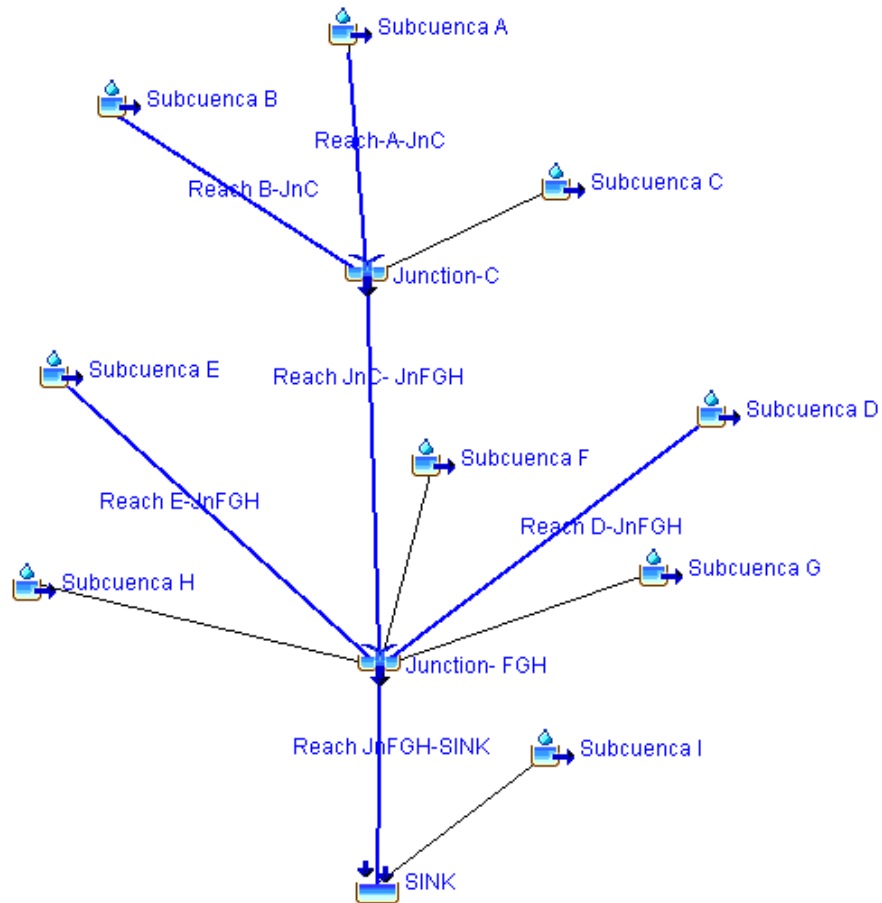


Figura 30. Diagrama para la simulación de la cuenca con el programa HEC-HMS.

12 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se mencionó anteriormente, se establecieron distintos valores de CN para cada una de las subcuencas, en función de los 5 escenarios planteados, partiendo desde una situación inicial sin sistematización, pasando por la incorporación paulatina de la misma utilizando como criterio las ZHEHP, hasta la sistematización completa de la cuenca. Luego de realizar las 5 simulaciones, se pudo arribar a los siguientes resultados. En la Tabla 11 se muestran los valores de caudales máximos y lámina escurrida para cada subcuenca y elemento de la modelación, en los 5 escenarios planteados.

Tabla 11. Resultados de las modelaciones hidrológicas para cada escenario. Caudal pico (m3/s), lamina escurrida (mm), y relación de escurrimiento Escenario 1/Escenario 5.

Elemento	Area (Km2)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5		Rel. escurrim. Escenario 1 /Escenario 5
		Q pico (m3/s)	Escurrimiento (mm)	Q pico (m3/s)	Escurrimiento (mm)	Q pico (m3/s)	Escurrimiento (mm)	Q pico (m3/s)	Escurrimiento (mm)	Q pico (m3/s)	Escurrimiento (mm)	
Junction-C	127,45	147,3	21,86	107,6	15,52	81,6	12,92	54,7	8,63	53,6	8,18	2,7
Junction- FGH	147,52	136,4	22,9	98,6	16,85	77,3	12,57	52	8,86	50,4	7,89	2,9
Reach-A-JnC	90,95	92,2	16,74	63,8	11,61	58,7	10,69	44,7	8,14	44,7	8,14	2,1
Reach B-JnC	14,14	42	33,62	21,5	17,15	18,8	14,99	9,8	7,83	9,8	7,83	4,3
Reach D-JnFGH	3,15	12,1	27,87	5,1	11,37	3,3	7,38	3,3	7,38	2,4	5,39	5,2
Reach E-JnFGH	2,02	8,5	24,04	8,5	24,04	1,4	3,93	1,4	3,93	1,4	3,93	6,1
Reach JnC- JnFGH	127,45	133,1	21,86	92,3	15,52	76,7	12,92	51,7	8,62	50,2	8,18	2,7
Reach JnFGH-SINK	147,52	122,2	22,8	87,2	16,78	68,4	12,5	46,3	8,81	43,5	7,84	2,9
SINK	167,63	140	24,47	129	19,17	80,9	14,27	74,9	11,01	44,3	8,01	3,1
Subcuenca A	90,95	124	16,75	85,6	11,61	78,8	10,69	59,9	8,14	59,9	8,14	2,1
Subcuenca B	14,14	69,1	33,62	35,3	17,15	30,8	14,99	16,1	7,83	16,1	7,83	4,3
Subcuenca C	22,36	99,1	35,26	85,4	30,41	58,1	20,7	31,2	11,12	24	8,57	4,1
Subcuenca D	3,15	20	27,87	8,6	11,37	5,8	7,38	5,8	7,38	4,3	5,39	5,2
Subcuenca E	2,02	16,4	24,04	16,4	24,04	3	3,93	3	3,93	3	3,93	6,1
Subcuenca F	2,03	11,6	30,6	11,6	30,6	10,5	27,54	10,5	27,54	2,5	6,51	4,7
Subcuenca G	5,38	28,8	30,6	23,2	24,69	7,5	7,94	7,5	7,94	6,2	6,51	4,7
Subcuenca H	7,49	44,3	30,6	44,3	30,6	15,1	10,35	15,1	10,35	9,5	6,51	4,7
Subcuenca I	20,11	74,1	36,7	74,1	36,7	54,6	27,21	54,6	27,21	18,2	9,24	4,0

En primer lugar, los resultados de la modelación muestran para todas las subcuencas que la relación entre la lámina escurrida en la situación inicial sin terrazas y final con terrazas se encuentra en un rango de 2,1/1 a 6,1/1; es decir, en esta cuenca y en campos sistematizados, el agua que escurre es 2 a 6 veces menor que en campos sin sistematizar, relación que se amplía en las subcuencas de menor tamaño. Vale la pena aclarar, que en otros estudios similares esta relación es aún mayor, hasta 10/1 (Mengo et al., 2020, Pepermans, 2022).

En este caso particular, y más allá de los NC diferentes utilizados en estos trabajos, algo que funciona como una constante y que puede hacer que numéricamente la relación se mantenga en valores menores, es la presencia de la sierra (aproximadamente un 30% del área total) aportando de este modo un caudal constante que hace que en el caso de la subcuenca A (proporcionalmente de gran tamaño), se enmascare el efecto de la sistematización en sus suelos agrícolas.

Por otro lado, lo que resulta de particular interés para comparar estos escenarios y por lo tanto la zonificación realizada, es analizar que ocurre con las láminas escurridas y los caudales pico, en el punto de salida de la cuenca "SINK". En la Fig. 31 se observan de manera comparativa los hidrogramas de salida para cada uno de los escenarios en este punto.

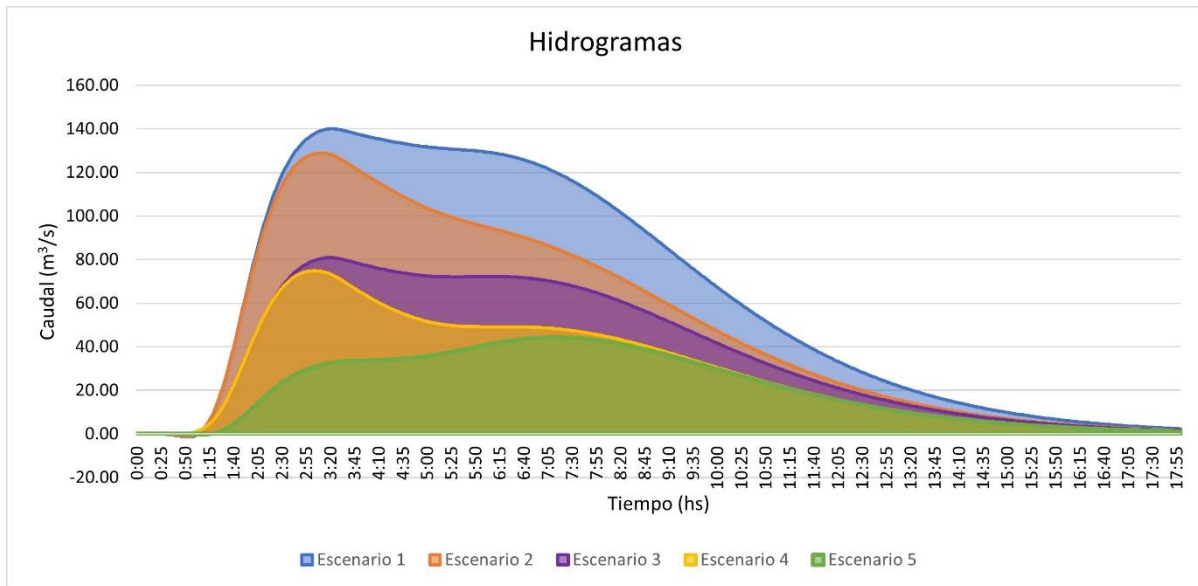


Figura 31. Hidrogramas comparativos (caudal en función del tiempo para cada escenario) para la tormenta de proyecto y en el punto de salida "SINK" de la cuenca.

En primer lugar, lo que podemos analizar es el efecto de la sistematización progresiva en los escurrimientos generados y ver en cuáles escenarios tuvo mayor impacto. Tal como se puede observar en la Fig. 32, el efecto de la sistematización en la disminución de las láminas escurridas pareciera ser bastante lineal. Sin embargo, cuando calculamos los porcentajes diferenciales de disminución (Tabla 12), podemos observar que en el caso del Escenario 2 y Escenario 3, obtenemos valores mayores, superiores al 20 %, mientras que para los Escenarios 4 y 5, estos porcentajes bajan a valores menores al 15 %. Esto indica que el impacto de los Escenarios 2 y 3 en el escurrimiento es mayor que el impacto de los Escenarios 4 y 5.

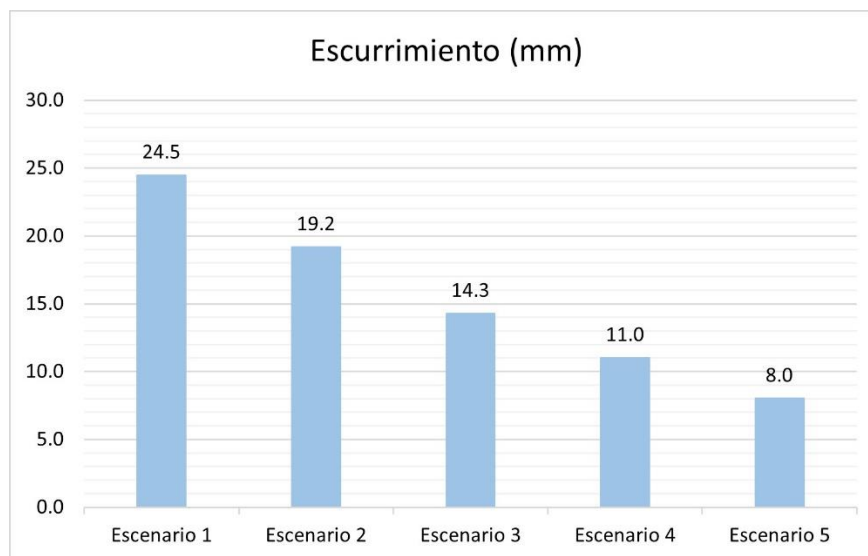


Figura 32. Esgurrimentos en mm para cada escenario en el punto de salida “SINK” de la cuenca.

Tabla 12. Análisis comparativo de los esgurrimentos en cada escenario para el punto de salida “SINK” de la cuenca.

	Esgurrimento (mm)	Esgurrimento (1000 m ³)	Participación con relación al Escenario 1 (%)	Disminución con relación al Escenario 1 (%)	Diferenciales de disminución por escenario (%)
Escenario 1	24,5	4101	100,0	0,0	0,0
Escenario 2	19,2	3214	78,3	21,7	21,7
Escenario 3	14,3	2391	58,3	41,7	20,0
Escenario 4	11,0	1846	45,0	55,0	13,3
Escenario 5	8,0	1343	32,7	67,3	12,3

En segundo lugar, resulta de particular interés analizar qué ocurre con los caudales pico en el mismo punto de salida.

A nivel general, los valores de caudales máximos también marcan diferencias significativas, lo cual supone, para la situación sistematizada, una menor superficie de suelos productivos ocupados por canales de desagüe y otras obras de menor

envergadura como alcantarillados, en los puntos donde la red de drenaje intercepta vías de comunicación (red secundaria y terciaria), efecto claramente beneficioso.

Analizando ahora en mayor detalle, y tal como podemos observar en la Fig.33, el efecto de la sistematización en los caudales pico tiene una respuesta bastante particular dependiendo del escenario del que se trate. En la Tabla 13, al calcular los porcentajes diferenciales de disminución, podemos observar que implementar el Escenario 2 implicaría solo una disminución de alrededor del 8%, mientras que en el caso del Escenario 3 ese impacto asciende a casi el 35% de disminución. Lo más interesante resulta, que en el caso de implementar el Escenario 4, el impacto es sumamente bajo, tan solo alrededor del 4%. Por último, para el Escenario 5, vuelve a ascender a un valor intermedio del 22%. Esto nos está indicando que el impacto de implementar el Escenario 3 es muy superior al del Escenario 4, y algo mayor que el del 5.

Ahora, teniendo en cuenta que pasar del Escenario 2 al 3 implicaría sistematizar 2698 ha extras impactando en un 42 % de disminución en los caudales pico, y que pasar del Escenario 3 al 4 implicaría sistematizar 3058 ha más, impactando solo en un 46 % (solo un 4% extra), resulta evidente que en una situación real de gestión de la cuenca donde los recursos económicos son limitados, sería mucho más eficiente implementar hasta el Escenario 3, es decir, realizar la sistematización hasta la Zona 2 de EHP.

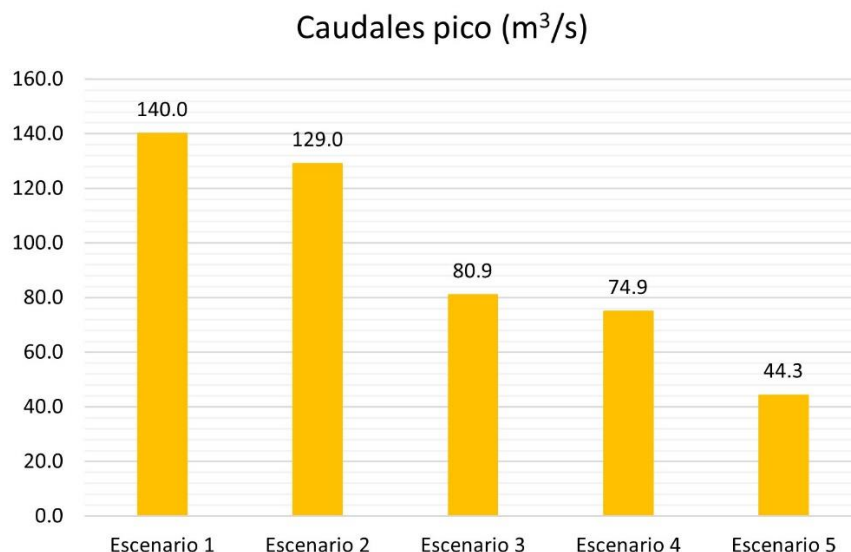


Figura 33. Caudales pico en m³/s para cada escenario en el punto de salida “SINK” de la cuenca.

Tabla 13. Análisis comparativo de los caudales pico en cada escenario para el punto de salida “SINK” de la cuenca.

	Q pico (m³/s)	Participación con relación al Escenario 1 (%)	Disminución con relación al Escenario 1 (%)	Diferenciales de disminución por escenario (%)
Escenario 1	140,0	100,0	0,0	0,0
Escenario 2	129,0	92,1	7,9	7,9
Escenario 3	80,9	57,8	42,2	34,4
Escenario 4	74,9	53,5	46,5	4,3
Escenario 5	44,3	31,6	68,4	21,9

Por lo tanto, si uno analiza ahora las dos variables en conjunto, podría definir una línea de “corte” o umbral de conveniencia, teniendo en cuenta la eficiencia de implementar un escenario u otro, ubicando ese umbral entre el Escenario 3 y 4.

13 CONSIDERACIONES FINALES

La recopilación, clasificación y análisis de la información antecedente de la cuenca, permitió caracterizarla para su posterior estudio.

Se logró delimitar la cuenca correctamente, definir su red de drenaje y las subcuencas resultantes, consiguiendo así obtener los parámetros requeridos para las modelaciones hidrológicas.

A partir de la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), y a través de herramientas informáticas, se logró determinar la potencialidad de la erosión hídrica en el área de estudio.

En función de la erosión hídrica potencial determinada, se pudo zonificar la cuenca y dividirla en Zonas Homogéneas de Erosión Hídrica Potencial.

La modelización hidrológica en diferentes escenarios definidos por las ZHEHP, permitió evaluar a la zonificación como criterio para la gestión de cuencas. De este modo se pudo valorar de qué manera y en qué magnitud, la incorporación paulatina de prácticas de manejo conservacionistas, teniendo como criterio la zonificación realizada, impactaban en la disminución de los caudales pico y los volúmenes escurridos en la cuenca de estudio.

En primer lugar, se pudo comprobar que la zonificación por ZHEHP, sí tuvo efecto en la hidrología de la cuenca presentando resultados diferenciales, no lineales, en los caudales pico y los escurrimientos generados.

En segundo lugar, y en este caso particular, se pudo determinar un umbral de conveniencia ubicado entre la Zona 2 y 3, en donde claramente y en un contexto de recursos escasos, resultaría más eficiente la aplicación de prácticas de manejo conservacionistas hasta la zona 2, obteniendo disminuciones en los escurrimientos y en los caudales pico de alrededor del 42%.

Claro está, que de por sí la zonificación por ZHEHP define un orden de prioridades para las acciones a implementar en la gestión de la cuenca, más allá de que el objetivo final siempre sea la sistematización de la mayor área posible. Sin embargo, en una situación real de gestión, donde los recursos económicos siempre son limitados, el ente gestor de la cuenca (el estado provincial a través Ministerio de Agricultura y Ganadería, Administración Provincial de Recursos Hídricos, etc.), podría basar la planificación de sus políticas públicas y programas de manejo y gestión del suelo y el agua, en la zonificación por ZHEHP, para como mínimo, darle prioridad hasta el umbral de conveniencia haciendo más eficiente el uso de sus recursos. De esta manera y a modo de ejemplos, podría utilizarse como criterio dentro de la cuenca para la asignación de presupuesto, para dirigir las líneas de crédito o subsidios, para ubicar u orientar las instancias de capacitación, para definir la ejecución de obra pública (alcantarillado, microembalses, etc.), entre otros.

Se considera también, que a futuro, sería propicio realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos, tanto al momento de la zonificación, como al momento del análisis de los resultados de las modelaciones hidrológicas, de manera de poder identificar mejor las causas de fondo de los resultados obtenidos y darle un sustento

sólido a esta metodología. Ese análisis escapa a los alcances de este trabajo, pero sienta las bases para líneas futuras de investigación en la temática.

A esta altura, y retomando lo expuesto en la introducción, se hace evidente el concepto de que nada/nadie queda igual después de una interacción. De este modo se instala la idea de que todos (cosas y seres) nos modificamos producto de esa interacción. Frente a resultados negativos, la solución no pasa por no interactuar, sino más bien por hacerlo bien.

Continuando con la reflexión, este trabajo es una evidencia más de que la solución para el cuidado de los recursos naturales, no es su “no utilización” o clausura, sino que se puede trabajar y producir si se realiza una lectura adecuada de con qué y con quién se está trabajando. En una situación inicial, los recursos naturales no necesitan ser gestionados, sino hasta que, llega el ser humano como elefante en un bazar generando un desbarajuste, rompiendo con las numerosas relaciones de equilibrio reinantes en los ecosistemas. Este trabajo es una prueba más, de la importancia de conocer antes de intervenir. Debemos tomarnos el tiempo necesario para observar y conocer el funcionamiento de los distintos elementos y procesos en los ecosistemas y agroecosistemas, para sobre ello idear y encontrar las mejores maneras interactuar, de trabajar y producir. En otras palabras, no se puede gestionar lo que no se conoce.

Esta metodología o herramienta, llega entonces a colaborar con este concepto. Basada en numerosas variables técnicas que integran información del suelo, del clima, de las precipitaciones, de uso y manejo del suelo, etc., permite a través de su implementación simular escenarios posibles e identificar los de mayor eficiencia o conveniencia. De este modo y a través de la metodología, se logra también cuantificar

el impacto de la implementación de prácticas de manejo conservacionistas en cada zona, lo que vuelve predecible el comportamiento de la cuenca. Esto es algo sumamente necesario y de alto impacto si uno pretende evitar situaciones catastróficas para el medio y las poblaciones que habitan las cuencas, como por ejemplo, inundaciones a sus centros poblados.

Por último, concluir entonces, que la zonificación por ZHEHP resulta un criterio ventajoso para el abordaje de los programas de gestión de ésta, y otras cuencas. La misma, además de dar un orden de prioridades para las tareas y prácticas de conservación, será una herramienta sumamente válida para que los actores involucrados en la gestión, sobre todo actores gubernamentales, puedan gestionar las cuencas de manera más eficiente.

14 BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Córdoba D.A.C.yT. -Dirección de Ambiente (2003) *Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba*. Serie C - Publicaciones Técnicas - Agencia Córdoba DACYT, Córdoba.
- Almorox, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, Ma. Gasco JM (1994) *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, Madrid.
- Bianchi, A.R.; Cravero SA. (2010) *Atlas climático digital de la República Argentina*. Ediciones INTA, Salta, Argentina.
- Boughton W. C. 1989. A review of the USDA SCS CN Method. *Australian Journal of Soil Research* 27, 511-523, Australia.
- Caamaño Nelly, G., Dasso C (2005) *Red regional de lluvias de diseño en la Pcia. de Córdoba*. Informe técnico. Estación no 74- Rafael García. Zona Centro. Dpto. Santa María. Córdoba.
- Cabrera, A. L. 1976. "Regiones fitogeográficas argentinas". En *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 2da. Edición Tomo II. ACME. Buenos Aires.
- Capitanelli, R. G. 1979. Clima. En: Vázquez, J.B. (Eds.) *Geografía Física de la Provincia de Córdoba*.
- Catalini, Carlos Gastón, Guillén, Nicolás Federico, García, Carlos Marcelo, Bazzano, Flavia Baraguet, María Magdalena, 2021. *Aplicación en línea para el mapeo en Argentina de información de lluvias extremas para diseño hidrológico*. Academia de la Ingeniería de la provincia de Buenos Aires, ISSN: 2796-7042, Páginas: 39-55. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119701>.
- Cisneros J., Cholaky C., Cantero Gutiérrez A., González J., Reynero M., Diez A., y Bergesio L. 2012. *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. Colección Académico Científica (UNRC), Rio Cuarto, Córdoba.
- Cisneros, J.M., Degioanni, A.J., González, J.G., Cholaky, C.G., Cantero, J.J., Cantero G., A., Tassile, J.L. 2015. *Degradación de suelos en la provincia de Córdoba*. En: Casas, R. R. y Albarracín, G. L. (Ed.) *El deterioro del suelo y el ambiente en Argentina*. PROSA-FECIC. Tomo II, 87-100.
- Desmet PJJ, Govers G (1996) *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. *Journal of Soil and Water Conservation*.

- Dourojeanni, A. (1994). La gestión del agua y las cuencas en América latina. *Revista de la CEPAL, N° 53*, 111-127. <https://hdl.handle.net/11362/11953>
- Fernandez Bedini, M. (2017). *Proyecto de Control de Erosión Hídrica- Los Molinos, Córdoba*. Área Consolidación: Planificación y Manejo de Cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Gaitan, J. J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L. M., Pizarro, M. J., Carfagno, P. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Buenos Aires: Ediciones INTA, 2017.
- Gustavo José Negro, 2022. Plan Básico Preliminar para el Consorcio de Conservación de Suelos "Pampa de Pocho". Trabajo Final Integrador; Escuela para Graduados; Facultad de Ciencias Agropecuarias; Universidad Nacional de Córdoba; Córdoba Argentina. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11086/28402>.
- Gvozdenovich J; Barbagelata P; López G. 2015. Erosión Hídrica - USLE/RUSLE Argentina - INTA EEA Paraná. Software, (versión 2.0) [software]. <http://www.inta.gob.ar/parana>.
- INTA-Secretaría de Ambiente de Cba. (2006) *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000*, Segunda Ed. Agencia Córdoba DACYT-INTA, Córdoba.
- Ispizua Yamati F.R., Clemente J.P., Ateca M.R., Apezteguia H.P. (2012) *Erosividad de las precipitaciones (R) para la región central de Córdoba, Argentina*. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Karlin, M. S., Bernasconi Salazar, J. R., Cora, A., Sánchez, S. S., Arnulphi, S. A., Accietto, R. H. (2019). *Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina)*. Ciencia del Suelo, 37 (2): 196-208. <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/Volumen37n2/1%20Pag%20196-208%20%23435.pdf>.
- Lupano, C., Abeucci C. (2007) *Informe técnico Cuencas de los Ríos Primero y Segundo*. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/94.pdf>.
- Luque, R. L. 2008. Número de Curva aplicado a una cuenca agrícola de la región central de Córdoba, Argentina. Tesis de Maestría. FCA-UNC y Fac. de Agr. y Vet-UNRC.
- Luti, R.; M.Solis; F.M.Galera; N.Müller de Ferreyra; M.Berzal; M.Nores; M.Herrera y J.C- .Barrera. 1979. "Vegetación". En Vázquez, J.; R.Miatello y M.Roque (Dir.) Geografía Física de la Provincia de Córdoba. De. Bolt. Buenos Aires. pp279-368.

- Marelli JH (1988) *La Erosión Hídrica*. XII Reunión Nacional de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Corrientes, Argentina.
- Mariano Nicolás Spalla, 2021. Plan Básico de la Cuenca Media del Río Ctalamochita. Trabajo Final Integrador; Escuela para Graduados; Facultad de Ciencias Agropecuarias; Universidad Nacional de Córdoba; Córdoba Argentina. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11086/25082>.
- Mengo, L., Becerra, M. A, Croce, A. J., Esmoriz, G. F., Faraoni, D. A., Negro G. J., Ramos, F., Raspanti Monteoliva, J. G., Pepermans, M. V., Viglicca, E. N. (2020). *Plan Básico Consorcio De Conservación De Suelos “Paso Del Puma” – CCSPDP Provincia de Córdoba*. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Moore ID, Grayson RB, Ladson AR (1991) *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. Hydrological Processes. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Pennock, D. (2019). *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Rome. 100 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. FAO.
- Pepermans Melani del Valle, 2022. Plan Básico preliminar de un área representativa del Consorcio de Conservación de Suelos Las Acequias. Trabajo Final Integrador; Escuela para Graduados; Facultad de Ciencias Agropecuarias; Universidad Nacional de Córdoba; Córdoba Argentina. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11086/29940>.
- Raspanti Monteoliva, J. G. 2022. Análisis hidrológico comparativo de la Cuenca “Despeñaderos” según distintos escenarios de manejo y conservación de suelo. Trabajo Final Integrador; Escuela para Graduados; Facultad de Ciencias Agropecuarias; Universidad Nacional de Córdoba; Córdoba Argentina. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11086/25100>.
- Rojas, A.E., Conde A. (1985) Estimación del factor “R” de la ecuación universal de pérdida de suelo para el centro-este de la República Argentina. In: *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, pp 85–94.
- Saluso JH (2008) *Actualización del Factor R de la Ecuación Universal de pérdida de suelo (EUPS) para una amplia zona del País*. Período 1950/2005. In: Serie extensión N°51. Agricultura Sustentable, Buenos Aires, pp 49–53.
- Sereno, Roberto, Hernán P. Apezteguía, María R. Ateca, Juan C. Bertoni, Gustavo Esmoriz, Ricardo L. Luque, Raúl I. Mendoza, Ricardo Porcel de Peralta DAT (1997) *Manual de Control de la Erosión Hídrica*. Secretaría de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

- Thomas, A., D'amato, J.P, Rinaldi PR (2015) *Corrección de modelos digitales de elevación con imágenes multi-espectrales*. SEDICI, Repositorio Institucional de la UNLP, La Plata, Argentina.
- Tom G. Farr, Paul A. Rosen, Edward Caro, Robert Crippen, Riley Duren, Scott Hensley, Michael Kobrick, Mimi Paller, Ernesto Rodriguez, Ladislav Roth, David Seal, Scott Shaffer, Joanne Shimada, Jeffrey Umland, Marian Werner, Michael Oskin, Douglas Burbank DA (2006) *The Shuttle Radar Topography Mission*. *Reviews of Geophysics* 45:33.
- Vargas Ronald (2022). *Los suelos, origen de los alimentos*. Crónica ONU, Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/cr%C3%B3nica-onu/los-suelos-origen-de-los-alimentos>
- Wischmeier WH, Johnson CB, Cross B V. (1971) Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No. 537, USDA- 40 Agricultural Research Service, Washington, DC.