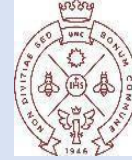




FCA
Facultad de Ciencias
Agropecuarias



FCEFyN



**FACULTAD
DE CIENCIAS
ECONÓMICAS**

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

Criterios y elementos para el diagnóstico de la pérdida de suelo y agua para una cuenca de la provincia de Córdoba

Daniel Alejandro Faraoni

Director: Ing. Agr. (MSc.) Manuel Vicondo

Córdoba, 2024





Crterios y elementos para el diagnóstico de la pérdida de suelo y agua para una cuenca de la provincia de Córdoba

Daniel Alejandro Faraoni

Director: Ing. Agr. (MSc.) Manuel Vicondo

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

Tribunal Examinador de TFI

- Ing. Civil (Mg.) Mariana Pagot
- Ing. Agr. (Esp.) Gustavo Negro
- Ing. Agr. (Esp.) Jorge Raspanti Monteoliva

Presentación formal académica: Córdoba, 24 de mayo de 2024

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

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

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a:

A mi director, el Ing. Agr. Magister Manuel Vicondo por su dirección y acompañamiento en la realización de este trabajo final integrador de la especialidad.

A la Universidad Nacional de Córdoba, a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNC y al Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba por la creación de esta Especialidad, que me permitieron formarme como especialista.

A la Dra. Susana Hang, por su dedicación, ánimo y confianza.

A mis compañeros de Cátedra, en especial a Gustavo Negro y Jorge Raspanti por su apoyo en la toma de datos de campo.

A mi familia que me apoyó y creyó en mí en todo momento, ayudándome en todo lo que necesite para cumplir con mis metas.

RESUMEN

El propósito de este trabajo final integrador fue proponer criterios y elementos para el diagnóstico y modelación que cuantifiquen la erosión y el escurrimiento en una cuenca de la zona central de la provincia de Córdoba, Argentina. El área de estudio fue descripta por su dimensión biofísica, social, económica y legal. Con la información reunida se avanzó en el diagnóstico y se detectaron los principales problemas. Estos están asociados a la erosión hídrica y el excesivo escurrimiento, en consecuencia, disminuyen la productividad de los suelos, afectan la salud de los ecosistemas y ocasionan situaciones de inestabilidad y deterioro en los bienes públicos y privados. Adoptar prácticas agronómicas y estructurales de conservación de suelos como la sistematización de campos permite disminuir, ordenar y controlar los escurrimientos. Estas prácticas repercuten en una mayor tasa de infiltración posibilitando un mayor almacenaje de agua en el suelo e incrementan los rendimientos de los cultivos. Por ello, se propuso estimar la erosión hídrica potencial (EHP) y actual (EHA) mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca para distintos escenarios de manejo del suelo utilizando el software HEC-HMS.

Como resultado de las estimaciones la EHA es baja ($0,15 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) en comparación al valor de tolerancia establecido ($2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

El escurrimiento superficial es el principal problema, sin embargo, la implementación de prácticas de conservación de suelo, como la sistematización, puede reducir el caudal pico en un 46% para eventos con un periodo de retorno de 10 años mientras que una buena rotación de cultivos lo reduce en un 25%.

En conclusión, las prácticas de conservación de suelo son esenciales para reducir la erosión hídrica, el escurrimiento superficial y las inundaciones, aumentan la disponibilidad de agua y rendimiento de los cultivos y disminuyen los costos de mantenimiento de la red vial.

Palabras clave: Córdoba, cuenca hidrográfica, USLE, modelos hidrológicos.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Contenido	
1	Introducción 10
1.1	Objetivo general..... 11
1.2	Objetivos específicos 11
2	Ubicación del área de estudio 12
3	Características generales de la cuenca..... 14
3.1	Dimensión biofísica 14
3.1.1	Geomorfología e Hidrología 14
3.1.2	Clima..... 16
3.1.3	Vegetación..... 19
3.1.4	Suelos..... 20
3.1.5	Unidades cartográficas 21
3.1.6	Capacidad de uso de los suelos 22
3.1.7	Topografía..... 24
3.2	Hidrología, red de drenaje..... 26
3.3	Dimensión económica-productiva y territorial 28
3.3.1	Uso y manejo del suelo 28
3.3.2	Tenencia de la tierra. 29
3.3.3	Formas de organización social de la producción 29
3.3.4	Consortios..... 29
3.3.5	Uso del suelo y de la secuencia de cultivos a partir de sensores remotos 31
3.4	Dimensión legal-normativo-institucional 40
3.4.1	Leyes Nacionales 41
3.4.2	Leyes Provinciales..... 45
4	Diagnóstico..... 54
5	Determinación de la erosión hídrica potencial y actual en el área de la cuenca. .. 55
5.1	Erosión hídrica potencial 58
5.2	Erosión hídrica actual (EHA) 66
5.3	Tolerancia a la pérdida de suelo 71
6	Hidrología y modelación 73
6.1	Delimitación de la cuenca y red de drenaje 74

6.2	Determinación de parámetros morfológicos e hidrológicos de cada subcuenca	76
6.3	Modelación hidrológica con el programa HEC-HMS 3.3.....	86
6.4	Resultado de la modelación.....	87
7	Consideraciones finales	95
8	Bibliografía.....	96

Lista de Tablas

Tabla 1. Precipitaciones Medias Mensuales de la Localidad de Manfredi	18
Tabla 2. Balance Hidrológico Mensual para Manfredi (Thornthwaite)	18
Tabla 3. Unidades Cartográficas, capacidad de uso, índice de productividad y superficie de ocupación	22
Tabla 4. Superficie ocupada (en hectáreas) por las distintas clases de uso de suelo: gramíneas (maíz y sorgo), leguminosas (soja y maní), No Agrícola (montes), Caminos rurales - periodo 2007-2010	35
Tabla 5. Superficie ocupada (en %) por las distintas clases de uso de suelo: gramíneas (maíz y sorgo), leguminosas (soja y maní), No Agrícola (montes), Caminos rurales - periodo 2007-2010.	36
Tabla 6. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en Departamento Río Segundo.	37
Tabla 7. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en Departamento Santa María.	37
Tabla 8. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en la cuenca en estudio.	38
Tabla 9. Secuencia de cultivos en cuatro campañas	38
Tabla 10. Superficie en hectáreas y participación relativa (en %) de las principales secuencias de cultivo.	39
Tabla 11. Clases de Erosión Hídrica Potencial.	65
Tabla 12. Valores de factor C para diferentes cultivos, rotaciones y sistema de sistema de labranza.	66
Tabla 13. Factor P adoptados según rangos de pendiente y prácticas de conservación.	68
Tabla 14. Tolerancia de pérdida de suelo (t/ha/año) de acuerdo al régimen climático y la profundidad del suelo.	71
Tabla 15. Parámetros morfológicos e hidrológico de las subcuencas	76
Tabla 16. Valores de lámina precipitada asignadas a cada subcuenca para periodo de retorno de 10 años	78
Tabla 17. Valores de lámina precipitada asignadas a cada subcuenca para el evento extremo.	78
Tabla 18. Grupos hidrológicos y sus características particulares.	81
Tabla 19. Condición hidrológica, escurrimiento y Número de Curva en función de la vegetación y su estado.	82
Tabla 20. Condición de humedad antecedente en función de la precipitación	83
Tabla 21. Número de curva para suelos con uso agrícola	84
Tabla 22. Parámetros K y X para ecuación de Muskingum para tránsitos	86
Tabla 23. Resultados de la modelación hidrológica para un Tormenta Proyecto con PR de 10 años y de un evento extremo de la cuenca y para 3 escenarios de uso y manejo del suelo	87

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica. Límites departamentales y Consorcio de Conservación de Suelos Santa Teresita y Viejo Algarrobo	12
Figura 2. Área de estudio, centros urbanos, red vial provincial y nacional	13
Figura 3. Mapa de unidades geomorfológicas de la provincia de Córdoba	15
Figura 4. Precipitaciones Promedio Anuales del Período 1990/2022 de la Estación Experimental Manfredi.	17
Figura 5. Mapa de Unidades Cartográficas.	22
Figura 6. Capacidad de uso del suelo por clase en la cuenca en estudio (IIIc amarillo: Serie Oncativo; IIIc verde: Serie Manfredi; IVec naranja: Asociación Manfredi 60% y Manfredi en fase por erosión moderada a severa 40%)	24
Figura 7. Elevaciones de la Cuenca.	25
Figura 8. Mapa con curvas de nivel (Equidistancia 5 m) y límite externo de la cuenca.	26
Figura 9. Bajos estructurales de la cuenca (círculos de color amarillo).	27
Figura 10. Signos de erosión en surco sobre la vía de escurrimiento principal de la cuenca.	27
Figura 11. Red de drenaje y red vial provincial de la cuenca.	28
Figura 12. Tipo de dominio y régimen de tenencia de la tierra.	29
Figura 13. Distribución de los CCS en que se encuentra el área de estudio.	30
Figura 14. Recorte de imagen satelital. Imagen Landsat 7 en composición de bandas infrarroja, de fecha 22/10/2009 recortada según los límites del área en estudio.	33
Figura 15. Clasificación Supervisada Interactiva. Clases de uso del suelo sobre Imagen Landsat 7 de fecha 22/10/2009.	34
Figura 16. Vectorización y limpieza de imagen clasificada. Clases de uso del suelo post-limpieza sobre Imagen Landsat 7 de fecha 22/10/2009.	35
Figura 17. Distribución geográfica de distintas clases de uso del suelo. Campaña 2008-2009.	36
Figura 18. Distribución por categorías de las secuencias de cultivos 2007-2010 dentro del área de estudio.	39
Figura 19. Relación entre la PMA y el factor R para 75 localidades de la República Argentina	58
Figura 20. Mapa de Factor "R" de la USLE para los suelos de la cuenca.	59
Figura 21. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica Oncativo	60
Figura 22. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica Manfredi.	60
Figura 23. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica: Asociación de Serie Manfredi 60% y Manfredi en fase por erosión moderada a severa 40%	61
Figura 24. Mapa de Factor "K" de la USLE para los suelos de la cuenca	62
Figura 25. Mapa de Factor "LS" de la USLE para los suelos de la cuenca	64
Figura 26. Mapa de Erosión Hídrica Potencial de la cuenca	65
Figura 27. Mapa de Factor "C" de la USLE para los suelos de la cuenca	67
Figura 28. Mapa de Factor "P" de la USLE para los suelos de la cuenca	69

Figura 29. Mapa de Erosión Hídrica Actual para los suelos de la cuenca	70
Figura 30. Red vial e hídrica de la cuenca	75
Figura 31. Delimitación de subcuencas de la cuenca en estudio	75
Figura 32. Curva I-D para la tormenta proyecto de 114 mm/día.	77
Figura 33. Patrón adimensional de distribución temporal de tormentas - Estación Rafael García	79
Figura 34. Modificación del escurrimiento superficial en función al tipo de uso del suelo.	80
Figura 35. Diagrama triangular con curvas de conductividad hidráulica a saturación	82
Figura 36. Esquema de distribución de subcuencas para la simulación en HEC-HMS	87
Figura 37. Láminas de escurrimiento en mm para una tormenta cuyo periodo de retorno es de 10 años.	89
Figura 38. Láminas de escurrimiento para una tormenta de evento extremo.	90
Figura 39. Comparativo de láminas de escurrimiento para seis escenarios simulados	90
Figura 40. Hidrograma comparativo para una precipitación con PR de 10 años	91
Figura 41. Hidrograma comparativo para un evento extremo de precipitación	92

Criterios y elementos para el diagnóstico de la pérdida de suelo y agua para una cuenca de la provincia de Córdoba

1 Introducción

En la región central de la provincia de Córdoba existen diferentes problemas vinculados al suelo, el agua y su manejo. De estos procesos los principales son: la erosión hídrica y el excesivo escurrimiento. El primero se refiere al proceso de desprendimiento, arrastre y sedimentación de las partículas del suelo causado por la acción del agua. Mientras que el segundo hace referencia a grandes volúmenes de agua que fluyen sobre el territorio.

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.

Para contribuir a mitigar estos problemas en la provincia de Córdoba y más precisamente al sur del departamento Santa María y sur oeste del departamento Río Segundo, se conformaron varios consorcios de conservación de suelo (CCS) como el de Santa Teresita y Viejo Algarrobo. La conformación de estos consorcios fue promovida por grupos de productores y el gobierno de la provincia de Córdoba donde la principal problemática es la erosión hídrica.

El objetivo de estos organismos es la adopción de prácticas agronómicas y estructurales de conservación de suelos como la sistematización de los campos que permite disminuir, ordenar y controlar los escurrimientos. Estas prácticas repercuten en una mayor tasa de infiltración y además posibilita un mayor almacenaje de agua en el suelo incrementando los rendimientos de los cultivos. Las causas de los procesos de degradación antes mencionados 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. Estos procesos no afectan de igual manera a todas las zonas por lo que es necesario

realizar estudios para entender cuáles son los problemas predominantes y poder abordarlos de la forma más adecuada.

Por esta razón, se planteó la necesidad de llevar adelante el presente estudio a fin de disponer, a corto plazo, con información referida a cuáles son los problemas que afectan principalmente a la cuenca delimitada, así como su localización y extensión de la erosión y los escurrimientos actuales del sistema natural-artificial de la cuenca, como también de la detección de “puntos críticos” que permitan la aplicación de medidas correctivas o mitigadoras, tanto culturales como estructurales, tendientes a la prevención y control de los procesos generadores de erosión hídrica y de inundaciones.

Actualmente existen herramientas que permiten modelar estos procesos para estimar su magnitud a partir de una serie de datos de entrada que en muchos casos pueden obtenerse de la información territorial disponible.

El presente trabajo se propone realizar un estudio que permita diagnosticar a partir de la USLE (ecuación universal de la pérdida de suelo) y la modelación hidrológica, la masa de suelo y de agua que se pierden en la cuenca hidrográfica en la cual se encuentra parte de los CCS mencionados anteriormente.

1.1 Objetivo general

Proponer criterios y elementos para el diagnóstico de la pérdida de suelo y agua para una cuenca de la provincia de Córdoba.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la cuenca en estudio a través de diferentes dimensiones.
- Diagnosticar los problemas asociados a la degradación de suelos.
- Estimar la pérdida de suelo en base a la ecuación universal de pérdida de suelo
- Modelizar el comportamiento hidrológico de la cuenca para distintos escenarios a través del software HEC-HMS
- Analizar integralmente información antecedente y de elaboración propia.

2 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra al este del departamento Santa María y sur oeste del departamento Río Segundo de la provincia de Córdoba. Comprende la parte este del Consorcio de Conservación de Suelos “Santa Teresita” y la parte oeste del Consorcio de Conservación de Suelos “Viejo Algarrobo” (Fig. 1).

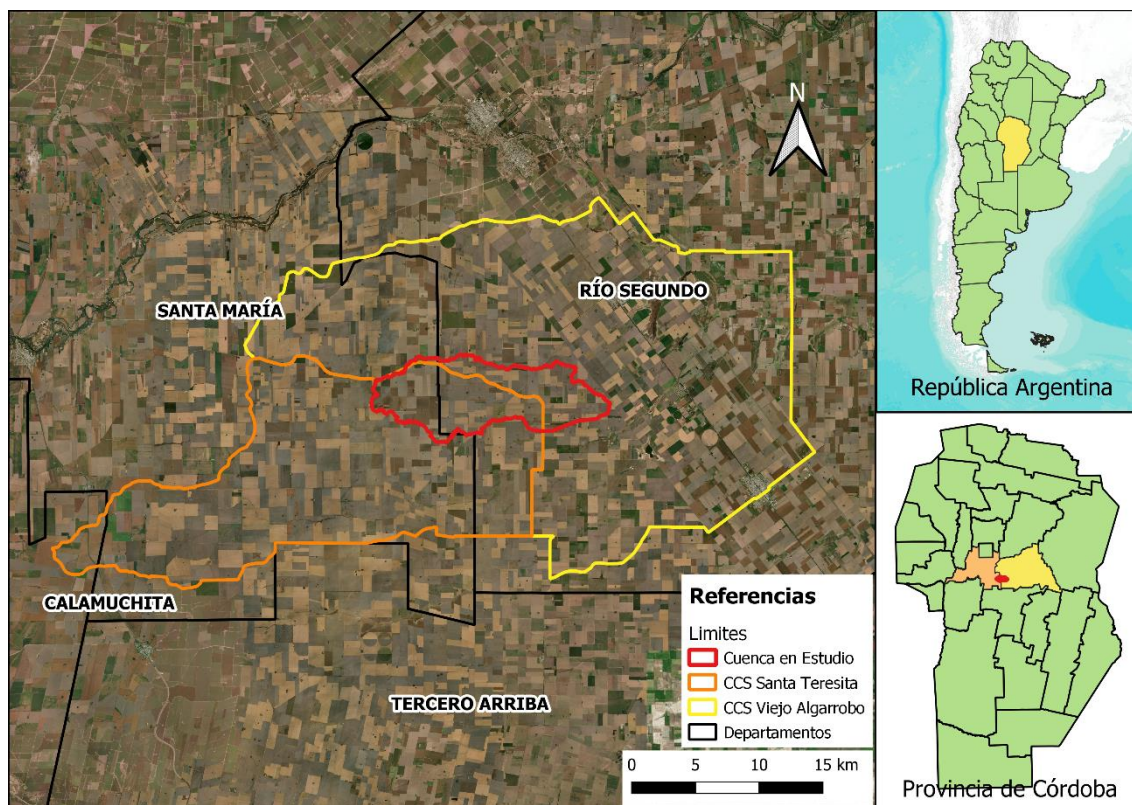


Figura 1. Ubicación geográfica. Límites departamentales y Consorcio de Conservación de Suelos Santa Teresita y Viejo Algarrobo

Próximo al área de estudio se encuentran las localidades de Laguna Larga y Manfredi (Fig. 2).

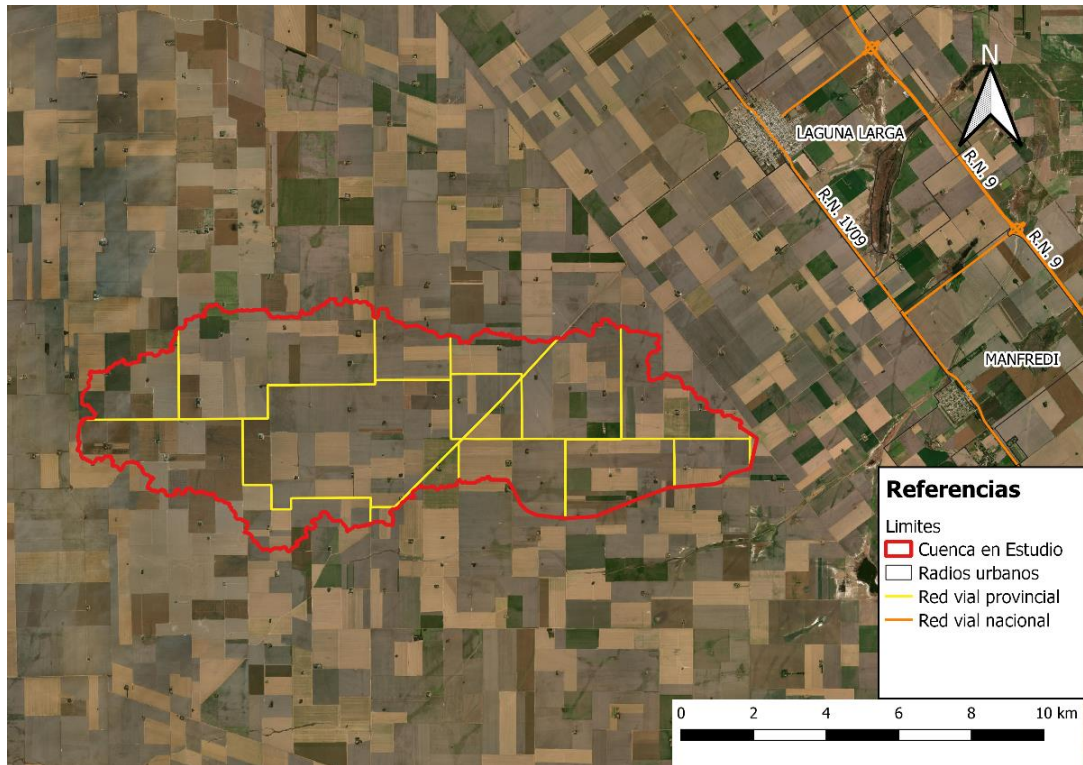


Figura 2. Área de estudio, centros urbanos, red vial provincial y nacional

3 Características generales de la cuenca

3.1 Dimensión biofísica

3.1.1 Geomorfología e Hidrología

Dentro de las Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba, la cuenca está inserta en la denominada Pampa Loessica Alta (Fig. 3), cuyas características generales se describen a continuación.

Estructuralmente, esta unidad constituye un bloque elevado o basculado hacia el este por fallas geológicas del basamento profundo, parcialmente cubierto por depósitos de piedemonte y luego por una potente sedimentación eólica. Superficialmente sólo se encuentra el loess franco limoso muy homogéneo donde se han observado espesores hasta de 50 metros. No se observa la presencia de depósitos fluviales, ya que, por razones topográficas, esta gran unidad geomorfológica de la Provincia ha quedado fuera de la influencia de los derrames y abanicos provenientes de las sierras chicas de Córdoba. Constituyen una excepción las estrechas fajas fluviales recientes y bien definidas de los ríos Suquía, Xanaes y Ctalamochita con sus respectivas terrazas, observándose en las barrancas por debajo de los sedimentos fluviales, los sedimentos eólicos (loess o loess modificado).

Como formas menores del paisaje se observan líneas de escurrimiento deprimidas de origen estructural, que se entrecruzan en dos sentidos principales (noreste - sudoeste y noroeste - sudeste), conformando un diseño de drenaje subrectangular. Normalmente, los colectores principales regionales y secundarios actuales de escorrentías intermitentes, adaptan sus diseños a estas geoformas longitudinales.

Los procesos erosivos por acción del agua son intensos y generalizados en toda la unidad, sobre todo en el oeste donde ocurren en forma laminar y en surcos y también en forma de cárcavas profundas aisladas. Es la unidad ambiental de la Provincia donde más se observa la pérdida de suelo. Un fenómeno particular y específico de esta subregión es la presencia de "mallines" (erosión tubificada), vinculados en la mayoría de los casos, a las líneas o desagües estructurales, especialmente en los puntos de intersección de las mismas.

La capa freática está muy profunda sobre el borde occidental, encontrándose más próxima a la superficie en el este, pero sin afectar el perfil del suelo en

ningún caso. Prácticamente toda la vegetación natural ha sido eliminada, siendo reemplazada, en su gran mayoría, por agricultura, esencialmente soja.

Hidrológicamente, la región está surcada por ríos y arroyos que nacen en la región serrana, la mayoría de los cuales exhiben importantes procesos de erosión vertical y lateral y una consecuente sedimentación en las áreas de derrame que se suceden hacia el este (Gorgas y Tassile, 2003).

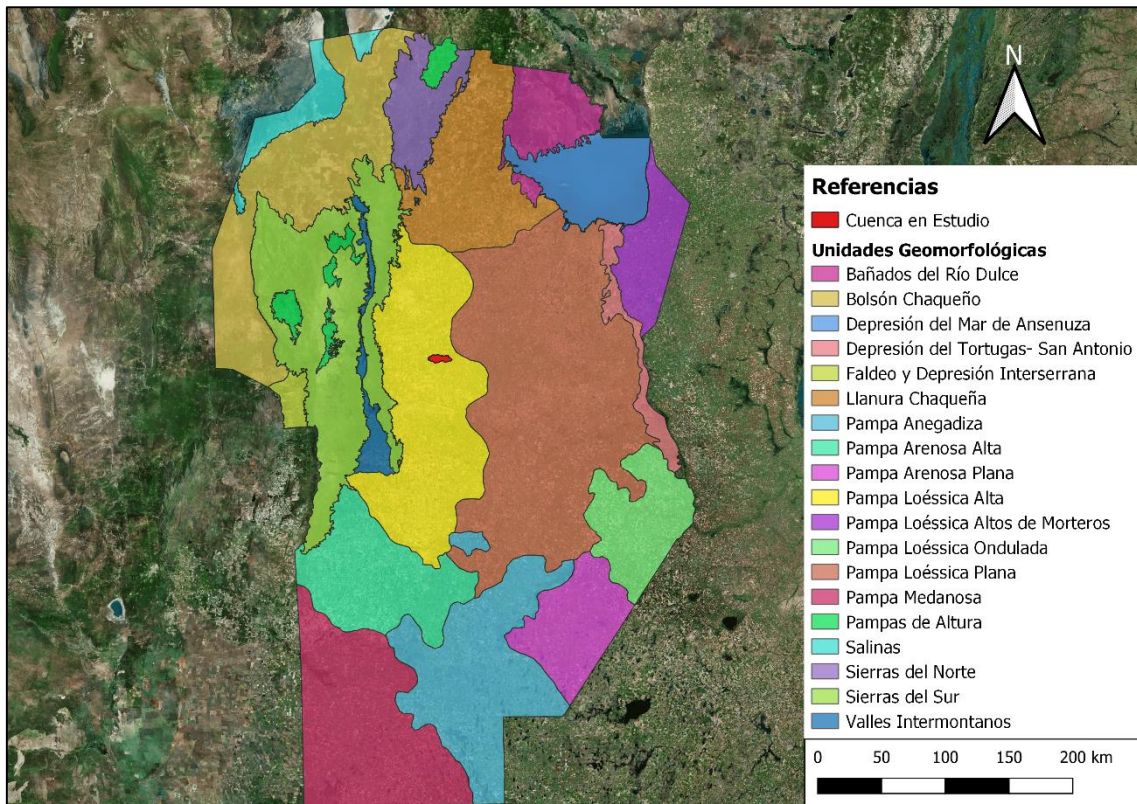


Figura 3. Mapa de unidades geomorfológicas de la provincia de Córdoba

3.1.2 Clima

El clima de un lugar o de una región es el resultado de la acción de diversos factores, por lo general, de índole geográfica. El clima predominante en la zona puede caracterizarse mediante un régimen térmico con una temperatura media anual de 17°C y una amplitud térmica de 13°C, el período libre de heladas es de 255 días. La pluviometría regional posee una distribución con un rango de 750 mm al oeste (Río Tercero) y 759 al este (Manfredi), con una distribución estacional de tipo monzónico y se distribuyen principalmente durante los meses de octubre a marzo (580 mm), el cual representa el 80 % de las precipitaciones anuales. La evapotranspiración potencial supera los 850 mm anuales, causando la existencia de períodos con deficiencia de agua edáfica cuyos valores se incrementan hacia el oeste (INTA y Secretaría de Ambiente, 2008).

Régimen Térmico

El régimen térmico de la localidad de Manfredi es templado; la temperatura media anual es de 16,8°C. La temperatura media del mes más caluroso (enero) es de 23,4°C, y la correspondiente al mes más frío (julio) es de 9,6°C. En consecuencia, la amplitud térmica anual resulta ser de 13,8°C. La temperatura máxima absoluta mensual de los meses de verano es de 40,0°C y la temperatura mínima absoluta mensual de los meses de invierno es de -9,5°C.

Régimen de Heladas

La localidad de Manfredi presenta un régimen de heladas con las siguientes características:

Período medio libre de heladas: 260 días

Promedio medio de días con heladas/año: 105 días

Fecha promedio de la primera helada: 25 de mayo

Fecha promedio de la última helada: 19 de septiembre

En el 100% de los años ocurren heladas.

Régimen de vientos

Los vientos y la baja humedad relativa del ambiente son importantes, sobre todo en los meses más secos (mayo a septiembre), con una alternancia norte-sur, alcanzando en algunos casos picos importantes que superan los 70 km/hora.

Los vientos del sector norte predominan durante todo el año y con mayor intensidad en los meses primavera-estivales, tendiendo a disminuir en la estación fría, pero siempre son los de mayor frecuencia. Los vientos procedentes del sur, pueden ocurrir en cualquier estación, con tendencia a aumentar durante el invierno, pero siempre con frecuencia inferiores a las del viento norte. Desde el sector noreste, los vientos pueden ocurrir durante todo el año con frecuencias bastante parejas en todos los meses, pero de baja intensidad y una leve tendencia a aumentar en primavera y fines del verano, coincidiendo con disminuciones de los vientos del norte.

Régimen Pluviométrico

El régimen pluviométrico de Manfredi al igual que el de otras localidades relevadas en la zona se asemeja al régimen pluviométrico monzónico prevalente en el noroeste de nuestro país. En efecto, el 81% de las lluvias se concentra en el semestre más caluroso (octubre-marzo), lo que se observa en la Tabla 1. Durante el año la suma total media es de 759 mm en Manfredi. Los meses más lluviosos son diciembre y enero y los más secos junio, julio y agosto. El promedio mensual de precipitaciones de localidades con ambiente subhúmedos o semiáridos, como la que nos ocupa, debe considerarse como un simple valor orientativo (Fig. 4).

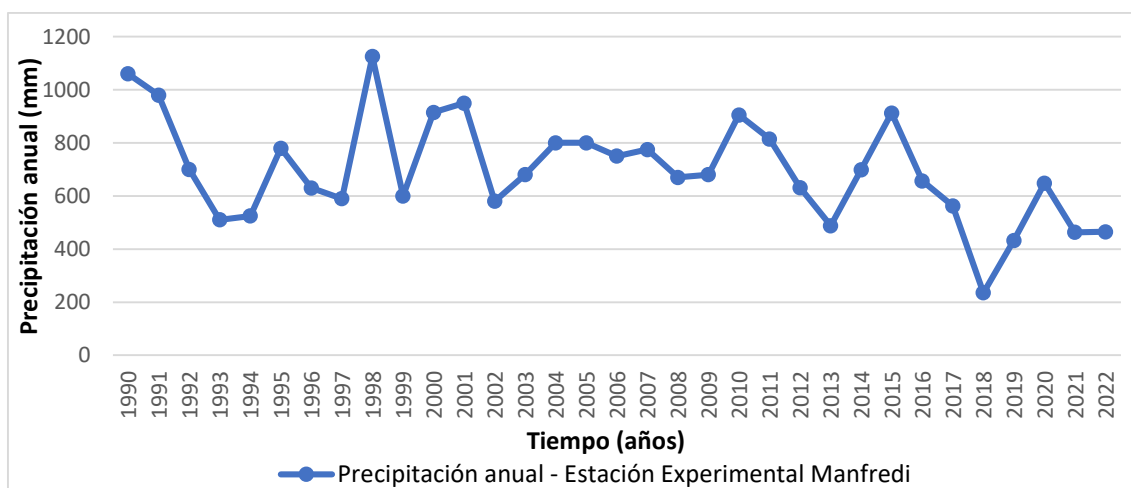


Figura 4. Precipitaciones Promedio Anuales del Período 1990/2022 de la Estación Experimental Manfredi.

Tabla 1. Precipitaciones Medias Mensuales de la Localidad de Manfredi

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Período													
1931-2011	120	98	101	55	22	10	12	11	35	79	101	120	759

Balance hidrológico

El balance hidrológico de una región es la relación entre los valores de precipitaciones y evapotranspiración, que es de gran utilidad, principalmente para la producción de cultivos de granos, dado que nos permiten estimar deficiencias y excesos de agua en el suelo y la época de ocurrencia de los mismos a partir de valores climáticos. Para ellos es imprescindible conocer los consumos de agua y pérdidas a través del suelo y de los cultivos, cuyo proceso se denomina evapotranspiración, esto puede tener dos formas: potencial (ETP), que es un valor máximo en función de las características atmosféricas del lugar y otra la real (ETR), que es consecuencia de las disponibilidades hídricas dadas por la precipitación y los aportes de humedad del suelo. Un método que se emplea comúnmente para resolver esto es el de Thornthwaite y Mather (1967), estos autores proponen tablas de retención de humedad del suelo según distintas capacidades, en este caso se usó la de 300 mm de almacenaje, tal como se hizo en otras Cartas de Suelo a fin de que sean comparables por lo menos a escala geográfica y climática.

Manfredi está ubicada en la latitud 31° 50' 41" Sur y longitud 63° 44' 46" Oeste, con una elevación de 292 m.s.n.m. Se encuentra entre áreas que por sus deficiencias hídricas se ubican dentro de la región semiárida. En la Tabla 2 se presentan los datos del Balance Hidrológico Normal (carta de suelos N° 3163-32 Oncativo).

Tabla 2. Balance Hidrológico Mensual para Manfredi (Thornthwaite)

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Parámetro													
Temperatura media (°C)	23,4	22,1	20,0	17,0	13,0	10,4	9,6	11,6	13,7	17,5	20,6	22,9	16,8
ETP (mm)	131	101	87	59	36	22	21	31	43	73	100	128	832
Precipitación (mm)	120	98	101	55	22	10	12	11	35	74	101	120	759
ETR (mm)	122	99	87	56	25	13	14	15	36	73	100	122	762
Déficit (mm)	9	3	0	3	11	10	7	16	6	0	0	7	72

Extraído de la carta de suelos N° 3163-32 Oncativo.

Solamente tres meses, marzo, octubre y noviembre, no presentan déficit. La deficiencia anual de agua es de 72mm. Los meses con mayor déficit son Agosto (16 mm), Mayo (11 mm), y Junio (10 mm), coincidentes con la época de Evapotranspiración Potencial. Los meses de marzo, octubre y noviembre son los únicos donde la precipitación es mayor que la Evapotranspiración Potencial. Estos meses no presentan excesos de precipitación con respecto a la Evapotranspiración Potencial, pasan a reponer el agua del suelo evapotranspirada en los meses secos. Otra característica es que no se presentan excesos en ningún mes. La capacidad máxima de retención no se alcanza en ningún mes, pues el agua que se repone en el suelo, no alcanza a cubrir el agua utilizada en el proceso de Evapotranspiración.

3.1.3 Vegetación

La vegetación original corresponde a la unidad fitogeográfica Espinal (Luti et.al, 1979; Ragonese, 1967; Parodi, 1964), que 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, parcialmente, 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.

En las cuencas sin avenamiento o depresiones con un cierto grado de salinidad, se presentan comunidades halófilas y en las áreas sujetas a inundaciones

prolongadas o de bañados, se desarrolla una vegetación particular, similar a la de los esteros de la estepa pampeana.

3.1.4 Suelos

El loess, material originario de estos suelos, posee un porcentaje muy elevado de limos (del orden del 70%) y es rico en carbonato de calcio. Estos caracteres del material, sumados a las condiciones climáticas de una planicie subhúmeda a semiárida y la vegetación natural bajo la cual evolucionaron, confieren a los suelos las características más sobresalientes que condicionan su utilización y definen sus potencialidades. Los Haplustoles (H. énticos y H. típicos), que son los suelos dominantes de la región, se caracterizan por ser suelos altamente productivos, profundos, bien drenados, fértiles, con un horizonte superficial rico en materia orgánica y con el complejo de cambio dominado por el calcio, lo que favorece, junto con el tipo de vegetación que compone el "espinal" original, el desarrollo de una buena estructura. Sin embargo, el alto contenido en limo les confiere cierta fragilidad e inestabilidad estructural, que se manifiesta por una tendencia al encostramiento y al "planchado", punto inicial de los escurrimientos y de los procesos erosivos. Regionalmente, existe una pendiente uniforme, que disminuye gradualmente hacia el Este, con valores de gradiente que van del 5% al 0,5%, siendo este último valor el dominante de la porción oriental. Los procesos erosivos (principalmente hídricos) son intensos y generalizados en toda la unidad, sobre todo en el Oeste donde se producen no sólo en forma laminar y de surcos, sino también en forma de cárcavas profundas y aisladas. Esta puede ser considerada la región de la provincia donde más se observa la pérdida de suelo. Un fenómeno particular y específico es la presencia de "mallines" (erosión tubificada), vinculados en la mayoría de los casos, a las líneas o desagües estructurales.

La región está profundamente modificada por las actividades agropecuarias. Desde mediados del siglo pasado estas tierras sufrieron una casi total sustitución de la vegetación natural (Espinal) por cultivos, primero de trigo, luego de maíz y más recientemente de soja y maní.

Este proceso, que fue acompañado de un intenso parcelamiento, siendo el estrato más representativo el de los productores "chicos", hoy ha devenido en

una intensa agriculturización que incluye un desplazamiento de las actividades ganaderas y que sin dudas contribuye a la intensificación de la erosión laminar y en cárcavas y la degradación química y biológica del suelo (Mengo et al., 2019).

3.1.5 Unidades cartográficas

Las cartas de suelos muestran un conjunto de delineaciones, cada una identificada con un símbolo. Todas las delineaciones que se identifican con el mismo símbolo constituyen una unidad cartográfica de suelos.

Las unidades cartográficas pueden ser simples o compuestas de acuerdo a si están integradas por uno o más suelos. Las unidades simples o consociaciones pueden tener hasta un 15% de inclusiones de otros suelos. Para la mayoría de las unidades compuestas, esto es asociaciones y complejos de suelos, se ha estimado el porcentaje de participación de cada suelo, en el total de la unidad. Para otras unidades, no ha sido posible o no se ha estimado necesario determinar el grado de participación de cada suelo, por lo que no se consignan porcentajes.

En este punto se describen las unidades cartográficas más representativas del área del consorcio, caracterizando cada una de ellas en término de las series de suelos que la componen según la carta de suelos N° 3163-32 Oncativo.

Las Unidades Cartográficas de suelos presentes son: Mf, Mf4 y Ot cuyas características se resumen en la Tabla 3.

En la Fig. 5 se muestra la distribución espacial de las unidades cartográficas antes citadas.

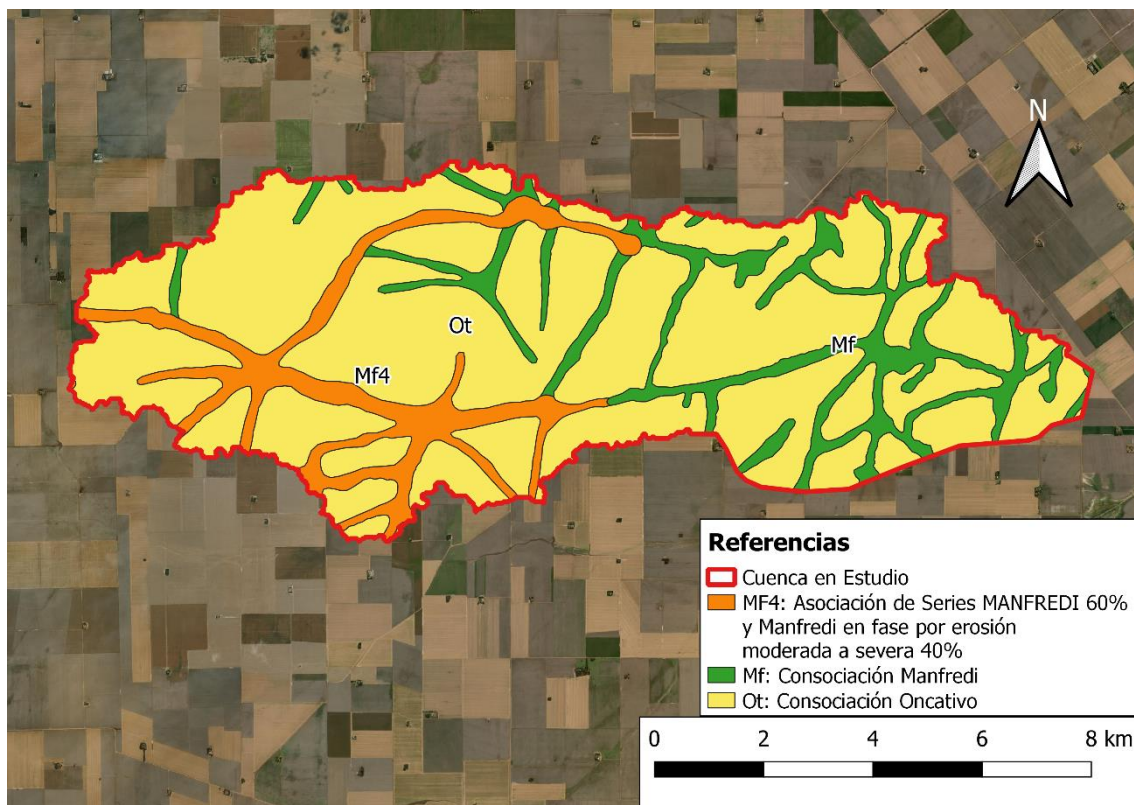


Figura 5. Mapa de Unidades Cartográficas. Elaboración propia.

Tabla 3. Unidades Cartográficas, capacidad de uso, índice de productividad (IP) y superficie de ocupación (ha)

Símbolo	NOMBRE DE LA UNIDAD	Capacidad de uso	ha	%	IP
Mf	Consociación MANFREDI	IIIc	1035	12,7	76
Mf4	Asociación de Series MANFREDI 60% y Manfredi en fase por erosión moderada a severa 40%	IVec	864	10,6	61
Ot	Consociación ONCATIVO	IIIc	6247	76,7	65

3.1.6 Capacidad de uso de los suelos

La clasificación de las tierras por su capacidad de uso, según el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, USDA), distingue ocho clases (señaladas con números romanos I a VIII) que indican un aumento progresivo de las limitaciones que presentan los suelos para el desarrollo de los cultivos. Las cuatro primeras clases incluyen los suelos arables aptos para

cultivos. La clase I requiere poco o ningún tratamiento de manejo o conservación especial. Las clases II, III y IV necesitan grados crecientes de cuidado y protección. Las clases V a VII por lo general no son aptas para los cultivos y precisan cuidados progresivamente más intensos, aun cuando se destinen para pasturas o a la forestación. Finalmente, la clase VIII no tiene aplicación agrícola ni ganadera; sólo sirve para la recreación, para conservación de la fauna silvestre, provisión de agua o fines estéticos (Gorgas y Tasile, 2003)

En la cuenca bajo estudio predominan los suelos que poseen una capacidad de uso clase III, con limitaciones de clima y erosión, y en algunas vías de escurrimiento, suelos de clase IV con limitantes climática y por sales (anegamiento) (Fig. 6):

Suelos clase III: Los suelos de esta clase tienen mayores limitaciones que los de las clases I y II que no se encuentran en el área, por lo que requieren prácticas de manejo y conservación más complejas; no obstante, son adecuados para cultivos, pasturas y otros usos de la tierra. La limitante principal es el clima (c).

Suelos clase IV: Suelos con limitaciones más severas que la clase III. Cuando están cultivados requieren prácticas de manejo y conservación más difíciles y complejas. Generalmente son adecuados para una estrecha gama de cultivos. No obstante, pueden ser utilizados para pasturas y otros usos de la tierra. La limitante principal es el clima (c).

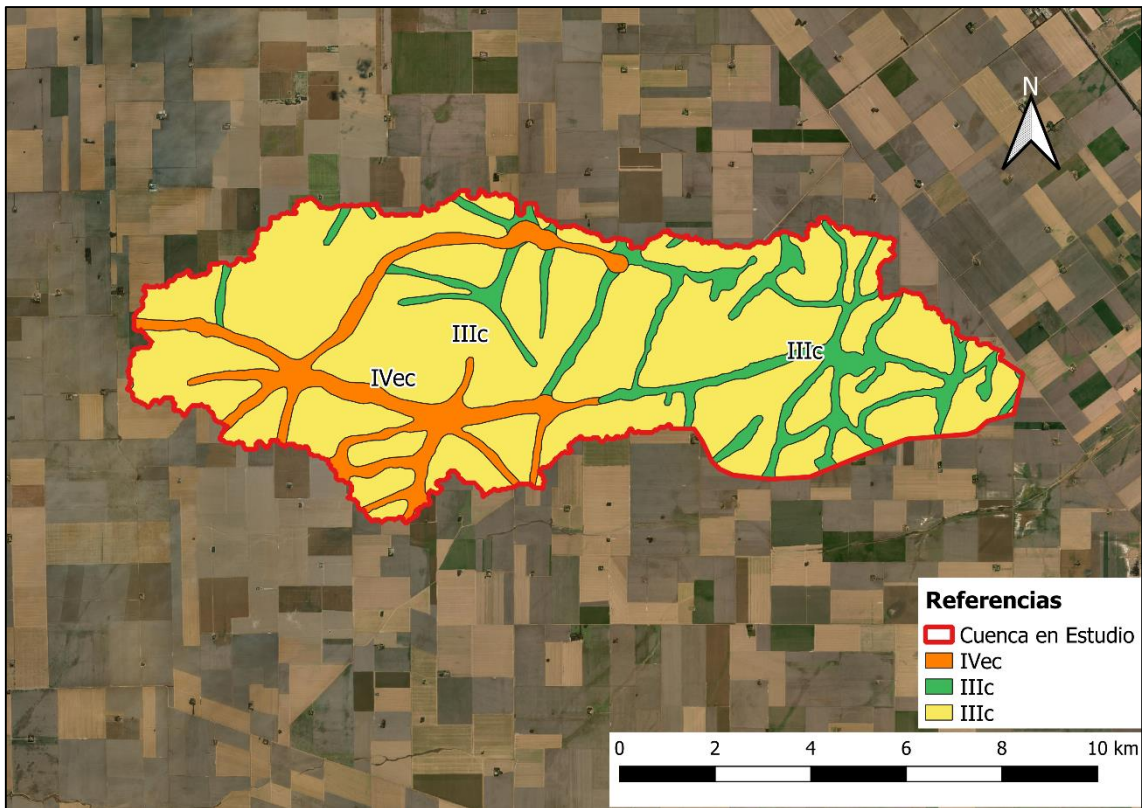


Figura 6. Capacidad de uso del suelo por clase en la cuenca en estudio (*IIIc* amarillo: Serie Oncativo; *IIIc* verde: Serie Manfredi; *IVec* naranja: Asociación Manfredi 60% y Manfredi en fase por erosión moderada a severa 40%)

3.1.7 Topografía

Para la demarcación del área de la cuenca se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) MDE-Ar v2.1. Dicho modelo es provisto por el Instituto Geográfico Nacional, cuenta con una resolución espacial de 30 m x 30 m y una resolución vertical de 2 metros. Estos modelos se trabajaron en un sistema de proyección GCS-WGS-1984. El análisis del MDE se realizó con el software QGIS 3.16.11 (Equipo de desarrollo de qgis, 2020). Se trata de una cuenca que presenta un relieve de lomas planas muy extendidas, con un desnivel topográfico de 60 m. La cota más alta, al oeste del área, es de aproximadamente 365 msnm, la cota más baja es de 305 msnm y la distancia desde el punto más lejano hasta la salida de la cuenca es de 18 kilómetros, resultando una pendiente promedio de 0,32% (Fig 7).

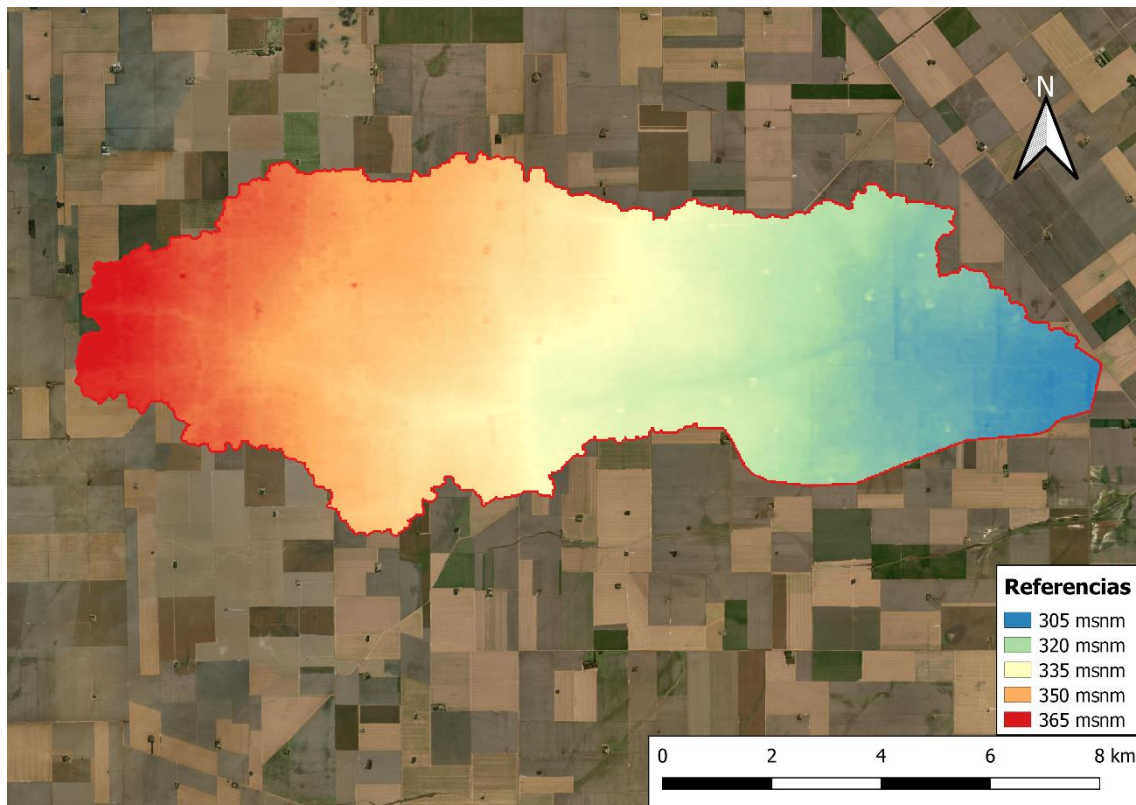


Figura 7. Elevaciones de la Cuenca.

En la Fig. 8 se visualiza el límite externo de la cuenca y las curvas de nivel con equidistancia de 5 metros.

Analizando las curvas de nivel se observa que el relieve es uniforme, sin embargo, se observan dos sectores:

- El primero de ellos, hacia el oeste de la cuenca, tiene una pendiente media de 0,45%, la máxima de 0,66% y la mínima del 0,21%.
- el segundo sector desde la parte central y hacia el este con pendiente media de 0,35%, la máxima de 0,56% y la mínima de 0,23%.

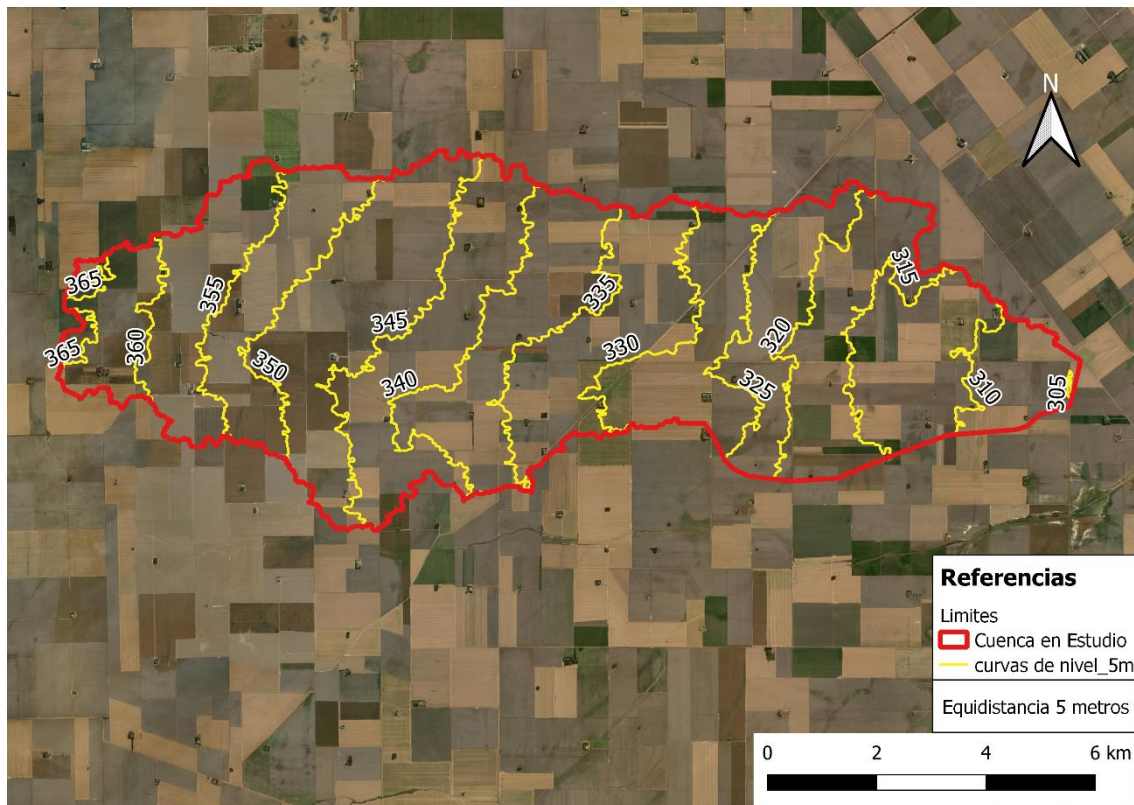


Figura 8, Mapa con curvas de nivel (Equidistancia 5 m) y delimitación de la cuenca.

En general la pendiente disminuye en el sentido oeste este y en proximidad a la salida de la cuenca, debido a la baja pendiente, suele generarse acumulación de sedimentos y encharcamientos temporarios luego de una precipitación de gran intensidad.

3.2 Hidrología, red de drenaje

Las grandes cuencas o macro cuencas en la cual se encuentra el área de estudio son cerradas o endorreicas del mar de Ansenúza (laguna de Mar Chiquita), al formar parte de la cuenca del Río Xanaes (Río Segundo). Como fue descrito la pendiente principal del área es oeste – este, pero que “como formas menores del paisaje se observan líneas de escurrimiento deprimidas de origen estructural, que se entrecruzan en dos sentidos principales (noroeste – sudeste y suroeste – noreste), conformando un diseño de drenaje dendrítico.

Los procesos erosivos por acción del agua son leves a moderados sobre todo próximo al cauce principal de la cuenca. Esta erosión es de forma laminar y en menor frecuencia en surcos aislados. Esto ocurre porque ante lluvias torrenciales

o de alto milimetraje, el agua que escurre, supera la capacidad de conducción de las vías naturales y bajos estructurales pasando de un bajo estructural a otro, aumentando su velocidad y caudal y por lo tanto su poder erosivo (Fig. 9 y 10). Este sistema de funcionamiento de las cuencas, por su naturaleza y por estar profundamente alterado, dificulta saber el destino de los escurrimientos y el cálculo hidráulico de los mismos.



Figura 9. Imagen de los Bajos estructurales de la cuenca (círculos de color amarillo) (11 de agosto de 2019, Google Earth).

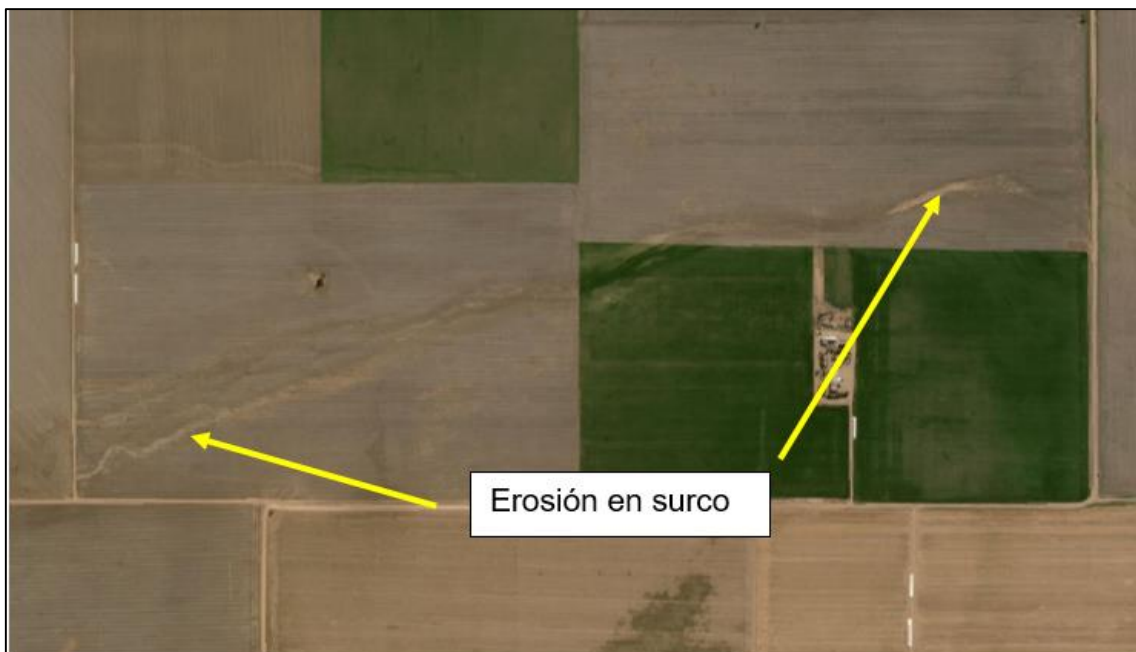


Figura 10. Signos de erosión en surco sobre la vía de escurrimiento principal de la cuenca. (11 de agosto de 2019, Google Earth).

Para la delimitación de divisorias de agua y la red de drenaje se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) antes mencionado y se procesó en el software QGis 3.16.11. Como se puede observar en la Fig.11, la dirección del escurrimiento es de oeste a este principalmente y la forma es dendrítica.

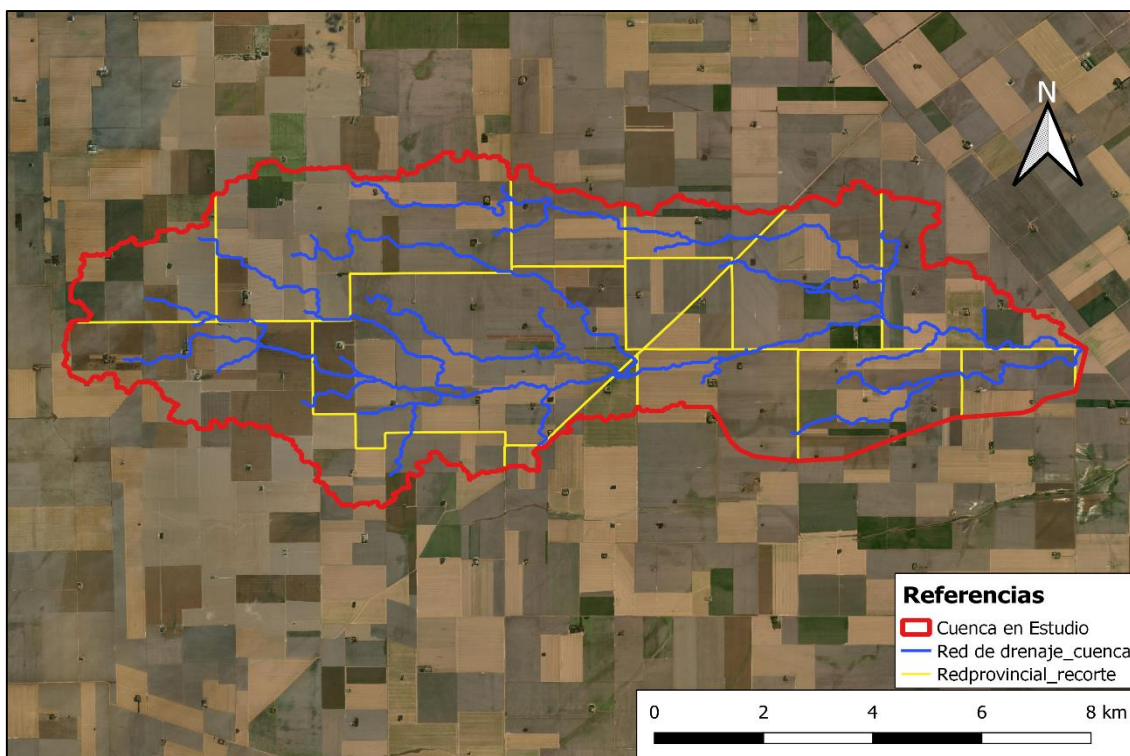


Figura 11. Red de drenaje y red vial provincial de la cuenca.

3.3 Dimensión económica-productiva y territorial

3.3.1 Uso y manejo del suelo

El área de estudio se caracteriza por presentar una generalizada adopción de agricultura extensiva bajo el sistema de siembra directa, donde los principales cultivos que se desarrollan son soja, maíz, trigo, sorgo y maní. En cuanto a la actividad ganadera, está cobrando importancia los sistemas de engorde intensivo de ganado porcino y aviar.

Los sistemas productivos, en la actualidad, realizan o han adoptado pocas prácticas agronómicas o ingenieriles de conservación de suelos. La práctica de mayor difusión es el cultivo de cobertura que en términos relativos alcanza el 3% del área total cultivada.

En la zona existe una importante presencia de la agroindustria. Las más destacadas son las industrias de maquinaria e implementos agrícolas, la producción de chacinados y la molinera (de trigo).

3.3.2 Tenencia de la tierra.

Según el Censo Nacional Agropecuario del año 2018 (INDEC, 2021), el 40% de la superficie total censada en el departamento Río Segundo, era explotada bajo el régimen de propiedad, el 56% bajo el sistema de arrendamiento y el 4% bajo otros tipos de contrato (Fig. 12).

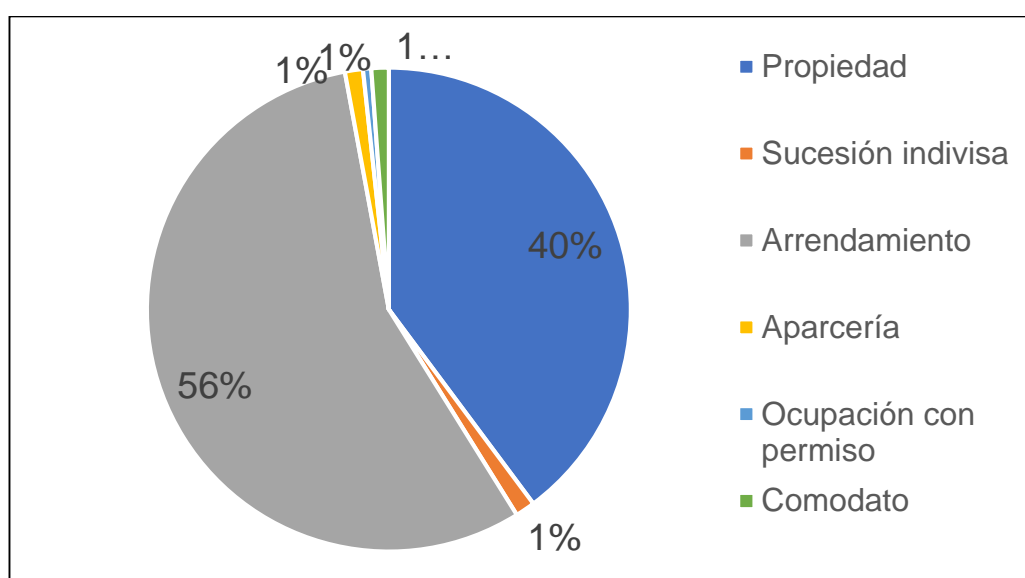


Figura 12. Tipo de dominio y régimen de tenencia de la tierra.

3.3.3 Formas de organización social de la producción

La mayoría de los predios de la cuenca bajo estudio se integran en establecimientos de gestión familiar. Se puede afirmar que el 79% de los establecimientos de la cuenca cuentan con mano de obra familiar.

3.3.4 Consorcios

La cuenca en estudio está bajo jurisdicción de dos consorcios de conservación de suelo (CCS) los cuales son: CCS Santa Teresita y el CCS Viejo Algarrobo (Fig. 13).

Los CCS son entidades conformadas por los propios productores, impulsada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba que tienen como función principal: proponer a la Autoridad de Aplicación para su aprobación

los planes y proyectos previamente acordados por el Consorcio; la construcción de obras; la realización de trabajos por sí, por terceros o en concurso con los propietarios de los inmuebles afectados por las tareas que fueran necesarias; la administración y el control del mantenimiento de los planes prediales de conservación de suelos.

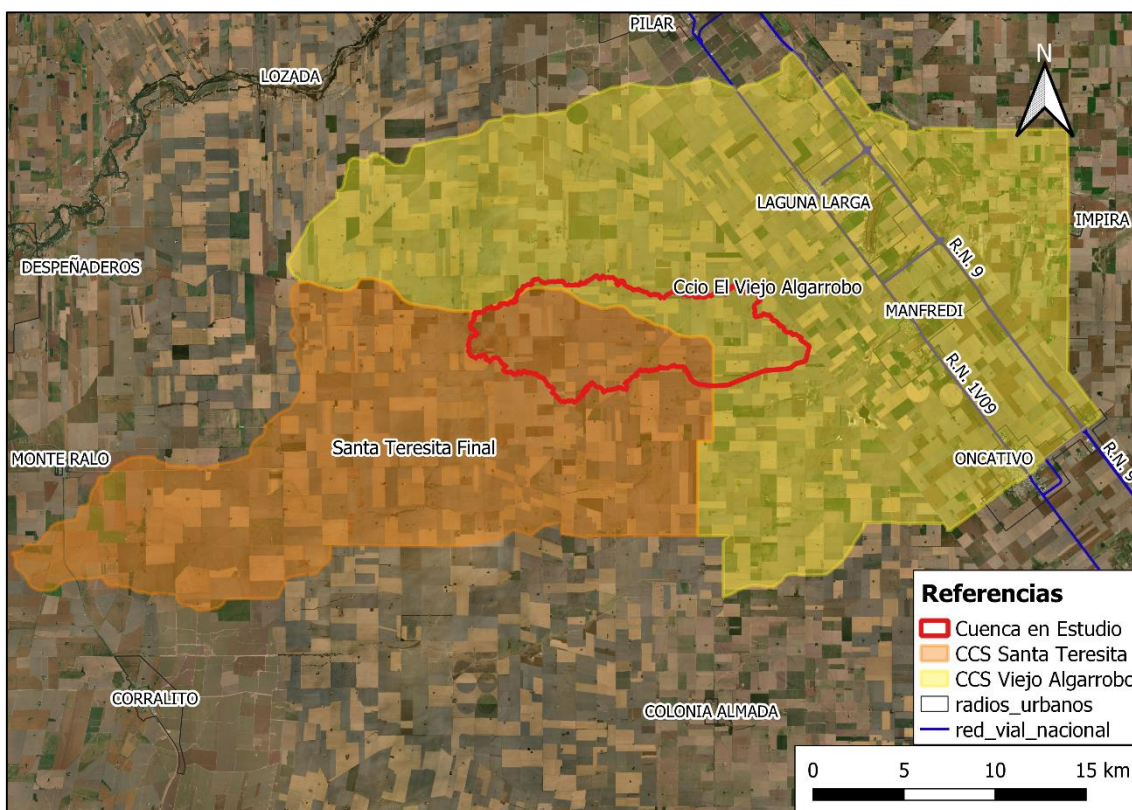


Figura 13. Distribución de los CCS en que se encuentra el área de estudio.

También existen consorcios camineros (CC), los cuales son entidades sin fines de lucro de la provincia de Córdoba administradas por productores agropecuarios cuya función es conservar y mejorar los caminos rurales de la red terciaria como son CC N°100 Laguna Larga y CC N° 222 Manfredi.

A su vez, desde el pasado mes de julio de 2021, estos consorcios quedan bajo la jurisdicción del Consorcio de Gestión Integrada de Cuencas Hídricas "Río Segundo", abarca 1.674.000 hectáreas en la zona central de la provincia de Córdoba.

3.3.5 Uso del suelo y de la secuencia de cultivos a partir de sensores remotos

La disponibilidad y los tipos de vegetación en los suelos afectan a los sistemas agroecológicos, generando un impacto ambiental que por sus características se asocia al cambio climático (Bracalenti A, Müller O, Berbery E., 2017). Por estas razones, el tipo de cobertura del suelo es una variable trascendente en los ambientes rurales.

La información provista por sensores remotos es útil para estudios relacionados con el uso y ocupación de la superficie del suelo, siendo la clasificación de imágenes satelitales una de las herramientas más importantes de la teledetección. Entre las ventajas de ésta respecto de otros métodos que obtienen datos de campo, se encuentran: un menor costo, cobertura de grandes áreas y la posibilidad de repetir la obtención de los datos a lo largo del tiempo (Nolasco M., Willington E., 2014).

La clasificación de imágenes hace referencia a la tarea de extraer clases de información de una imagen ráster multibanda. El ráster resultante de la clasificación se puede utilizar para crear mapas temáticos tales como uso del suelo, cobertura vegetal, red vial y red de drenaje, etc. Existen dos tipos de clasificación de imágenes: supervisada y no supervisada. Ambas permiten explorar diferentes atributos por medio del análisis estadístico multivariado.

Este tipo de análisis identifica los valores de cada píxel de una o varias bandas de una imagen ráster, crea y evalúa las clases y, finalmente, reclasificar cada clase de acuerdo a las probabilidades obtenidas (Chuvienco Salinero E.,2008).

En el área de estudio, el principal uso del suelo es la agricultura extensiva bajo siembra directa, con predominio de cultivos de verano como la soja y el maíz y en menores proporciones, cultivos como el sorgo, el maní y pasturas para la ganadería como alfalfa.

Mediante relevamientos de campo y con la utilización del software QGis 3.16 se estimaron para cuatro campañas agrícolas sucesivas desde 2006-2007 hasta 2009-2010:

- La superficie ocupada por los principales cultivos estivales, gramíneas y leguminosas, en cada una de las campañas

- Las secuencias de cultivos y su grado de participación relativa dentro del área de estudio.

Metodología

El proceso de clasificación de imágenes provenientes de sensores remotos es una secuencia de trabajo que involucra varios pasos:

Paso 1: Elección de Imágenes

Se utilizaron imágenes satelitales proveniente del sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), instrumento esencial a bordo del Landsat 7 (extraídas de <https://earthexplorer.usgs.gov/>) para analizar las campañas 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010.

Todas las imágenes se corresponden con fechas de cosecha de los cultivos (julio-agosto).

Paso 2: Apilación de bandas

Con el fin de lograr una imagen multiespectral partiendo de cada una de las bandas provistas por el satélite, utilizando QGis 3.16.11 se añadieron cada una de las bandas para una misma fecha de adquisición y se procedió al “apilamiento” de las mismas, se utilizó el algoritmo juego de bandas.

Paso 3: Recorte de Imágenes

Se recortó cada una de las imágenes multiespectrales, quedando delimitadas al área de estudio para su posterior clasificación (Fig. 14).

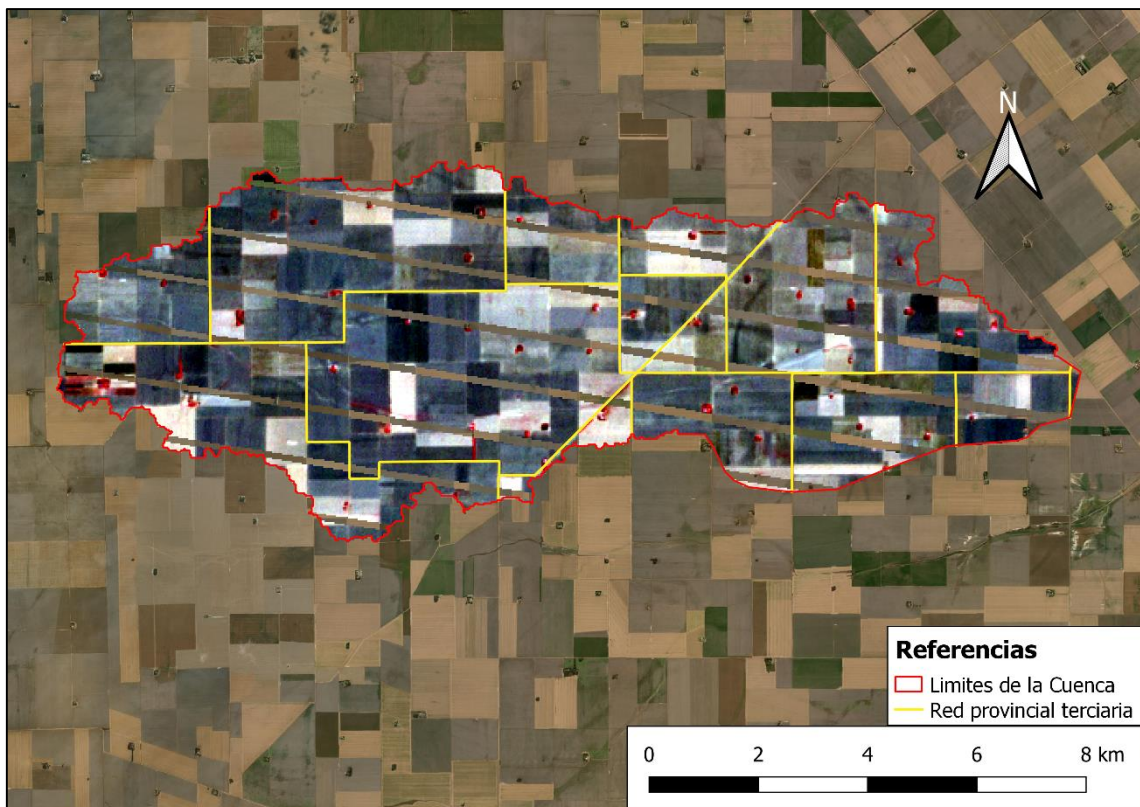


Figura 14. Recorte de imagen satelital. Imagen Landsat 7 en composición de bandas infrarroja, de fecha 22/10/2009 recortada según los límites del área en estudio.

Paso 4: Clasificación supervisada

Se realizó una clasificación supervisada, definiendo las clases de uso del suelo del área de estudio donde se definieron cuatro clases (Fig. 15) y se denominaron de la siguiente manera:

- **Clase I “Gramíneas”**: cultivos de maíz y sorgo
- **Clase II “Leguminosas”**: cultivos de soja y maní.
- **Clase III “No agrícola”**: montes naturales e implantados, casco de estancia, parque.
- **Clase IV “Caminos”**: caminos rurales.

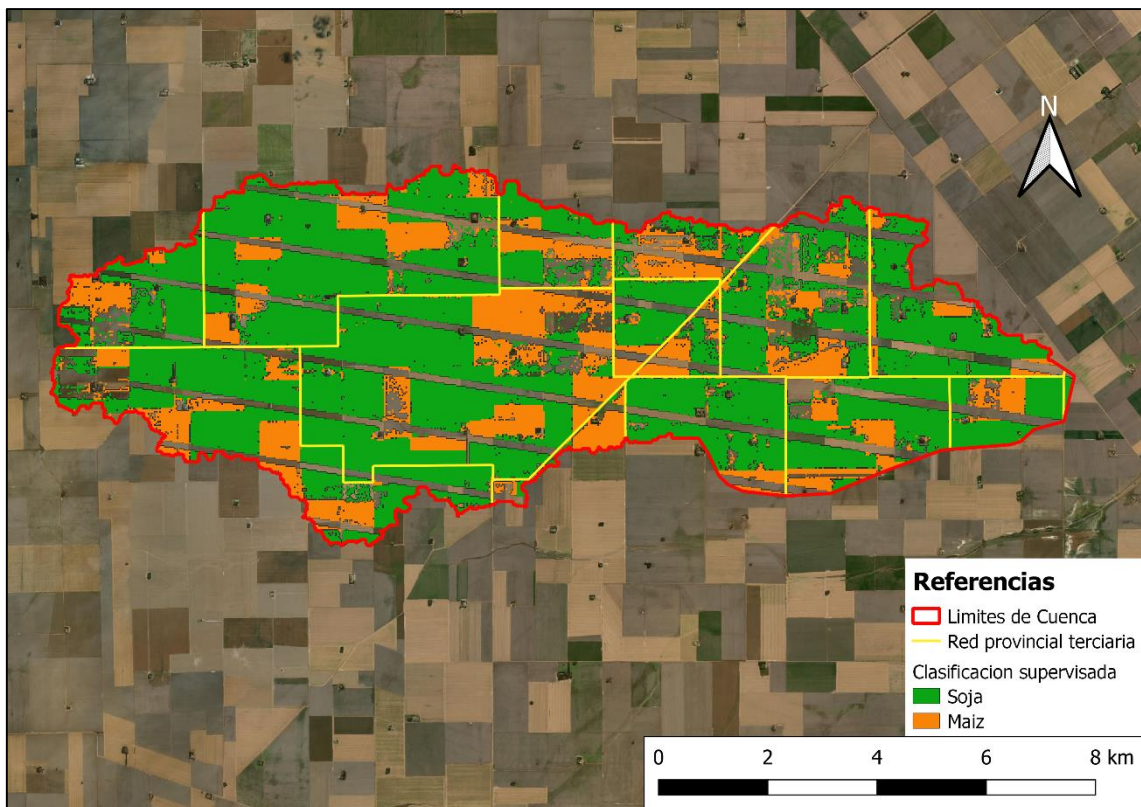


Figura 15. Clasificación Supervisada. Clases de uso del suelo sobre Imagen Landsat 7 de fecha 22/10/2009.

Paso 5: Vectorización de cada imagen

Se transformó la imagen ráster a vector a fin de poder determinar la superficie de ocupación de cada clase establecida.

Paso 6: Limpieza de imágenes

Los archivos vectorizados obtenidos a partir de un ráster contienen gran cantidad de polígonos sin importancia significativa (micropolígonos) que generan errores en procedimientos de cálculo y visualmente muestran imperfecciones.

Para solucionar ese inconveniente se seleccionaron todos los registros en una tabla de atributos de acuerdo a un valor mínimo previamente establecido. En el caso bajo estudio, valores menores a dos hectáreas fueron eliminados. Este aspecto puede observarse en la Fig. 16.

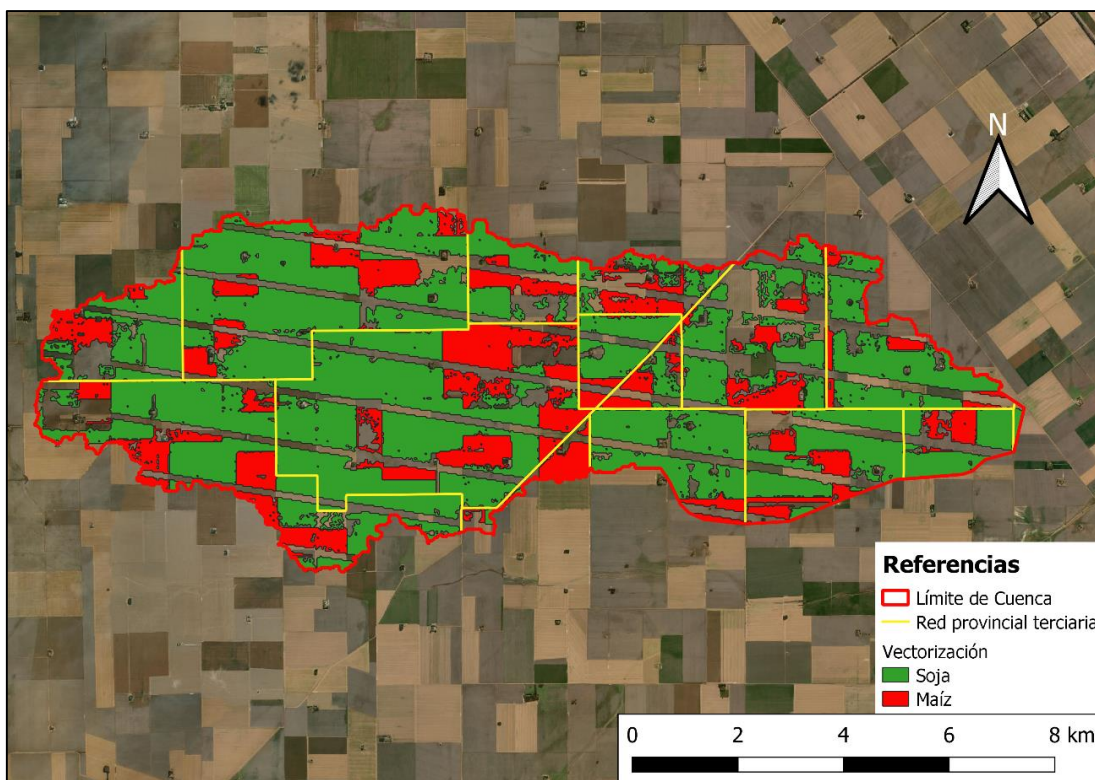


Figura 16. Vectorización y limpieza de imagen clasificada. Clases de uso del suelo post-limpieza sobre Imagen Landsat 7 de fecha 22/10/2009.

A continuación, se presenta toda la información generada a partir del trabajo sobre las imágenes satelitales realizado y descrito en los 6 pasos que previamente se detallaron.

Superficie de ocupación de los principales cultivos estivales en cada campaña

A partir de la clasificación supervisada se obtuvieron los resultados observables en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Superficie ocupada (en hectáreas) por las distintas clases de uso de suelo: gramíneas (maíz y sorgo), leguminosas (soja y maní), No Agrícola (montes), Caminos rurales - periodo 2007-2010.

Clases Campañas	Gramíneas	Leguminosas	No Agrícola	Camino rural
2006-2007	2222,5	5776,7	86.43	60.58
2007-2008	1814,6	6184,6	86.43	60.58
2008-2009	2494,7	5504,5	86.43	60.58
2009-2010	1715,1	6284,1	86.43	60.58
Promedio	2061,7	5937,5	86.43	60.58

Tabla 5. Superficie ocupada (en %) por las distintas clases de uso de suelo: gramíneas (maíz y sorgo), leguminosas (soja y maní), No Agrícola (montes), Caminos rurales - periodo 2007-2010.

Campañas	Gramíneas	Leguminosas	No Agrícola	Camino rural
2006-2007	27,3	70,9	1,1	0,7
2007-2008	22,3	75,9	1,1	0,7
2008-2009	30,6	67,6	1,1	0,7
2009-2010	21,1	77,1	1,1	0,7
Promedio	25,3	72,9	1,1	0,7

De los valores obtenidos se desprende que en promedio y en términos relativos, la clase Leguminosas ocupó el 72,9% de la superficie con tendencia creciente en las campañas analizadas, mientras que Gramíneas, con un 25,3% de ocupación, mostró una tendencia decreciente para esas mismas campañas. En la Fig. 17 y a modo de ejemplo, se observa la distribución geográfica del uso del suelo para la campaña 2008-2009.

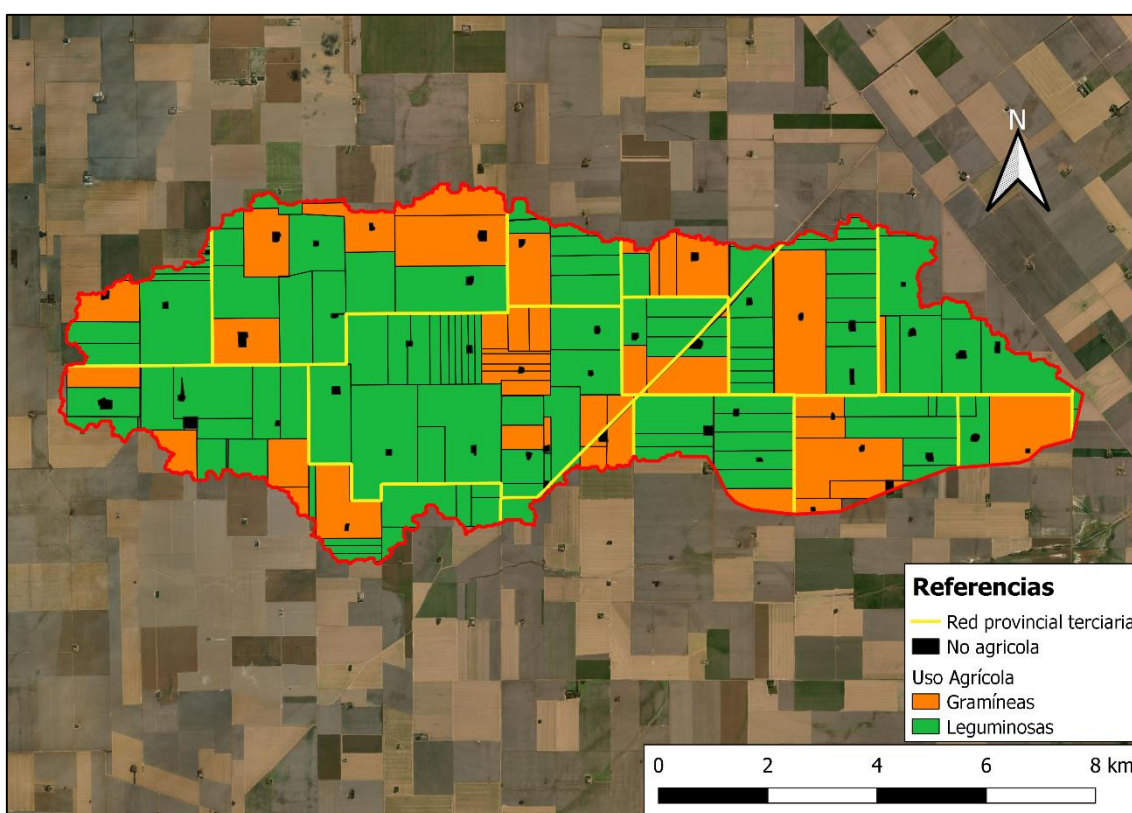


Figura 17. Distribución geográfica de distintas clases de uso del suelo. Campaña 2008-2009.

A partir de los datos suministrados por la Secretaría de Agricultura del MAyG de Córdoba, a nivel de los departamentos Río Segundo (Tabla 6) y Santa María (Tabla 7), indican que la participación de gramíneas tuvo una tendencia decreciente si comparamos las diferencias interanuales, esto es notable principalmente en el departamento Río Segundo.

Por otra parte, la relación gramínea/leguminosa (G/L) fue del 29% y 16% respectivamente, cifras que se ubican por debajo del 35% de la cuenca en estudio.

Tabla 6. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en Departamento Río Segundo.

Campaña	Gramíneas (ha)	Leguminosas (ha)	Relación G/L (%)	Diferencia interanual
2006-2007	85000	301350	28	
2007-2008	103000	277350	37	9
2008-2009	84000	309200	27	-10
2009-2010	73000	303000	24	-3
Promedio	86250	297725	29	

Tabla 7. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en Departamento Santa María.

Campaña	Gramíneas (ha)	Leguminosas (ha)	Relación G/L (%)	Diferencia interanual
2006-2007	6500	150000	4	
2007-2008	26500	175000	15	11
2008-2009	25000	122500	20	5
2009-2010	30000	135200	22	2
Promedio	22000	145675	16	

En la tabla 8 se sintetizan las consideraciones realizadas precedentemente para la cuenca en estudio.

Tabla 8. Porcentaje de participación de Gramíneas y Leguminosas en la cuenca en estudio.

Campaña	Gramíneas (ha)	Leguminosas (ha)	Relación G/L (%)	Diferencia Interanual
2006-2007	2222,5	5776,7	38	
2007-2008	1814,6	6184,6	29	-9
2008-2009	2494,7	5504,5	45	16
2009-2010	1715,1	6284,1	27	-18
Promedio	2061,7	5937,5	35	

Análisis de la secuencia de cultivos: Una rotación de cultivos consiste en alternar plantas de distintas familias botánicas y con necesidades nutricionales diferentes, en un mismo lugar, durante distintos ciclos o campañas agrícolas, evitando que el suelo agote sus nutrientes y que las enfermedades que afectan a un tipo de plantas se perpetúen en un tiempo determinado (Karlen DL, Varvel GE, Bullock DG, Cruse RM., 1994).

En el área de estudio, para comprobar si se realizaron rotaciones como prácticas culturales habituales, se analizaron las secuencias de cultivos observables de las cuatro campañas durante el periodo 2007-2010 a través del análisis multitemporal de usos del suelo sobre imágenes satelitales (Nolasco M, Willington E, Bocco M., 2016).

Con la información recabada, las secuencias de cultivos quedaron agrupadas en cuatro categorías (Tabla 9), definidas de la siguiente manera:

Tabla 9. Secuencia de cultivos en cuatro campañas

Categorías	Relación leguminosa/ gramínea	Participación de gramínea	Campañas con gramínea
Categoría 1	0:4	0%	Ninguna
Categoría 2	1:4	25%	Una
Categoría 3	2:4	50%	Dos
Categoría 4	3:4	75%	Tres

Para las categorías definidas anteriormente, el análisis multitemporal de usos de suelo, arrojaron los datos detallados en la tabla 10.

Tabla 10. Superficie en hectáreas y participación relativa (en %) de las principales secuencias de cultivo.

Categorías	Relación Gramínea/Leguminosa	Superficie (ha)	Participación (%)
1	0:4	2532,3	31,7
2	1:4	3421,5	42,8
3	2:4	1533,3	19,2
4	3:4	512,2	6,4
		7999,2	100

Del análisis de la tabla precedente se observa que las categorías 1 y 2 son las que mayoritariamente adoptaron los productores.

Los porcentajes de uso del suelo de estas alternancias fueron del 31,7% para la secuencia 0:4 y de 42,8% para la 1:4, lo que indica que en el área en estudio se manejó bajo prácticas culturales como monocultivo de soja y baja participación de gramíneas (74,5 %), mientras que la rotación adecuada de cultivos quedó reducida a aproximadamente en un 25,6% (Categoría 3 y 4).

En la Fig. 18 se observa la distribución espacial de cada categoría de secuencias de cultivos para el periodo analizado.

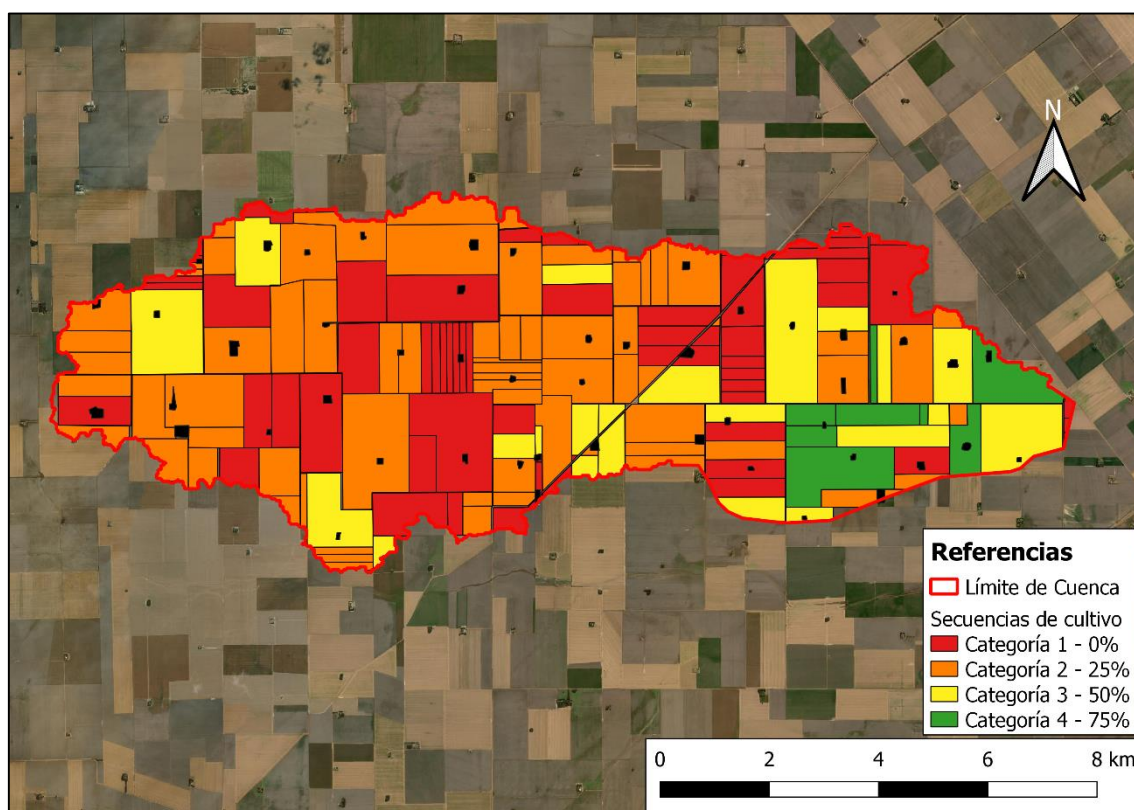


Figura 18. Distribución por categorías de las secuencias de cultivos 2007-2010 dentro del área de estudio.

3.4 Dimensión legal-normativo-institucional

En materia de legislación ambiental es importante tener en cuenta algunos aspectos de la Constitución Nacional Argentina porque es la que determina y organiza la estructura jurídica e institucional del sistema. Fija competencias y jurisdicciones.

Nos permite conocer los derechos y deberes y a quienes le corresponde legislar y gestionar, con qué atribuciones y cuáles son los límites en cada caso para llevar adelante las funciones (ejecutiva, legislativa, judicial) y los distintos niveles (nación, provincia y municipio).

Esto es importante para poder conocer el contenido de las normas que se relacionan con el ambiente.

Dentro de esta organización se incorpora la temática ambiental con la reforma del año 1994.

Incorpora una cláusula ambiental en el art. 41 que expresa:

Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley.

Las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales. Corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquéllas alteren las jurisdicciones locales.

Se prohíbe el ingreso al territorio nacional de residuos actual o potencialmente peligrosos, y de los radiactivos.

Otro artículo importante es el N° 43, éste es un recurso de amparo para ser utilizado en los derechos que protegen el ambiente o en los derechos de incidencia colectiva y establece quienes los pueden presentar y sus características. Es un mecanismo que permite proteger o defender derechos, de forma rápida (expeditiva).

También existen artículos, dentro de la CN, a tener en cuenta como la figura del defensor del pueblo de la nación que en el art.86 establece como órgano independiente instituido en el ámbito del congreso de la nación. Con autonomía y legitimación procesal.

En el título II Gobiernos de provincia (art. 121 a 128):

Las provincias conservan todo el poder no delegado a la nación (121)

Se dan sus propias instituciones y se rigen por ellas (122), dictan sus propias constituciones (123).

Corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio.

En el área de estudio y dadas las condiciones de utilización del territorio, pueden estar sujetos a la aplicación de leyes de orden nacional, provincial y legislación municipal.

4) A continuación, se mencionan las principales comenzando por leyes nacionales y prosiguiendo por las leyes provinciales.

3.4.1 Leyes Nacionales

Leyes de Presupuestos Mínimos

- **LEY N° 25.675**

La Ley General del Ambiente establece los presupuestos mínimos ambientales en el territorio nacional y tiene por objeto imponer condiciones necesarias para asegurar la protección ambiental.

Los presupuestos mínimos conceden una tutela ambiental uniforme o común para todo el territorio nacional. En su contenido, debe prever las condiciones necesarias para garantizar la dinámica de los sistemas ecológicos, mantener su capacidad de carga y, en general, asegurar la preservación ambiental y el desarrollo sustentable. Además, establece el proceso de “ordenamiento ambiental” fijando aspectos políticos, físicos, sociales, tecnológicos, culturales, económicos, jurídicos y ecológicos y permite asegurar el uso ambientalmente adecuado de los recursos, posibilitar la máxima producción y utilización de los diferentes ecosistemas, garantizar la mínima degradación, teniendo en cuenta la

vocación de cada zona o región, en función de los recursos ambientales y la sustentabilidad social, económica y ecológica.

- **LEY N°25688**

Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional. Utilización de aguas. Cuenca hídrica superficial. Comité de cuencas hídricas.

- **LEY N°25831**

La presente ley establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar el derecho de acceso a la información ambiental que se encontrare en poder del Estado, tanto en el ámbito nacional como provincial, municipal y de la Ciudad de Buenos Aires, como así también de entes autárquicos y empresas prestadoras de servicios públicos, sean públicas, privadas o mixtas.

- **LEY N°26.331**

Bosques nativos. Presupuestos mínimos de protección ambiental. Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos, y de los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad. Asimismo, establece un régimen de fomento y criterios para la distribución de fondos por los servicios ambientales que brindan los bosques nativos.

- **LEY N°26815**

La presente ley establece los presupuestos mínimos de protección ambiental en materia de incendios forestales y rurales en el ámbito del territorio nacional. Se aplica a las acciones y operaciones de prevención, presupresión y combate de incendios forestales y rurales que quemen vegetación viva o muerta, en bosques nativos e implantados, áreas naturales protegidas, zonas agrícolas, praderas, pastizales, matorrales y humedales y en áreas donde las estructuras edilicias se entremezclan con la vegetación fuera del ambiente estrictamente urbano o estructural. Así mismo alcanza a fuegos planificados, que se dejan

arder bajo condiciones ambientales previamente establecidas, y para el logro de objetivos de manejo de una unidad territorial.

- **LEY N°27.279**

De protección ambiental para la gestión de los envases vacíos de fitosanitarios en virtud de la toxicidad del producto que contuvieron, requiriendo una gestión diferenciada y condicionada.

- **LEY N°27520**

La presente ley establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar acciones, instrumentos y estrategias adecuadas de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático en todo el territorio nacional en los términos del artículo 41 de la Constitución Nacional. Son objetivos de la presente ley:

- a) Establecer las estrategias, medidas, políticas e instrumentos relativos al estudio del impacto, la vulnerabilidad y las actividades de adaptación al Cambio Climático que puedan garantizar el desarrollo humano y de los ecosistemas.
- b) Asistir y promover el desarrollo de estrategias de mitigación y reducción de gases de efecto invernadero en el país.
- c) Reducir la vulnerabilidad humana y de los sistemas naturales ante el Cambio Climático, protegerlos de sus efectos adversos y aprovechar sus beneficios.

Leyes Especiales

- **LEY N°22.428**

Régimen legal para el fomento de la acción privada y pública tendiente a la conservación y recuperación de la capacidad productiva de los suelos. El Estado nacional y las provincias que se adhieran al régimen de la presente ley fomentarán la acción privada destinada a la consecución de los fines antes mencionados.

Las respectivas autoridades de aplicación podrán declarar distrito de conservación de suelos toda zona donde sea necesario o conveniente emprender programas de conservación o recuperación de suelos y siempre que se cuente con técnicas de comprobada adaptación y eficiencia para la región o

regiones similares. Dicha declaración podrá igualmente ser dispuesta a pedido de productores de la zona.

- **LEY N°22.421**

La presente norma declara de interés público la fauna silvestre que temporal o permanentemente habita el Territorio de la República, así como su protección, conservación, propagación, repoblación y aprovechamiento racional. A los fines de esta Ley se entiende por fauna silvestre: 1) Los animales que viven libres e independientes del hombre, en ambientes naturales o artificiales; 2) Los bravíos o salvajes que viven bajo control del hombre, en cautividad o semicautividad; 3) Los originalmente domésticos que, por cualquier circunstancia, vuelven a la vida salvaje convirtiéndose en cimarrones. Quedan excluidos del régimen de la presente Ley los animales comprendidos en las leyes sobre pesca. La autoridad jurisdiccional de aplicación acordará con la Secretaría de Estado de Intereses Marítimos la división correspondiente en los casos dudosos.

- **LEY N°25.080**

Institúyese un régimen de promoción de las inversiones que se efectúen en nuevos emprendimientos forestales y en las ampliaciones de los bosques existentes. Ámbito de aplicación y alcances. Generalidades. Adhesión Provincial. Tratamiento Fiscal de las Inversiones. Apoyo Económico No Reintegrable a los Bosques Implantados. Disposiciones Complementarias.

- **LEY N°26.438**

El CONSEJO HÍDRICO FEDERAL (COHIFE) está integrado por los Estados provinciales que suscribieron oportunamente el ACTA CONSTITUTIVA del referido Consejo y por el Estado nacional a través de la SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS dependiente de la SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS del MINISTERIO DE PLANIFICACION FEDERAL, INVERSION PUBLICA Y SERVICIOS o el organismo que en el futuro le suceda.

ARTICULO 3º — Reconócese al CONSEJO HIDRICO FEDERAL (COHIFE) como persona jurídica de derecho público y como instancia federal para la concertación y coordinación de la política hídrica federal y la compatibilización de las políticas, legislaciones y gestión de las aguas de las respectivas

jurisdicciones, respetando el dominio originario que sobre sus recursos hídricos les corresponden a las provincias.

El Consejo Hídrico Federal creado en diciembre del 2002, fue el resultado de un acuerdo sobre la conveniencia y necesidad que entre las provincias y la Nación exista una instancia federal, en la que los puntos de vista de las provincias sean expresados por quienes tienen en ellas la responsabilidad directa de la gestión hídrica.

La creación del COHIFE facilita el intercambio de ideas y experiencias entre provincias que no son parte de la misma cuenca, lo cual les brinda una perspectiva más amplia y también más afín con la que tienen los organismos nacionales. Adicionalmente les ayuda a percibir que muchos problemas -y sus posibles soluciones- son comunes a todas las cuencas.

3.4.2 Leyes Provinciales

- **LEY N° 7.343**

La Provincia de Córdoba da carácter constitucional al cuidado, preservación, conservación y defensa del ambiente, estableciendo que toda persona tiene derecho a gozar de un medio ambiente físico y social libre de factores nocivos para la salud, a la conservación de los recursos naturales y culturales y a los valores estéticos que permitan asentamientos humanos dignos, y la preservación de la flora y la fauna.

El agua, el suelo y el aire como elementos vitales para el hombre, son materia de especial protección.

La tierra es un bien permanente de producción, garantiza su preservación y recuperación, procura evitar la pérdida de fertilidad, la erosión y regula el empleo de las tecnologías de aplicación

El Estado protege el medio ambiente, preserva los recursos naturales renovables y no renovables, ordenando su uso y explotación, en base a su aprovechamiento racional e integral que preserve el patrimonio arqueológico, paisajístico y la protección del medio ambiente y resguarda el equilibrio del sistema ecológico, sin discriminación de individuos o regiones.

Un aspecto que merece particular atención son los referidos a la protección de los acuíferos libres o confinados, existentes en la Pcia. de Córdoba mediante LEY N°5589. (1973). Las aguas que sean de dominio público y su aprovechamiento, están sujetos al interés general, se reglamenta su uso racional y adopta las medidas conducentes para evitar su contaminación mediante la aplicación del Código de Aguas.

El Estado Provincial resguarda la supervivencia y conservación de los bosques, promueve su explotación racional y correcto aprovechamiento, propende al desarrollo y mejora de las especies y a su reposición mediante la reforestación que salvaguarde la estabilidad ecológica

Establece que todas las personas cuyas acciones, obras o actividades degraden o sean susceptibles de degradar el ambiente en forma incipiente, corregible o irreversible, quedan obligadas a instrumentar todas las medidas necesarias para evitar dicha degradación.

- **LEY N° 8751**

La presente Ley tiene por objeto establecer las acciones, normas y procedimientos para el Manejo del Fuego (prevención y lucha contra incendios) en áreas rurales y forestales en el ámbito del territorio de la Provincia de Córdoba. La Autoridad de Aplicación de la presente Ley es el Ministerio de la Producción y Trabajo, a través de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables. Hoy Agencia Córdoba Ambiente.

- **LEY N° 8.863**

Establece la creación y funcionamiento de Consorcios de Conservación de los Suelos (CCS), dentro del territorio de la Provincia, los cuales serán personas de derecho público, con capacidad para actuar privada y públicamente de conformidad con las leyes generales y las especiales referidas a su funcionamiento.

Los CCS tienen como función principal: proponer a la Autoridad de Aplicación para su aprobación los planes y proyectos previamente acordados por el Consorcio; la construcción de obras; la realización de trabajos por sí, por terceros o en concurso con los propietarios de los inmuebles afectados por las tareas que

fueran necesarias; la administración y el control del mantenimiento de los planes prediales de conservación de suelos.

Las jurisdicciones quedan comprendidas dentro de las áreas envueltas por cuencas hidrográficas, cursos de agua, embalses u otros accidentes naturales que conformen una zona ecológicamente homogénea a los efectos de realizar los trabajos de conservación y mantenimiento de los suelos. Esa delimitación puede ser propuesta por cada Consorcio, o por la Autoridad de Aplicación

- **LEY N° 8.936**

La Ley de Conservación y la Prevención de Degradación de los Suelos, establece que todos los suelos rurales de propiedad privada o pública están sometidos a la presente Ley.

La autoridad de Aplicación de dicha Ley desde 2019 es ejercida por la Secretaría de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, promoverá el conocimiento y la difusión de las prácticas conservacionistas mediante los programas existentes y establece multas y sanciones para los sujetos que no cumplan.

Promueve la conservación y control de la capacidad productiva de los suelos, la prevención de todo proceso de degradación, la recuperación de los suelos degradados y la promoción de la educación conservacionista del suelo”.

Los tenedores de las tierras a cualquier título que pretendan desarrollar actividades productivas en los distritos de prevención y conservación de suelos gozarán de los beneficios, para lo cual deberán presentar un plan predial de manejo racional del suelo confeccionado por Ingeniero Agrónomos habilitado por el Colegio Profesional de Ingenieros Agrónomos de la Provincia de Córdoba y/o cualquier otro profesional habilitado para tal fin, el que tendrá una duración mínima de cinco (5) años, pudiendo ser modificado por la misma vía. La Autoridad de Aplicación realizará un monitoreo y fiscalización permanente sobre aquellos predios comprendidos en los distritos de preservación y conservación de suelos que no se haya incorporado al sistema tal como se especifica.

En caso de verificar que la actividad productiva produce el deterioro de la capacidad productiva del suelo, será obligatorio la incorporación del predio al plan de prevención y conservación de suelos, no pudiendo acceder a la continuidad de los beneficios otorgados por ley. Promover el conocimiento y la

difusión de las prácticas conservacionistas mediante la creación, estructuración y desarrollo del Programa de Agricultura Sustentable, el que se ejecutará en los Distritos de Prevención y Conservación de Suelos”.

En los Distritos de Recuperación de Suelos será obligatoria la presentación de planes prediales de recuperación, en forma individual o colectiva, los que deberán ser avalados por la firma de un Ingeniero Agrónomo y/o cualquier otro profesional habilitado para tal fin y aprobados por la Autoridad de Aplicación, asimismo promoverá el conocimiento y la difusión de las prácticas conservacionistas mediante el programa de Agricultura Sustentable o el que lo reemplace, destinado a la transferencia de tecnologías en todo lo referido al manejo de suelos en los sistemas productivos. Asimismo, deberá difundir por la prensa oral, escrita, electrónica y televisiva todo lo referente a la actividad conservacionista y su efecto sobre la sustentabilidad de la producción agropecuaria”.

Todo productor que no cumpla con lo establecido será pasible de sanciones.

- **LEY N° 8.973**

Adhesión Ley 24.051 RESIDUOS PELIGROSOS

Algunas actividades intensivas deberán inscribirse como generadoras de residuos peligrosas debiendo especificar el procedimiento y prácticas para la gestión de los residuos.

- **LEY N° 9164**

PRODUCTOS QUÍMICOS O BIOLÓGICOS DE USO AGROPECUARIO

Promueve la protección de la salud humana, de los recursos naturales, de la producción agropecuaria y del patrimonio de terceros, de los daños que pudieran ocasionarse por usos contrarios a lo dispuesto en la presente Ley y su reglamentación, y la preservación de la calidad de los alimentos y materias primas de origen vegetal, como también asegurar su trazabilidad y la de los productos químicos o biológicos de uso agropecuario, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la disminución del impacto ambiental que estos productos generan. El organismo de Aplicación de la presente Ley, es la Secretaría de Agricultura y Ganadería o el organismo que la reemplace en

el futuro. sujetos a las disposiciones de esta Ley y sus normas reglamentarias, las personas físicas o jurídicas, privadas o públicas, que actúen en la elaboración, formulación, transporte, almacenamiento, distribución, fraccionamiento, expendio, aplicación, utilización y disposición final de envases usados y toda otra operación que implique el manejo de productos químicos o biológicos destinados a la producción agropecuaria y agroindustrial en todo el territorio de la Provincia de Córdoba.

- **LEY N° 9.306 SICPA**

Son objetivos de la Ley la protección de la salud humana, de los recursos naturales, de la producción animal y la preservación de la calidad de los alimentos y aplica a todo sistema de producción intensiva y concentrada tal como Criaderos de cerdos, pollos, vacunos, animales acuáticos.

Los establecimientos dedicados a esta modalidad de producción deben cumplir las restricciones impuestas por la ley, en cuanto a su ubicación en zonas críticas, distancias mínimas a centros urbanos, escuelas, ríos, arroyos, acuíferos, tratamientos de residuos etc.

Deben tener un sistema de tratamiento permanente de las excretas a través de biodigestores, plantas de tratamiento de líquidos residuales u otros alternativos aprobados o sugeridos por la Autoridad de Aplicación, para el caso de ganado bovino, porcino, caprino, ovino y equino, como así también un tratamiento diferenciado en el caso de cría intensiva de animales acuáticos. Los establecimientos nuevos, deberán presentar EIA para su habilitación y los que vienen funcionando, presentarán Auditoría de cumplimiento de manera tal que puedan ser adecuados a la reglamentación vigente en materia de estándar ambiental.

- **LEY N° 9.814**

ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BOSQUES NATIVOS

Todos los bosques nativos existentes en el territorio provincial -cualquiera sea su origen, así como todos los que se formaren en el futuro están sujetos a la presente ley. El ejercicio de los derechos sobre los bosques nativos de propiedad privada o pública, sus frutos y productos quedan de igual manera sometidos al presente régimen.

Promover la conservación del bosque nativo mediante el Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos y la regulación de la expansión de la frontera agropecuaria, minera y urbana, y de cualquier otro cambio de uso del suelo.

Hacer prevalecer los principios precautorios y preventivos contemplados en la Ley Nacional No 25.675 -General del Ambiente- y en la Ley Nacional No 26.331 -Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos.

Disponer los mecanismos necesarios a fin de promover el incremento de la superficie total y calidad de los bosques nativos y mantener a perpetuidad sus servicios ambientales;

Procurar el mantenimiento de la biodiversidad y de determinados procesos ecológicos y la mejora de los procesos sociales y culturales en los bosques nativos como fuente de arraigo e identidad para sus habitantes;

Garantizar la supervivencia y conservación de los bosques nativos promoviendo su explotación racional y correcto aprovechamiento;

Fomentar las actividades productivas en el bosque nativo sujetas al Plan de Conservación, al Plan de Manejo Sustentable o al Plan de Aprovechamiento con Cambio de Uso del Suelo y Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), según la categoría de conservación a la que pertenezca;

Establecer un régimen de fomento y criterios para compensar a los titulares del bosque nativo.

Fomentar las actividades de docencia e investigación para la conservación, recuperación, enriquecimiento, manejo sostenible y aprovechamiento sustentable del bosque nativo.

En síntesis la Ley establece los criterios para: La conservación, recuperación, restauración, enriquecimiento, manejo y aprovechamiento sostenibles de los bosques nativos, el resguardo de los servicios ambientales que los bosques nativos brindan al resto de los ecosistemas y a las sociedades en su conjunto, presentes y futuras, La determinación de la figura de Titular del bosque y los requisitos de los Planes de Conservación, Planes de Manejo Sostenible y Planes de Aprovechamiento con Cambio de Uso del Suelo para generar compensaciones económicas hacia quienes conserven los bosques nativos según las categorías de conservación I y II establecidas en la presente Ley, y el establecimiento de sanciones ante el incumplimiento de la misma.

- **LEY N°10.208**

La presente Ley determina la política ambiental provincial y, en ejercicio de las competencias establecidas en el artículo 41 de la Constitución Nacional , complementa los presupuestos mínimos establecidos en la Ley Nacional N° 25.675 - General del Ambiente-, para la gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable que promueva una adecuada convivencia de los habitantes con su entorno en el territorio de la Provincia de Córdoba.

ARTÍCULO 2º.- La presente Ley es de orden público y se incorpora al marco normativo ambiental vigente en la Provincia - Ley N° 7343, normas concordantes y complementarias-, modernizando y definiendo los principales instrumentos de política y gestión ambiental y estableciendo la participación ciudadana en los distintos procesos de gestión.

ARTÍCULO 3º.- La política ambiental provincial establece el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- a) Reafirmar el cumplimiento de los presupuestos mínimos contenidos en la Ley Nacional N° 25.675 -General del Ambiente-;
- b) Asegurar el cumplimiento de los principios rectores para la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente -establecidos en la Ley N° 7343 y sus modificatorias- y en el marco normativo provincial ambiental vigente;
- c) Promover el mejoramiento de la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras en forma prioritaria;
- d) Promover la participación ciudadana en forma individual y a través de organizaciones no gubernamentales, académicas y científicas, actores y diversos sectores que afecten el ambiente, para la convivencia de las actividades humanas con el entorno, brindando información ambiental, fortaleciendo las vías de acceso a la información y exigiendo su obligatoriedad en los procesos administrativos de gestión ambiental;
- e) Impulsar la implementación del proceso de ordenamiento ambiental del territorio en la Provincia;
- f) Promover cambios en los valores y conductas sociales que posibiliten el desarrollo sustentable y sostenible fomentando la educación ambiental, tanto en el sistema formal como en el no formal e informal de educación;

g) Organizar e integrar la información ambiental provincial garantizando su libre acceso y la obligación de informar tanto del sector público como del sector privado;

h) Promover la recomposición de los pasivos ambientales provinciales, e i) Promover, en el ámbito del Ministerio Público Fiscal, la asignación de competencia especializada para la investigación penal preparatoria en materia de delitos ambientales.

- **LEY N° 10.467** (Agroforestal)

Promover el desarrollo sostenible y mejorar la situación social, ecológica, paisajística y de producción de las diversas áreas de la Provincia, Promover y complementar la producción en el marco de las Buenas Prácticas Agropecuarias, ayudando a prevenir y evitar los procesos de erosión eólica o hídrica, favoreciendo la infiltración, reducción y consumo de excesos hídricos; Incentivar la protección de los suelos; Mejorar la calidad del aire y del agua; Mejorar el entorno rural, urbano y la calidad de vida de la población cordobesa mediante la implantación o enriquecimiento con especies forestales que pueden ser aprovechadas con el concepto de uso múltiple, asegurando la persistencia del recurso con un criterio de conservación y manejo forestal sostenible, de acuerdo a las Buenas Prácticas Forestales y de la producción con conservación de los recursos naturales, y contribuir a la conservación y restauración de la biodiversidad a los fines de preservar los beneficios ecosistémicos, tales como hábitat de polinizadores naturales y refugio de fauna nativa.

Los propietarios rurales deben tener implantada una superficie de entre el 2 y el 5 % de su establecimiento con especies arbóreas.

- **LEY N° 10.663** (BPA'S)

Las Buenas Prácticas Agropecuarias son parte de la política agroalimentaria y se definen como el conjunto de principios, normas y recomendaciones técnicas, orientadas a asegurar la inocuidad del producto y la protección del ambiente y del personal involucrado con el fin de propender al desarrollo sostenible. Comprende a todos los productores agropecuarios que desarrollen actividades productivas agrícolas, ganaderas, apícolas, mixtas, frutícolas y hortícolas -tanto

extensivas como intensivas- en establecimientos radicados dentro de la Provincia de Córdoba

Se Instrumenta un sistema de incentivos de aportes económicos no reintegrables (ANR) para que los productores agropecuarios que desarrollen las Buenas Prácticas Agropecuarias. entendiéndose por tal a la persona humana o jurídica que -en calidad de propietario, poseedor, arrendatario, comodatario, aparcerero, contratista accidental y las personas jurídicas tales como sociedades, asociaciones civiles, fundaciones, cooperativas de todo tipo, empresas, organismos nacionales, municipalidades y comunas, universidades públicas o privadas y organizaciones del tercer sector, que colaboren y participen en la implementación, difusión, ejecución, promoción y desarrollo del Programa de Buenas Prácticas Agropecuarias.

- **LEY Nº 10936** (Consortios de gestión integrada de cuencas agropecuarias)

La presente Ley tiene por objeto implementar la Gestión Integrada de Cuencas Agropecuarias en el territorio de la Provincia de Córdoba mediante la realización de acciones de diagnóstico, planificación, gestión de recursos, ejecución de obras, infraestructura, planes y proyectos vinculados a la conservación de suelos, al manejo del agua y a la ejecución y mantenimiento de la infraestructura rural y de caminos, con la mirada puesta en el desarrollo de la producción agropecuaria de manera sostenible.

4 Diagnóstico

A partir de la caracterización de la cuenca realizada al inicio del informe y según el contexto geomorfológico, está se encuentra en la “Pampa Loessica Alta”. Las pendientes de esta cuenca oscilan en el rango de 0,3 al 0,7 %. Sumado a esto, los suelos son de origen loésico, con predominio de la textura franco-limosa, lo que los hace susceptibles a la erosión hídrica. De acuerdo a la información consultada este proceso se da puntualmente en la parte alta en las vías de escurrimiento y en proximidades a estas.

En cuanto al clima se caracteriza por un régimen monzónico siendo los meses de noviembre y diciembre donde se producen algunas de las lluvias más torrenciales. En este mismo momento, la mayoría de los suelos se encuentra en barbecho y con bajos niveles de cobertura. Esto se debe a que los cultivos de verano todavía no se encuentran desarrollados y a la ausencia o escasa producción de cultivos de invierno en la zona.

También destacar que el balance hídrico presenta un déficit de 72 mm anuales y que en ningún mes existe exceso de agua en el suelo, por consiguiente, la capacidad máxima de retención no se alcanza, es decir que el agua utilizada en el proceso de evapotranspiración es mayor a lo que se repone por precipitación. Este es un dato importante para la planificación de los cultivos a desarrollar.

Por otra parte, el uso y manejo del suelo predominante es el sistema de labranza bajo Siembra Directa, siendo el cultivo de soja el de mayor participación en cuanto a superficie sembrada. En aquellos lotes donde ésta práctica permanece en el tiempo, puede provocar una alteración física en el suelo deteriorando su estructura. Esto conduce a la compactación y disminución de la capacidad de infiltración y almacenaje de agua en el perfil, como consecuencia aumenta el escurrimiento del agua que precipita.

A su vez, el escurrimiento genera desprendimiento de material que es transportado por el agua y que sedimenta en los sectores bajos de la cuenca afectando la infraestructura pública y privada. También son transportados agroquímicos y fertilizantes produciendo una contaminación potencial de suelos y napas en zonas de bajos, causando así pérdidas tanto productivas como económicas.

Destacamos la importancia de la red terciaria de caminos para sacar la producción de los establecimientos agropecuarios. En proximidades a la salida de la cuenca, ocasionalmente los caminos rurales actúan como canales, dificultan transitar por ellos y exigen un mayor aporte económico para mantenerlos.

Por otra parte, existe un adecuado marco legal que cuenta con algunos instrumentos y beneficios para aquellos productores que se interesen o quieran adoptar prácticas agronómicas y/o estructurales tendientes a conservar el recurso suelo y agua como son la ley provincial N° 8.936 y la N° 10663 (BPAs).

Para realizar un diagnóstico más certero sobre el área de estudio se estima la erosión hídrica potencial y actual, como así también, la pérdida de agua por escurrimiento.

5 Determinación de la erosión hídrica potencial y actual en el área de la cuenca.

La estimación de las pérdidas de suelo por la erosión hídrica 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 diferente susceptibilidad a esos procesos y, de esta manera, reconocer aquellas que requieran de mayor atención en un plan de 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 W, Smith D., 1978). En este trabajo, para estimar la erosión hídrica potencial se ha empleado el modelo USLE citado anteriormente.

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 JH., 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, J., 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. 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. ha⁻¹. año⁻¹).

R: es el factor de erosividad de las lluvias; representa los factores de lluvia y escurrimiento. 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 ($t.MJ^{-1}.mm^{-1}$). 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 control de la erosión (adimensional), es la proporción de pérdida de suelo que se obtiene mediante alguna técnica de manejo de relieve, en comparación con la pérdida de suelo cuando se cultiva en laderas con 9% de pendiente, a favor 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) y si a estos se agregan los factores C y P se obtiene la Erosión Hídrica Actual.

Metodología

5.1 Erosión hídrica potencial

Para la obtención del mapa de Erosión Potencial, en primer lugar, se estimaron los factores intervinientes en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y luego haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el álgebra matricial se integraron los factores.

Factor R

Para este factor es necesario contar con registros pluviográficos confiables que no siempre están disponibles. En el presente estudio se optó por la metodología descrita por Gaitan J. (2021):

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 original. Además, para cada localidad se obtuvo la precipitación media anual (PMA) del “Atlas climático digital de la República Argentina” (Bianchi y Cravero, 2010).

Para estas 75 localidades se encontró que la PMA es un buen estimador del factor R (Fig. 19). Por lo tanto, se utilizó el siguiente modelo para obtener el mapa de Factor R para todo el país a partir del mapa de PMA (Bianchi y Cravero, 2010):

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

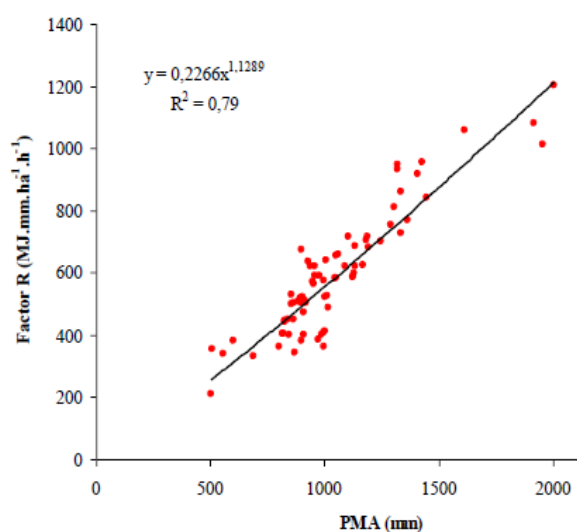


Figura 19. Relación entre la PMA y el factor R para 75 localidades de la República Argentina

Para el área de estudio, la localidad más cercana es Manfredi, siendo su PMA de 759 mm (INTA y Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2008) y aplicando la ecuación $R = 0,2266 * 759^{1,1289}$, se confeccionó el mapa del Factor R. Debido a que este factor es de baja variabilidad espacial cuando no existen accidentes geográficos de importancia, se utilizó un único valor para toda el área de estudio (Fig. 20). El valor obtenido para dicho factor resultó en $R = 404$ (mj.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹).

Para obtener una estimación más precisa del factor R, se recomienda realizar un análisis más detallado que considere la intensidad de la lluvia.

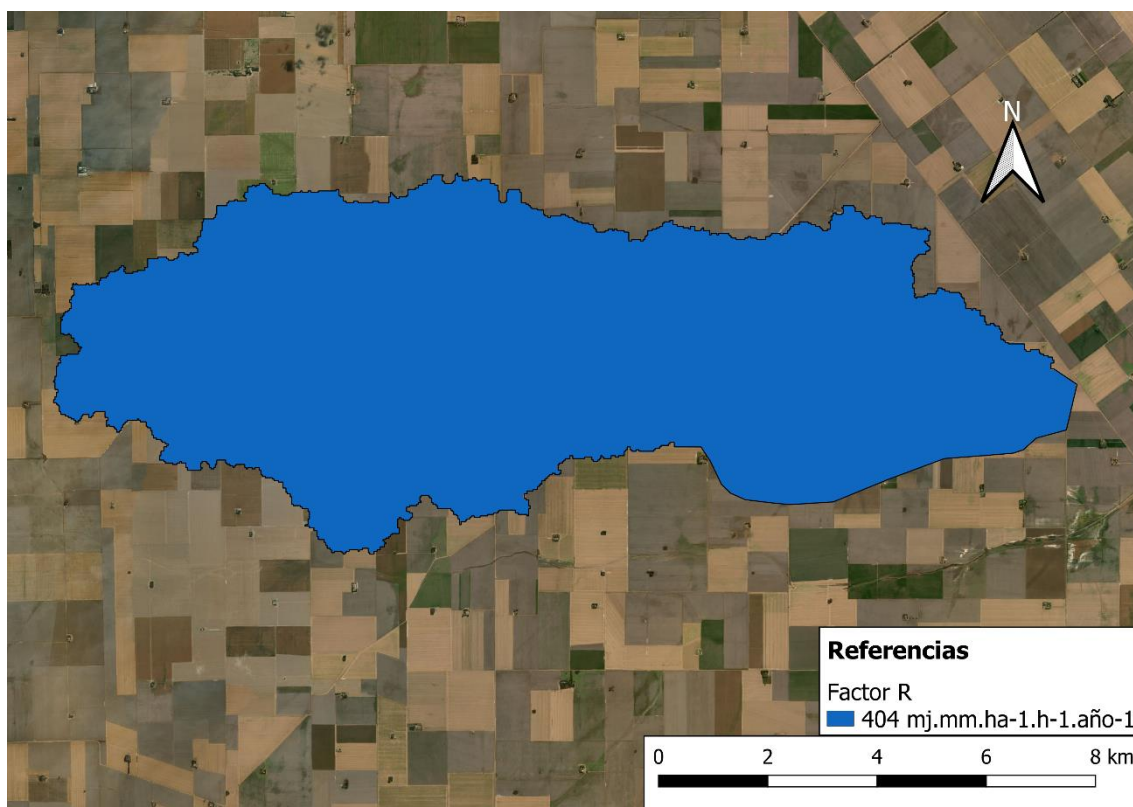


Figura 20. Mapa de Factor “R” de la USLE para los suelos de la cuenca.

Factor K

El factor K se determinó a partir del nomograma de erodabilidad (Wishmeier et al. 1971) que considera el porcentaje de limos + arenas finas, arenas, materia orgánica, estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo.

Estos datos se obtuvieron de la carta de suelo Hoja 3163-32 Oncativo, correspondiente a un relevamiento a escala de semidetalle 1:50000. De esta

forma, se calculó un valor de factor K para cada una de las unidades cartográficas (UC) incluidas dentro del área de estudio (Fig. 21, 22 y 23).

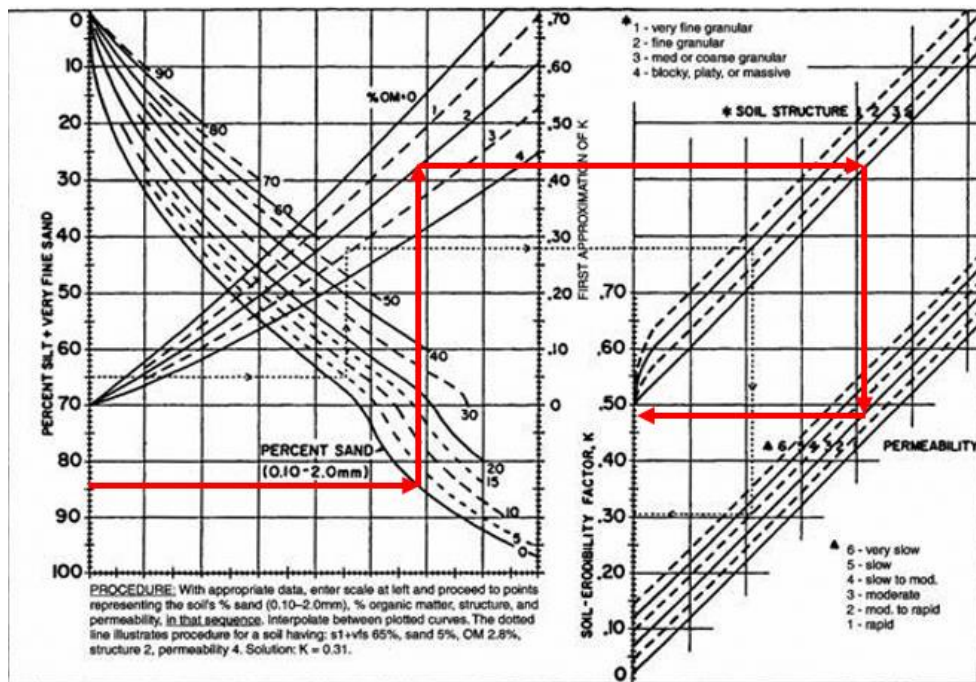


Figura 21. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica Oncativo (valor obtenido = 0.48)

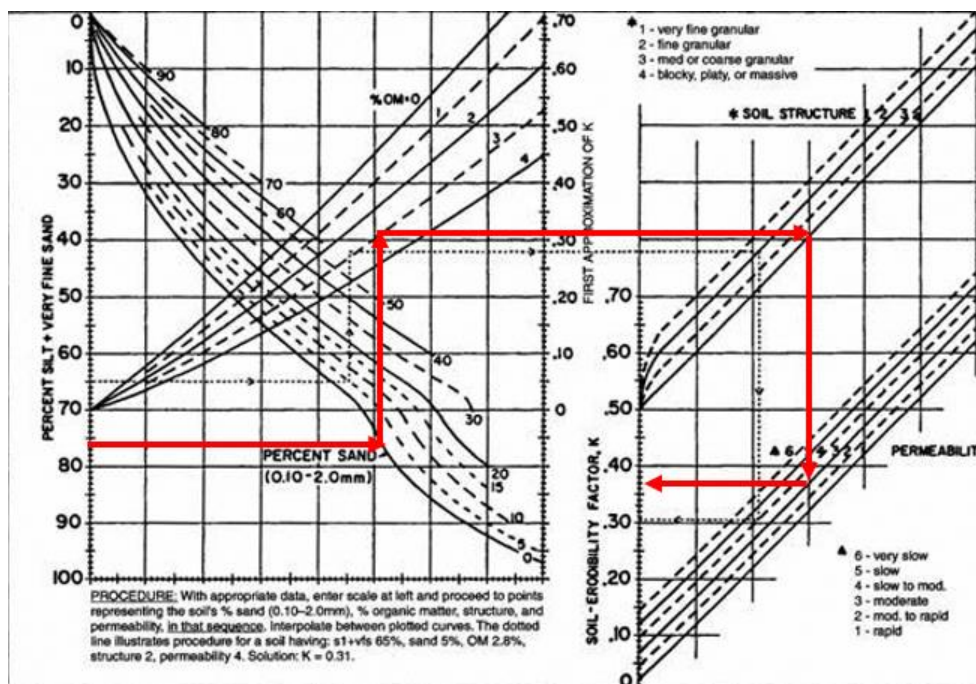


Figura 22. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica Manfredi. (valor obtenido = 0,37).

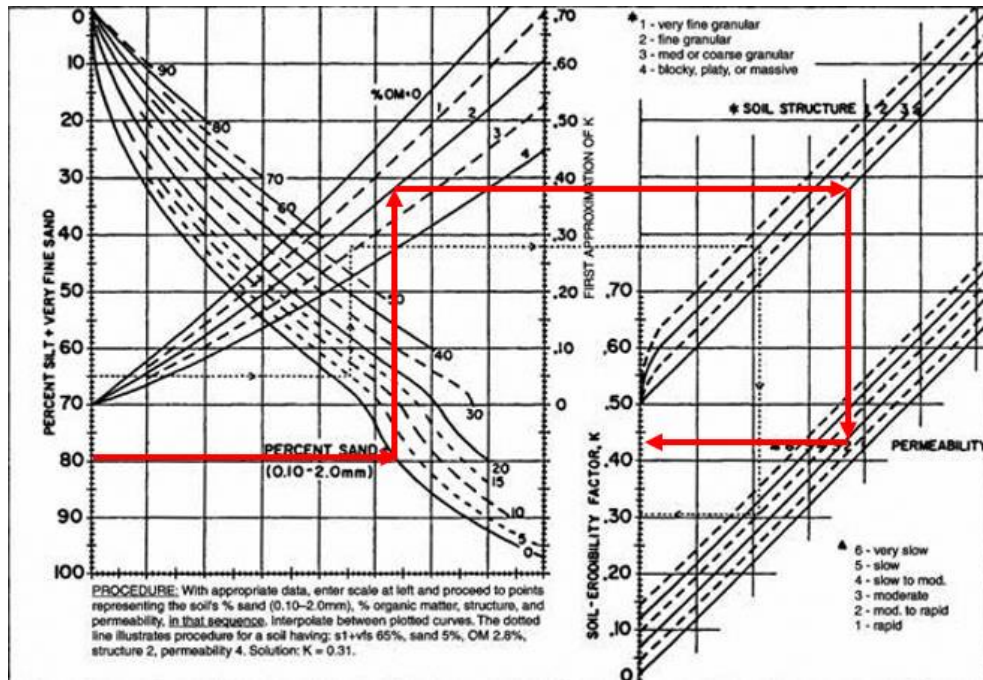


Figura 23. Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K) Unidad cartográfica: Asociación de Serie MANFREDI 60% y MANFREDI en fase por erosión moderada a severa 40% (valor obtenido = 0,43).

De acuerdo al valor que se extrajo de cada nomograma se aplica el factor 1,292 para pasar las unidades al sistema métrico (Scotta J., et. al., 1986). De esta manera, la unidad cartográfica Oncativo asume el valor de 0,62, la UC Manfredi 0,48 y la UC Manfredi y Manfredi en fase erosionada 0,55. En la Fig. 24 se observa la distribución espacial del Factor K correspondiente a cada unidad cartográfica. Este mapa es una herramienta útil para identificar las áreas más susceptibles a la erosión hídrica e implementación de medidas de conservación del suelo para prevenir su degradación.

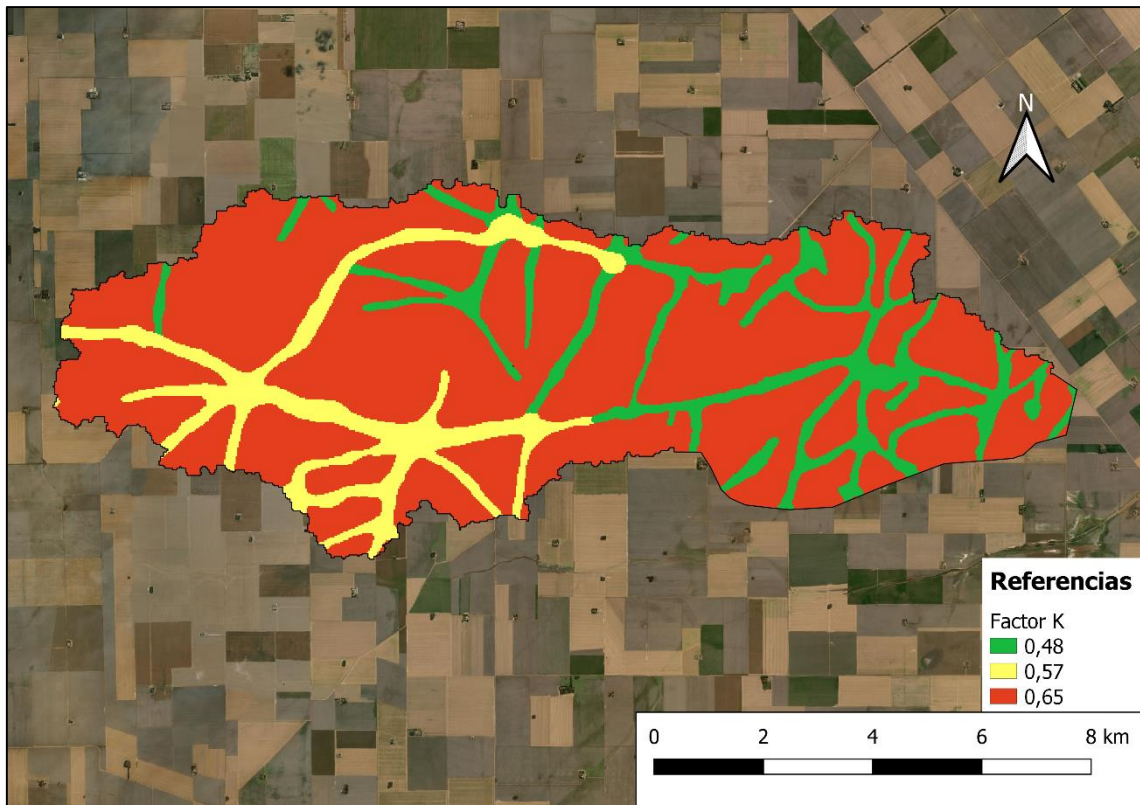


Figura 24. Mapa de Factor "K" de la USLE para los suelos de la cuenca

Se obtuvieron 3 valores de factor K, para las lomas loessicas planas fue de 0,65 (color rojo), esta se corresponde con la Consociación Oncativo, mientras que para las vías de escurrimiento de la parte más alta de la cuenca fue de 0,57 (color amarillo) correspondiente a la Asociacion Manfredi y su fase erosionada y por último, en las vías de la parte baja de la cuenca fue de 0,48 (color verde) que pertenece a la Consociación Manfredi.

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 Modelos Digitales de Elevación (MDE) de la superficie terrestre, la ecuación original para el cálculo del Factor LS ha sido modificada con la incorporación del impacto de la acumulación o convergencia de flujo (Moore et al., 1991). En este trabajo, para la determinación del Factor LS, se utilizó un MDE-SRTM con una resolución espacial de 30m y el empleo del módulo Índices Topográficos del Análisis del Terreno (Terrain Analysis) del programa SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) (Conrad, O. et. al., 2015).

En el mapa de la Fig. 25, se puede observar que los valores máximos de LS coinciden con cascos de estancia y/o arbolados y en menor medida se aprecia sobre la proximidad a las vías de escurrimiento. Es importante advertir que utilizar un MDE de resolución espacial de 30 metros, los cascos de estancia y/o arbolados influyen en el valor de este factor incrementándolo (en el mapa representadas como pequeñas áreas redondeadas de color amarillo).

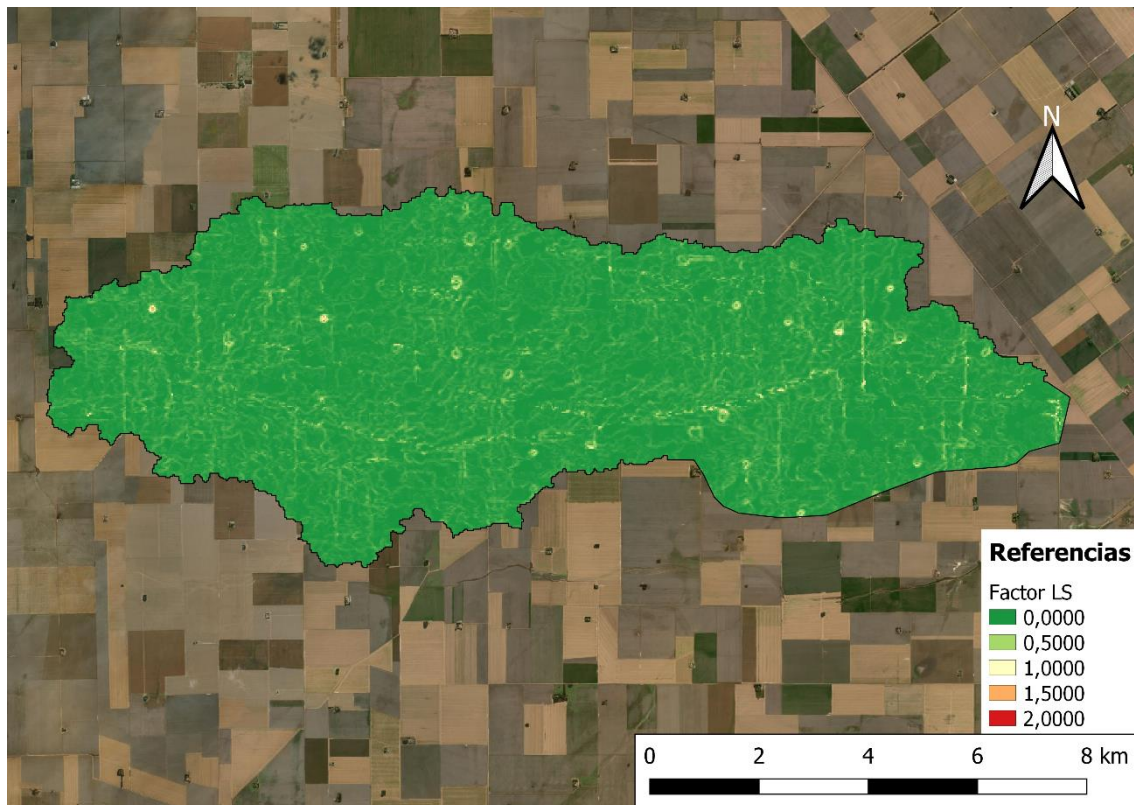


Figura 25. Mapa de Factor “LS” de la USLE para los suelos de la cuenca

El factor LS presentó una variación considerable en la zona de estudio, con valores que oscilaron entre 0 y 1,92. El valor medio de LS fue de 0,065, lo que indica una pendiente relativamente baja en la mayor parte del área.

Se observó que algunos valores de LS eran considerablemente más altos que el promedio. Estos valores podrían estar asociados a errores, por lo tanto, se decidió descartarlos del análisis para obtener una mejor representación de la erosividad del terreno.

Los valores medios de LS (alrededor de 0,065) se encontraron principalmente en áreas cercanas a las principales vías de escurrimiento (representadas en verde claro en el mapa). Estas zonas son susceptibles a la erosión debido a la concentración del flujo de agua.

Por otro lado, los valores más bajos de LS (menores a 0,002) se asociaron a los sectores altos de las lomas planas (representadas en verde oscuro). Estas áreas tienen una pendiente muy baja y, por lo tanto, son menos propensas a la erosión hídrica.

En la Fig. 26, se puede observar el mapa de Erosión Hídrica Potencial, obtenido a partir del producto de los factores “K,” R” y “LS”. Donde se evidencian los diferentes grados de erosión hídrica clasificado en la Tabla 11 según FAO (1980).

Tabla 11. Clases de Erosión Hídrica Potencial según FAO (1980).

Grado de Erosión	Tn/ha/año
Leve	10
Moderada	10 - 50
Alta	50 - 200
Muy Alta	> 200

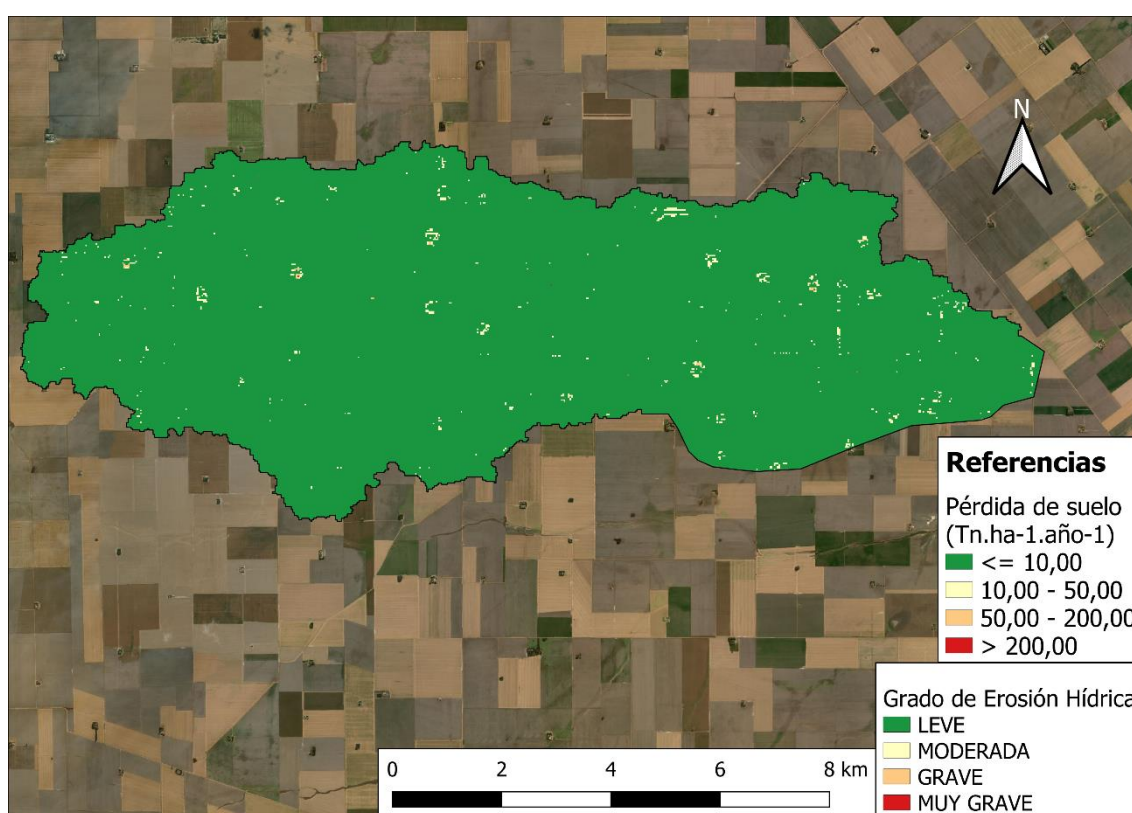


Figura 26. Mapa de Erosión Hídrica Potencial de la cuenca

La cuenca presenta un leve grado de erosión hídrica potencial, con una pérdida de suelo promedio de 1,1 t.ha-1.año-1. Esta pérdida se observa en toda la zona de estudio. Si bien consideramos sectores con un grado más significativo de erosión, estos se corresponden a cascados de estancia y áreas arboladas, representadas en color amarillo en el mapa.

En términos más simples, la pérdida de suelo equivale a una capa de aproximadamente 0,09 milímetros de suelo por año, para realizar la conversión se consideró una densidad aparente promedio de 1,25 t.m³.

Si bien la tasa de erosión es leve, es importante implementar medidas de conservación del suelo para evitar que la situación se agrave.

5.2 Erosión hídrica actual (EHA)

Factor C

El factor C de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) representa el efecto de la cobertura vegetal y el manejo del suelo sobre la erosión hídrica. Este factor se determinó considerando la secuencia de cultivos y el sistema de labranza predominante en la zona de estudio.

La Figura 18 (página 38) muestra la secuencia de cultivos en la zona de estudio y el sistema de labranza predominante es la Siembra Directa. Este sistema tiene un efecto positivo en la reducción de la erosión hídrica al mantener la cobertura del suelo y minimizar la labranza.

En la tabla 12, se indican algunos valores orientativos de C, para cultivos, usos y manejos tradicionales de la región central de argentina.

Tabla 12. Valores de factor C para diferentes cultivos, rotaciones y sistema de sistema de labranza (Marelli et al., 2012).

Cultivo- Secuencia	Sistema de Labranza	
	Convencional	Siembra Directa
Barbecho desnudo, a favor de la pendiente	1	-
Trigo - Soja 2 ^a	0,15	0,09
Soja 1 ^a - Trigo	0,49	0,07
Soja - Maíz	0,34	0,10
Soja - Soja	0,55	0,15
Girasol - Girasol	0,40	0,10
Maní	0,55	-
Sorgo – Soja	0,44	0,13
Campo natural	0,02	-
Gramíneas perennes	0,05	0,02
Pastura alfalfa + gramíneas	0,05	0,02
Verdeo de invierno	0,15	0,09
Forestación artificial (Eucaliptos de 8 años)	0,006	-

En este estudio, se utilizó un valor de 0,1 para lotes con predominio de gramíneas en la secuencia de cultivos, como el trigo y el maíz, y un valor de 0,15 para lotes con predominio de leguminosas, como la soja y maní. A partir de estos datos se confeccionó el mapa de la Fig. 27.

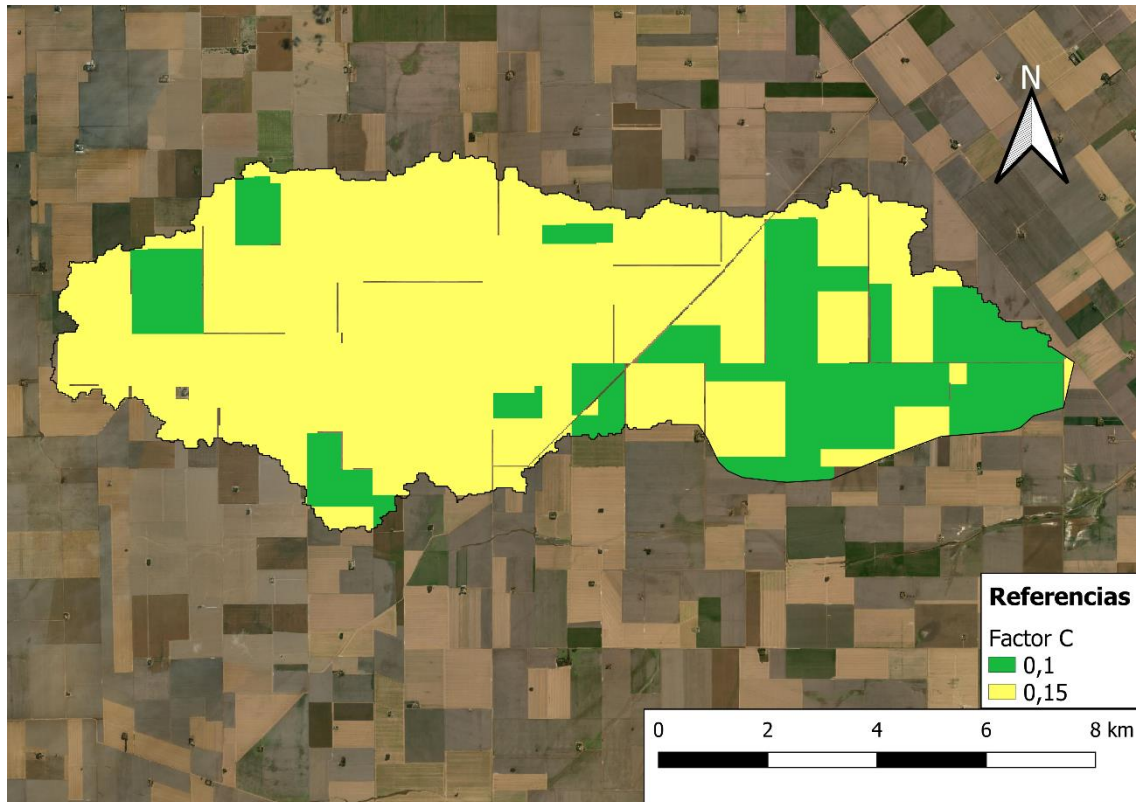


Figura 27. Mapa de Factor "C" de la USLE para los suelos de la cuenca

En la zona alta de la cuenca, la secuencia de cultivos predominante es la leguminosa, lo que genera un Factor C de 0,15. En la parte baja de la cuenca, se incrementa el uso de maíz y trigo en la secuencia de cultivos, lo que reduce el valor del Factor C a 0,1. Comparativamente, la cobertura vegetal de la zona baja de la cuenca es más efectiva para proteger el suelo de la erosión hídrica.

Factor P

Para determinar el factor P se utilizó la Tabla 13 elaborada por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service) tomada de Gaspari F., (2010).

La Tabla 13 presenta valores del factor P para diferentes grados de pendiente y prácticas de conservación del suelo. Estas prácticas incluyen cultivos a nivel, cultivos en faja, terrazas de desagüe y terrazas de infiltración.

Tabla 13. Factor P adoptados según rangos de pendiente y prácticas de conservación.

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			De desagüe	De infiltración
2 – 7	0,50	0,25	0,10	0,05
8 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 18	0,80	0,40	0,16	0,05
19 - 24	0,90	0,45	0,18	0,06

Para determinar el valor del factor P en la zona de estudio, se utilizó la herramienta informática Google Earth. Se procedió a identificar visualmente parcelas con alguna de las prácticas conservacionistas citadas en la Tabla 13. En el área de estudio no se encontraron parcelas que implementen prácticas de conservación de suelo, por lo tanto, se asignó un coeficiente igual a 1 a todas las parcelas de la cuenca (Fig 28).

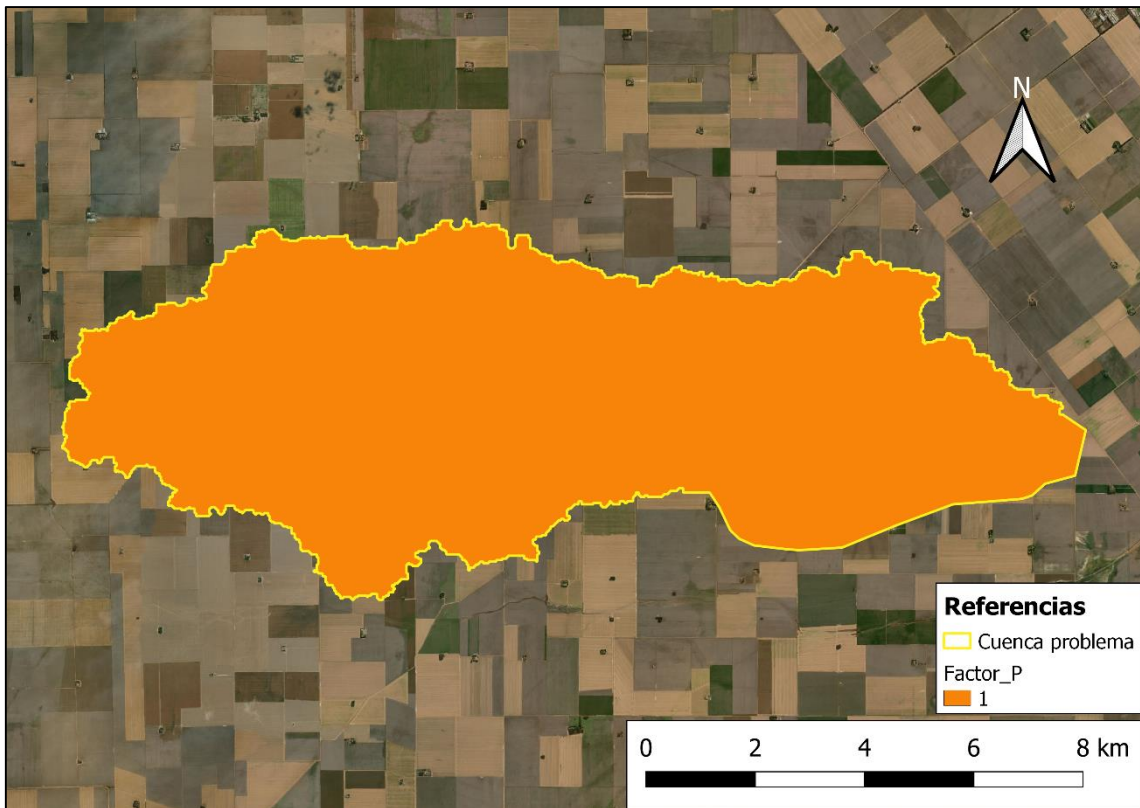


Figura 28. Mapa de Factor “P” de la USLE para los suelos de la cuenca

Finalmente, con objetivo de identificar áreas con erosión hídrica en la zona de estudio, se elaboró el mapa de Erosión Hídrica Actual (Fig. 29). Este mapa es el resultado de multiplicar el mapa de Erosión Hídrica Potencial por los factores C y P.

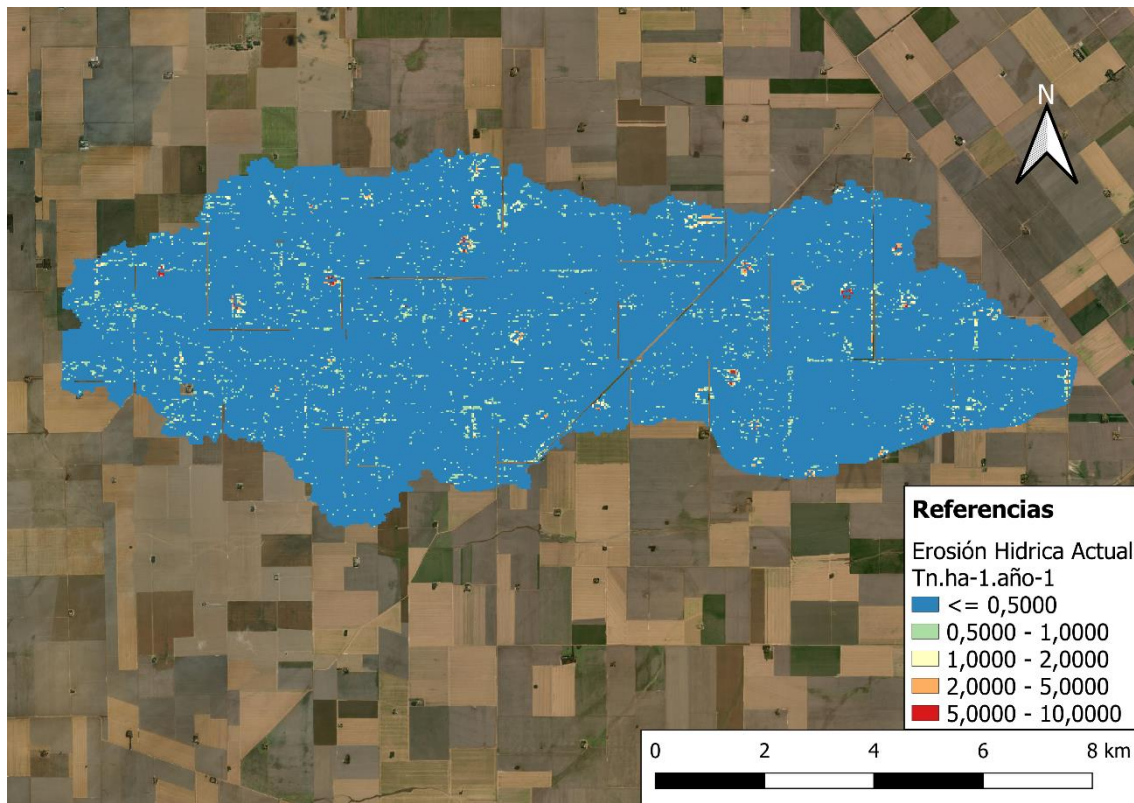


Figura 29. Mapa de Erosión Hídrica Actual para los suelos de la cuenca

El análisis del mapa de Erosión Hídrica Actual (Fig. 29) indica que la cuenca presenta una baja tasa de erosión hídrica en general. No se observan áreas con diferentes grados de erosión hídrica, a excepción de algunos valores puntuales mayores a 2 toneladas por hectárea por año. Estos valores se consideran errores debido a su origen en la capa del factor LS y se corresponden con áreas de casas y arbolados.

La tasa de erosión hídrica promedio en la cuenca es de $0,15 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Esta tasa equivale a una pérdida de suelo de aproximadamente $0,012 \text{ mm. año}^{-1}$, considerando una densidad aparente promedio de 1,25 toneladas por metro cúbico.

Los resultados obtenidos de erosión hídrica potencial y erosión hídrica actual demuestran que la cuenca bajo estudio no presenta problemas de erosión. No obstante, son modelaciones mientras que el evento ocurrido en diciembre de 2009 fue real. Enfocarse en la prevención, para evitar daños similares o más graves a los ocurridos, debe ser tomada como forma de trabajar a futuro.

5.3 Tolerancia a la pérdida de suelo

La tolerancia de pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión que permite mantener un alto nivel de productividad. En relación a la génesis de suelo, una tasa de erosión tolerable sería aquella pérdida de suelo anual equivalente a la tasa de formación del mismo suelo (Cisneros et al., 2012).

No existe un acuerdo general en la bibliografía sobre cuál es la tasa de erosión tolerable. Tradicionalmente se ha considerado esta pérdida fluctuando entre 4 a 20 t/ha/año (Kirby y Morgan, 1994), aunque otros autores proponen una pérdida menos: 2 a 10 t/ha/año (Troeh et al., 1991), o 1 a 2 t/ha/año (Walter y Stutzel, 2009).

Este rango de variación depende de la génesis de los suelos y de la profundidad del suelo (Cisneros et al., 2012), correspondiendo las mayores tasas de tolerancia a suelos profundos de zonas húmedas (mayor tasa de formación de suelo) y las tolerancias más bajas a suelos someros de zonas áridas (baja tasa de formación de suelo). De acuerdo a esto, se estableció un nivel de tolerancia variable de acuerdo al clima y a la profundidad de suelo.

Tanto el clima como la profundidad del horizonte superficial se los clasificó en 5 clases como se observa en la tabla 14 y que muestra los valores de tolerancia a pérdida de suelo.

Tabla 14. Tolerancia de pérdida de suelo (t/ha/año) de acuerdo al régimen climático y la profundidad del suelo.

	Húmedo	Subhúmedo-húmedo	Subhúmedo-seco	Semiárido	Árido
< 25 cm	2,5	2	1,5	1	0,5
25 - 50 cm	5	4	3	2	1
50 - 100 cm	7	5,5	4	3	2
100 - 150 cm	8,5	7	5	4	3
> 150 cm	10	8	6	5	4

Tomando como referencia el clima subhúmedo-seco y una profundidad del horizonte superficial menor a 25 cm, la tolerancia a la erosión hídrica en la cuenca se establece en $1,5 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

Del análisis del mapa de EHA (Fig. 29) indica que la tasa de erosión actual se encuentra por debajo del valor tolerable, con una media de 0,15 toneladas por hectárea por año.

Impacto de la pérdida de suelo sobre la productividad de los cultivos

La consecuencia inmediata de la erosión del suelo es una disminución de la productividad agrícola, debido a la pérdida de materia orgánica y nutrientes, a su deterioro físico, a la pérdida de profundidad y en casos extremos a la pérdida total del suelo.

Una aproximación para estimar la pérdida económica debido a la disminución de la productividad del suelo a causa de la erosión es determinar la tasa de erosión del suelo, la disminución del rendimiento de los cultivos por unidad de pérdida de suelo y, finalmente, ponderar la pérdida de rendimiento por el precio de los granos (Gaitan J., et. al., 2017).

De acuerdo a Apezteguia et al, 1987 la pérdida de rendimiento de la soja es de 35 kg/ha/cm, dicho estudio fue realizado en un campo cercano a la localidad de Almafuerte, cuyo tipo suelo es un Haplustol Éntico de la Serie El Salto.

De acuerdo a nuestro estudio, la tasa media de erosión hídrica actual es de 0,15 t. ha⁻¹. año⁻¹ o de 0,0012 cm. año⁻¹, y si consideramos una disminución del rendimiento en soja de 35 kg.ha⁻¹ por cada cm de suelo perdido, se puede estimar el impacto de la erosión hídrica sobre el rendimiento del cultivo mediante la siguiente ecuación:

$$R = A \times B$$

donde,

R=disminución rendimiento

A=pérdida de rendimiento por erosión (kg/ha/cm)

B= pérdida de suelos por erosión (cm)

$$R = 35 \text{ kg. ha}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \times 0,0012 \text{ cm. año}^{-1} = 0,042 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$$

Al considerar para la soja un valor de 290 U\$\$/t a mayo 2024 (según Bolsa de Cereales de Rosario, consultado el día 14 de marzo de 2024) y la superficie sembrada de la cuenca, la pérdida en términos económicos ascendería a:

$$8000 \text{ ha} \times 0,042 \text{ kg. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1} \times 0,29 \text{ U}\$\text{s.kg}^{-1} = 97,44 \text{ U}\$\text{s.año}^{-1}$$

Como quedó demostrado, la pérdida de suelo, tiene poco impacto o relevancia tanto productiva como económicamente.

Sin embargo, para el área en estudio existen eventos de precipitación de gran intensidad que generan escurrimiento y con ello inundaciones que deterioran bienes públicos y privados. Por ello a continuación se estimará el caudal de pérdida de agua con el actual manejo y se lo comparará con escenarios donde se aplicarían prácticas de manejo conservacionista.

6 Hidrología y modelación

Para evaluar el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la cuenca, mediante la estimación del caudal de agua escurrido bajo el manejo actual y su comparación con el caudal que se produciría bajo la implementación de prácticas de manejo conservacionista. A partir de ello, se busca cuantificar la diferencia en la productividad y rentabilidad del cultivo de soja bajo diferentes escenarios de manejo, considerando las características edáficas de la región.

La cuenca presenta algunos signos de degradación del suelo y erosión hídrica, lo que genera una menor disponibilidad de agua y suelo fértil para los cultivos. En este contexto, se busca cuantificar la pérdida de agua durante eventos de precipitación y evaluar el impacto de la implementación de técnicas de conservación de suelos.

Descripción de Escenarios:

Se modelará el comportamiento hidrológico de la cuenca ante dos eventos de precipitación:

- **Evento 1:** Precipitación máxima con periodo de retorno de 10 años.
- **Evento 2:** Evento extremo de precipitación de 220 mm, similar al ocurrido el 18 de diciembre de 2009.

Se analizarán tres escenarios de uso y manejo del suelo:

- **Escenario 1:** Condición previa al evento extremo (manejo actual).
- **Escenario 2:** Rotación de cultivos adecuada.
- **Escenario 3:** Aplicación de técnicas de conservación de suelo (terrazas y canales de desagüe).

Las simulaciones se realizaron con el programa informático HEC-HMS versión 3.3. (Army Corps of Engineers, 2000).

6.1 Delimitación de la cuenca y red de drenaje

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se generan para realizar la representación de la superficie terrestre. Se basan en dividir el territorio en celdas o píxeles de un determinado tamaño que se agrupan en forma de una grilla ordenada. Cada celda tiene una ubicación georreferenciada y a la misma se le asigna un valor de altura respecto del nivel medio del mar.

De esta manera, los MDE proveen información muy valiosa y precisa sobre las alturas, pendientes y dimensiones del terreno, que se utilizan para la obtención de mapas y modelos tridimensionales de la superficie terrestre.

Para delimitar la cuenca, subcuencas y red de drenaje se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) que distribuye libremente el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los datos necesarios para elaborar estos MDE fueron obtenidos por la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM) de la NGA-NASA, el German Aerospace Center (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la U.S. National Geospatial Intelligence Agency (NGA), a partir de los datos de interferometría radar capturados por el transbordador espacial “Endeavour” durante la misión STS-99, desarrollada entre el 11 y 21 de febrero de 2000 y cuya resolución espacial es de 30 metros.

Una vez definido los límites y la red de drenaje, se procedió a la superposición con imagen de alta resolución como la de Google Earth, logrando un mapa como el de la Fig. 30. Se trazó un recorrido por la cuenca con el objetivo de constatar que la infraestructura actual (camino, vados, alambrados, casco de estancia, etc.) es causa o no de alguna alteración del curso “natural” de escurrimientos.

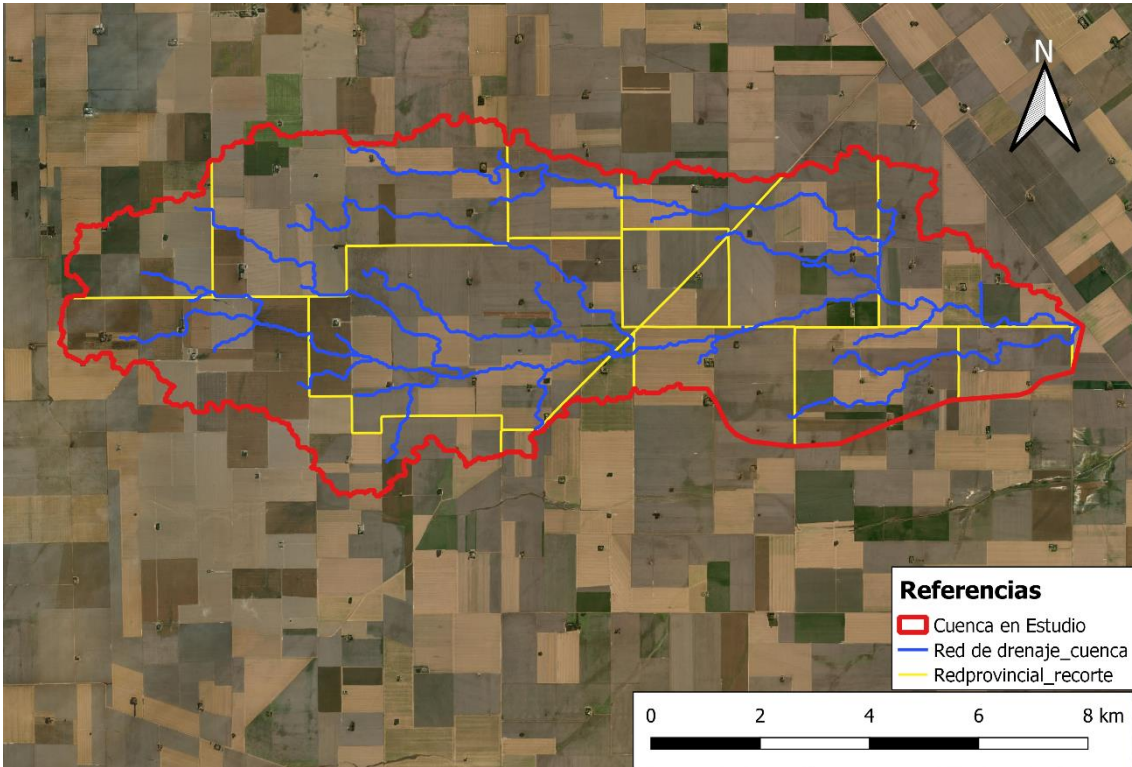


Figura 30. Red vial e hídrica de la cuenca

Posteriormente se delimitaron 3 subcuencas, las que se observan en la Fig. 31.

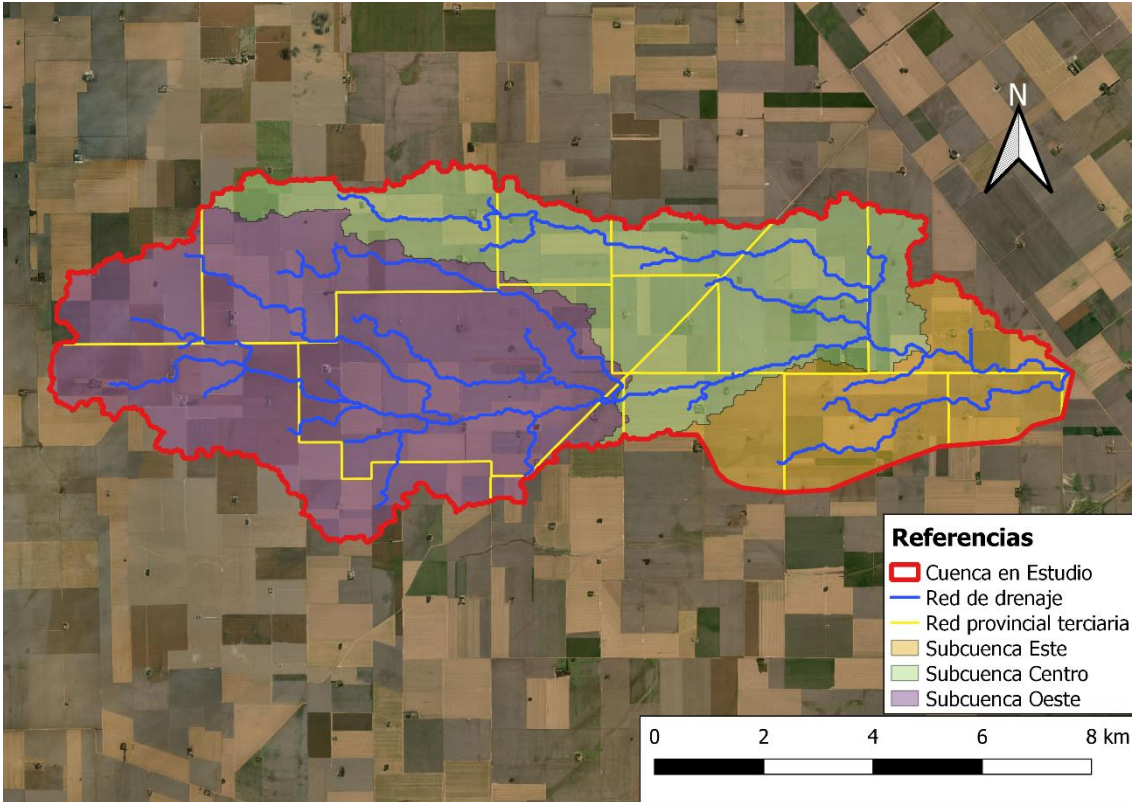


Figura 31. Delimitación de subcuencas de la cuenca en estudio

6.2 Determinación de parámetros morfológicos e hidrológicos de cada subcuenca

Parámetros Morfológicos

Para cada una de las subcuencas se determinaron los parámetros morfológicos tales como el Área de la Cuenca (A), Longitud del Cauce Principal (L), 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 (Tc) de cada subcuenca.

El tiempo de concentración (Tc) de una cuenca se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la cuenca estén aportando al punto de salida estipulado. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado.

El método utilizado para la determinación de esos tiempos de concentración (Tc) fue:

Según Ramser-Kerby:

$$Tc = 0.02 * L^{0.77} * Sc^{-0.385} + ((2 n_{lam} Lo) / Sa^{0.5})^{0.467}$$

Donde:

Tc = tiempo de concentración [min]

A = área de la subcuenca

L = Longitud del escurrimiento encauzado (m)

Lo = longitud del flujo laminar (m)

Sa = pendiente de la cuenca en la zona de flujo laminar (m/m)

Sc = pendiente del flujo encauzado (m)

Tabla 15. Parámetros morfológicos e hidrológico de las subcuencas

SUB CUENCAS Unidades	ÁREA Has	LONGITUD (L) m	DESNIVEL m	PENDIENTE (Sc) m/m	PENDIENTE MEDIA (Sa) m/m	TC min
Oeste	4068	10657	31	0,0029	0,0069	269
Centro	2717	14912	39	0,0026	0,0045	357
Este	1359	7180	14	0,0019	0,0051	240

Tormentas de diseño

Las tormentas de diseño utilizadas para realizar la modelación hidrológica deben tener un valor de precipitación histórica capaz de provocar una esorrentía elevada. La determinación de esta lluvia implica definir en primera instancia la duración de la lluvia, la lámina caída durante ese período de tiempo y su distribución temporal y espacial para el tiempo de retorno elegido.

Para su elección se optó por la fuente disponible en Mapas Córdoba (IDECOR, 2023) y el periodo de retorno (PR) utilizado para la modelación fue de 10 años, el cual es de 114 mm/día. Cuando se modeló para los escenarios de eventos extremos se utilizó una precipitación de 220 mm/h.

Para éstas lluvias máximas diarias, se desagregaron según el método de Evans para obtener de allí la curva i-d, de donde se obtuvo la intensidad media máxima (i) en mm/h (Fig. 32), la cual, afectada por la duración, es decir, por el tiempo de concentración (h) de cada subcuenca, proporciona la lámina precipitada de las tormentas de proyecto.

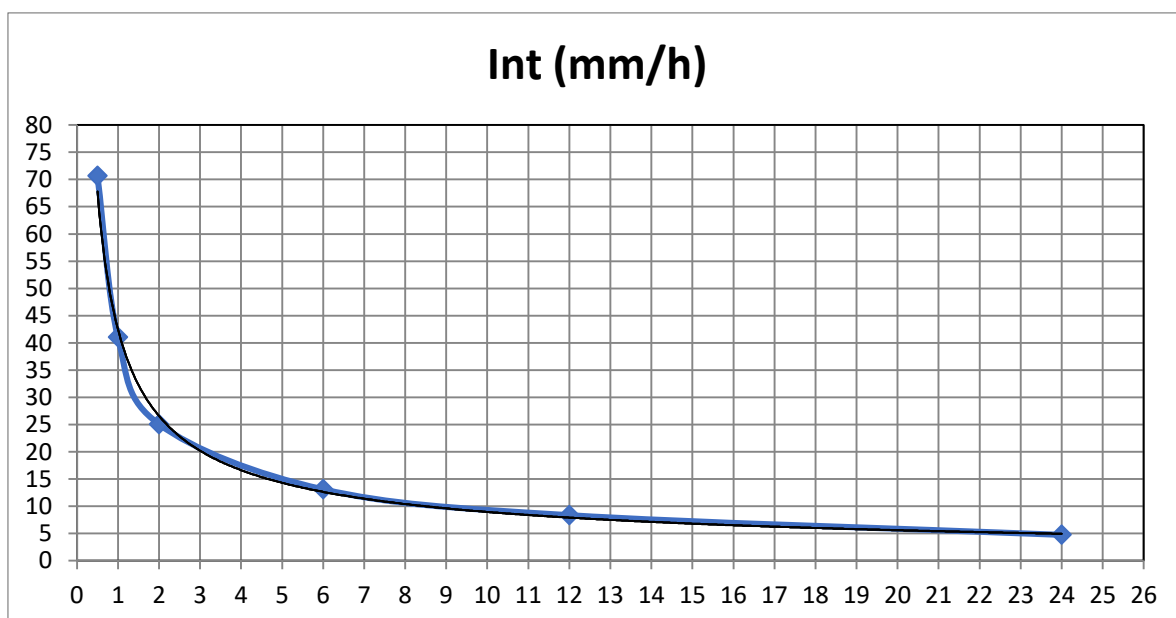


Figura 32. Curva I-D para la tormenta proyecto de 114 mm/día.

En base a las duraciones calculadas, se asignaron a cada subcuenca los siguientes valores de precipitación para tiempo de recurrencia de 10 años (tabla 16).

Tabla 16. Valores de lámina precipitada asignadas a cada subcuenca para tiempo de recurrencia de 10 años.

SUBCUENCAS	TC	INTENSIDAD	LÁMINA
Unidades	hs	mm/hs	mm
Oeste	4,48	15,4	69,0
Centro	5,95	12,7	75,6
Este	4	16,6	66,4

En base a las duraciones calculadas, se asignaron a las subcuencas los siguientes valores de precipitación para el evento extremo (tabla 17).

Tabla 17. Valores de lámina precipitada asignadas a cada subcuenca para el evento extremo.

SUBCUENCAS	TC	INTENSIDAD	LÁMINA
Unidades	hs	mm/hs	mm
Oeste	4,48	29,7	133
Centro	5,95	24,5	146
Este	4	32	128

Las distribuciones temporales de las tormentas se hicieron de acuerdo a un patrón adimensional de distribución interna (hietogramas de diseño) que corresponden a la zona centro de la provincia de Córdoba, determinados en el Informe de Caamaño Nelli realizado para la localidad de Rafael García (2005). Se eligió un mismo hietograma para las 3 subcuencas debido a que la duración de la precipitación proyectada supera las 4 hs o 240 min (Fig. 33).

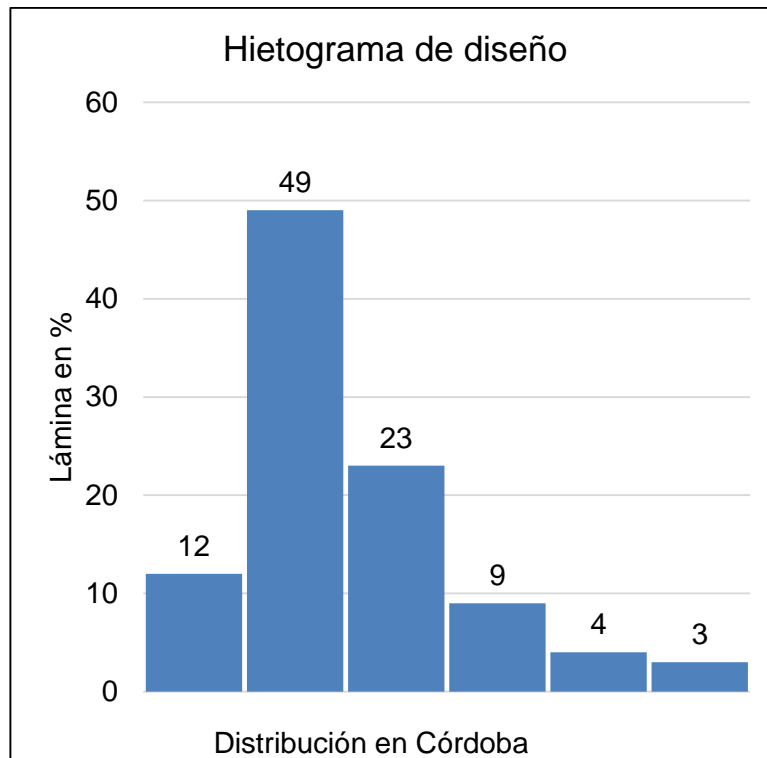


Figura 33. Patrón adimensional de distribución temporal de tormentas - Estación Rafael García

Determinación del volumen de escorrentía - Método del Número de Curva (NC)

Existen infinitas respuestas de escurrimiento superficial ante una precipitación, dependiendo de la asociación de suelo-vegetación.

En cada una de estas respuestas intermedias se pueden diferenciar dos partes: un valor umbral de precipitación denominado (I_0), por debajo del cual toda la precipitación es interceptada por el complejo suelo-vegetación y por lo tanto el escurrimiento superficial es nulo.

Cuando se supera el valor de I_0 , comienza la segunda parte de la curva en la que va aumentando el valor del escurrimiento a medida que aumenta la precipitación. Con valores muy altos de precipitación, el suelo está tan saturado de agua que un aumento en la cantidad de lluvias equivale a un incremento de la misma magnitud en el escurrimiento.

Este método consiste en la obtención del denominado NC en función de las características de la cuenca previamente descrita, siendo su determinación de gran importancia para su posterior utilización en el método de cálculo de caudal HEC-HMS 3.3.

El método del Número de Curva fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos (SCS). Es un método sencillo para calcular la lluvia efectiva a partir de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso de suelo y las condiciones de humedad del mismo. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento (Gaspari, 2009).

La combinación entre factores edáficos y antropogénicos conformará en su conjunto un complejo suelo - vegetación, el cual determinará el comportamiento del agua dado por la infiltración y escurrimiento de la precipitación en función del grado de permeabilidad del suelo (Fig. 34).

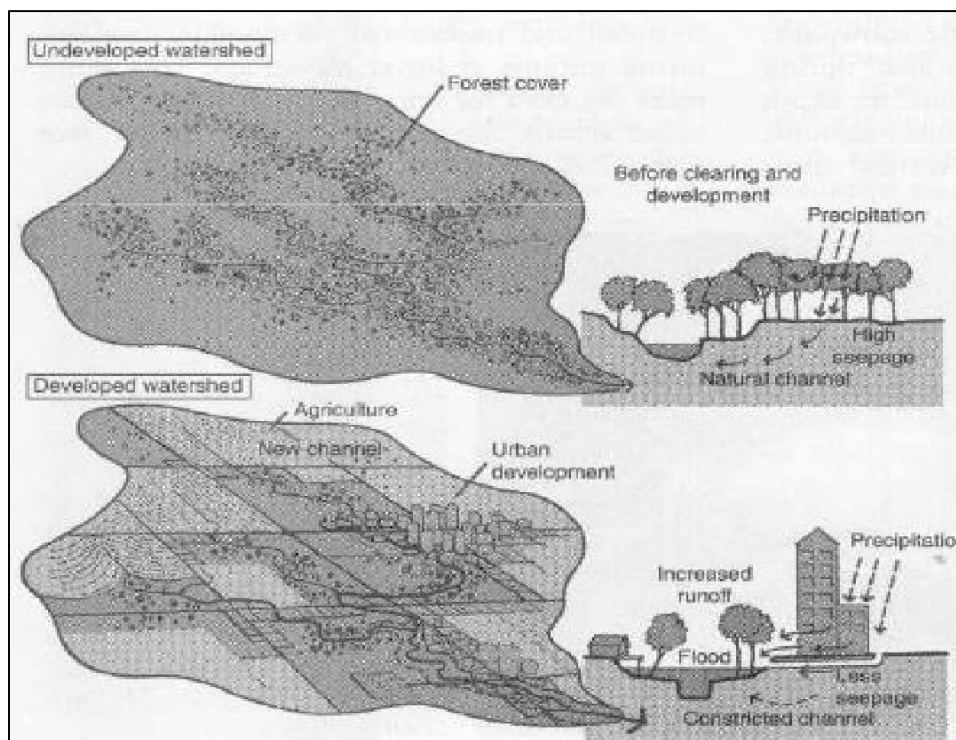


Figura 34. Modificación del escurrimiento superficial en función al tipo de uso del suelo.

Para la estimación de la lámina escurrida se debe definir, en primera instancia, el valor del **número de curva** por medio de tablas que consideran los siguientes factores:

El grupo hidrológico: para su definición se utiliza la clase textural del suelo y además se puede utilizar en forma conjunta el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación.

En la Tabla 18 se observan las clases texturales que definen los cuatro grupos hidrológicos. Los suelos pertenecientes a los diferentes grupos presentan una intensidad relativa de infiltración relacionada con la textura de los mismos. Esta característica general de los suelos generará diferentes caudales de escurrimiento (Q) y NC.

Tabla 18. Grupos Hidrológicos y sus características particulares (Gaspari, 2010)

GH	Textura	Infiltración	Escurrecimiento (Q)	NC
A	Arenoso Arenoso franco Franco arenoso	arena	Alta	<< Q << NC
B	Franco limoso Franco Limoso	+arena -arcilla	Moderada	< Q < NC
C	FR-Ar-arenoso FR-Ar-limoso FR-Arcilloso	-arena +arcilla	Lenta	> Q > NC
D	Arcillo arenoso Arcillo limoso Arcilloso	arcilla	Muy lenta	>> Q >> NC

Según clase textural para los suelos predominantes de la cuenca (serie Oncativo y Manfredi) el grupo hidrológico es el "B".

La Serie Oncativo tiene una textura franco limoso con arena en 16,5%, limo 68,7% y arcilla 16,7%.

Mientras que la Serie Manfredi presenta una textura franco limoso siendo su proporción de arena 7,8%, limo 68,4% y arcilla 25,4%.

Además, para definir a partir de las clases texturales el grupo hidrológico, se utiliza el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación (Fig. 35) indicando las características de infiltración de cada suelo.

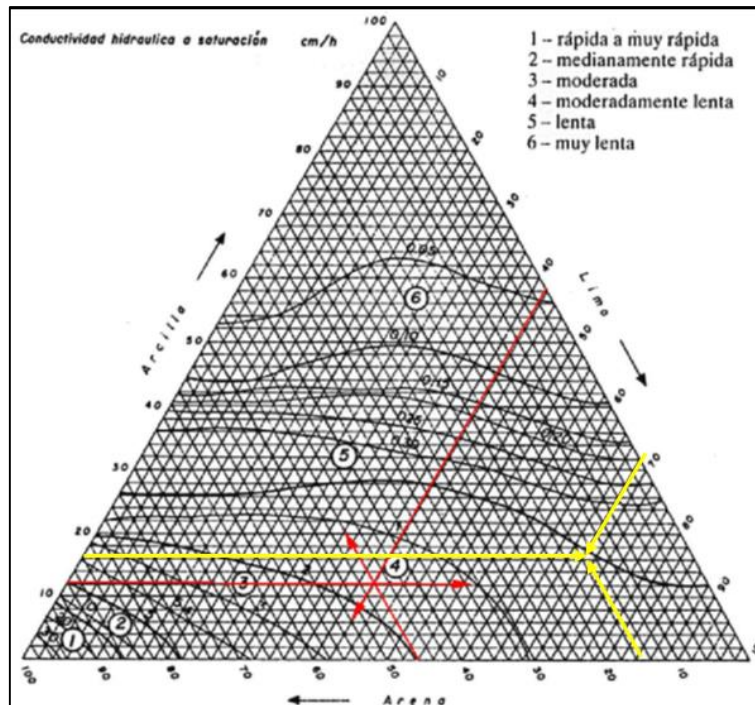


Figura 35. Diagrama triangular con curvas de conductividad hidráulica a saturación

En el ejemplo (flechas de color amarillo) se muestra la condición de infiltración según clase textural para la serie Oncativo. La intersección de las flechas ocurre en el área 4 por lo tanto, la condición de infiltración es moderadamente lenta.

Cobertura vegetal: la densidad de la cobertura vegetal determinará distintas clases en cuanto a sus condiciones hidrológicas para la infiltración.

En la Tabla 19 se expresa la posible condición hidrológica, escurrimiento y el tipo de número de curva, para diferentes densidades de vegetación.

Tabla 19. Condición hidrológica, escurrimiento y Número de Curva en función de la vegetación y su estado.

Densidad de Vegetación	Condición	Cobertura	Escurrimiento (Q)	NC
Baja	Deficiente	< 50%	Alto	Alto
Media	Regular	50 a 75%	Medio	Medio
Alta	Buena	> 75%	Bajo	Bajo

El uso del suelo es otro factor que tiene influencia en el escurrimiento. La utilización de los terrenos ya sea como pastizales, bosques o áreas de cultivo y los sistemas de siembra en hilera, surcos o en contornos determinarán diferentes

caudales de escurrimiento. Según el manejo descrito de la cuenca (implementación de cultivos anuales bajo siembra directa en más de un 95% de la superficie), se considera la utilización de cultivos alineados dispuestos en líneas rectas con residuo en cobertura.

La condición de humedad antecedente o estado de humedad del suelo previo a la ocurrencia de la precipitación es otro parámetro a tener en cuenta. Esto se determina en base a una lluvia ocurrida 5 días antes (tabla 19). En el proyecto se consideró una condición de humedad antecedente II (rango entre 12,7 y 38,1 mm durante los últimos 5 días) el cual representa a un suelo medio, que en cierta forma refleja la situación previa al evento del 18/12/2009, con el objeto de estimar fielmente el caudal escurrido.

Tabla 20. Condición de humedad antecedente en función de la precipitación. Fuente: Gaspari, 2009

Condición	Humedad antecedente del suelo	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)
I	Suelo seco	0 - 12,7
II	Suelo medio	12,7 - 38,1
III	Suelo húmedo	> 38,1

Teniendo en cuenta la definición del Grupo Hidrológico, la cobertura vegetal, el uso del suelo y su condición de humedad antecedente media se ingresa a la tabla 21 para la determinación del Número de Curva.

Este procedimiento se realizó para los 3 escenarios a simular.

A continuación, se renombrar los escenarios y se asignan sus correspondientes valores de NC:

- **Escenario 1:** Condición actual de la cuenca, NC = 80. De aquí en más se denominará "Actual",
- **Escenario 2:** Rotación de cultivos adecuada, NC = 75, en adelante, "Rotación",
- **Escenario 3:** Aplicación de técnicas de conservación de suelo, NC = 70, se denominará "Sistematización" (Sist.)

Tabla 21. Número de curva para suelos con uso agrícola.

Uso Suelo	Tratamiento o Practica	Condición Hidrológica				
		A	B	C	D	
Rastrojo o Barbecho	desnudo	-----	77	86	91	94
	Cubierta residuo	Pobre	76	85	90	93
	de cosecha	Buena	74	83	88	90
Cultivo en hilera	Hileras rectas	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Hileras rectas c/ residuo	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	En contorno	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	En contorno c/ residuo	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Contorno y terrazas	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	Contorno y terrazas, c/ residuo	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Cultivos de invierno	Hileras rectas	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Hileras rectas c/ residuo	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	En contorno	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	En contorno c/ residuo	Pobre	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	Contorno y terrazas	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	Contorno y terrazas, c/ residuo	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Siembra de verdes de gramíneas y Leguminosas	Hileras rectas	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	En contorno	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Contorno y terrazas	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

Abstracción Inicial (Ia)

El método del Número de Curva considera **Ia** 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 la retención superficial, sumada a la intercepción por la vegetación y la infiltración previa a la iniciación del escurrimiento.

Para evitar la necesidad de estimar esta variable, se encontró una relación entre ella y la capacidad de almacenamiento actual del suelo(S) por medio de datos de precipitación y escurrimiento de pequeñas cuencas experimentales, resultando empíricamente de la graficación de (Ia) versus (S) para tormentas individuales. La relación es:

$$Ia = 0,2 * S$$

Donde Ia= infiltración inicial y S= la capacidad máxima de infiltración de un suelo
Al mismo tiempo:

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

Por lo tanto, para los valores de NC definidos anteriormente, el **Ia** resultante son:
12,7 mm, 17 mm y 21,8 mm

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.

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 en Km
- i: es la pendiente máxima de la subcuenca

A su vez, se define la variable **X** que 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 $X = 0,2$.

El factor K calculado para cada subcuenca se observan en la Tabla 22

Tabla 22. Parámetros K y X para ecuación de Muskingum para tránsitos.

Reach	Longitud Km	I m/m	K	X
1	5,93	0,0027	2,14	0,2
2	2,67	0,0023	1,20	0,2

6.3 Modelación hidrológica con el programa HEC-HMS 3.3

Es un software que permite simular la transformación de la lluvia proyecto en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos para el tránsito de caudales. Esta particularidad le otorga gran flexibilidad ya que permite combinar diferentes rutinas obteniendo así una mayor aproximación con la realidad. Pueden simular la generación de avenidas en la cuenca, con las características que esta presenta en el momento de la simulación, en especial el uso del suelo o cubierta vegetal, para la precipitación seleccionada. (Gaspari, 2010).

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 de una cuenca. En este programa existen numerosos elementos hidrológicos que se encuentran interconectados para arrojar un resultado.

El uso del software hace comparable la información obtenida con otros estudios, debido a que mundialmente se utiliza para estimaciones de escurrimientos superficiales. El programa permite introducir los datos necesarios para la simulación y obtener así resultados numéricos, gráficos y tabulados, de fácil comprensión.

A continuación, la Fig. 36 muestra el esquema de distribución de subcuencas para la simulación en HEC-HMS 3.3.

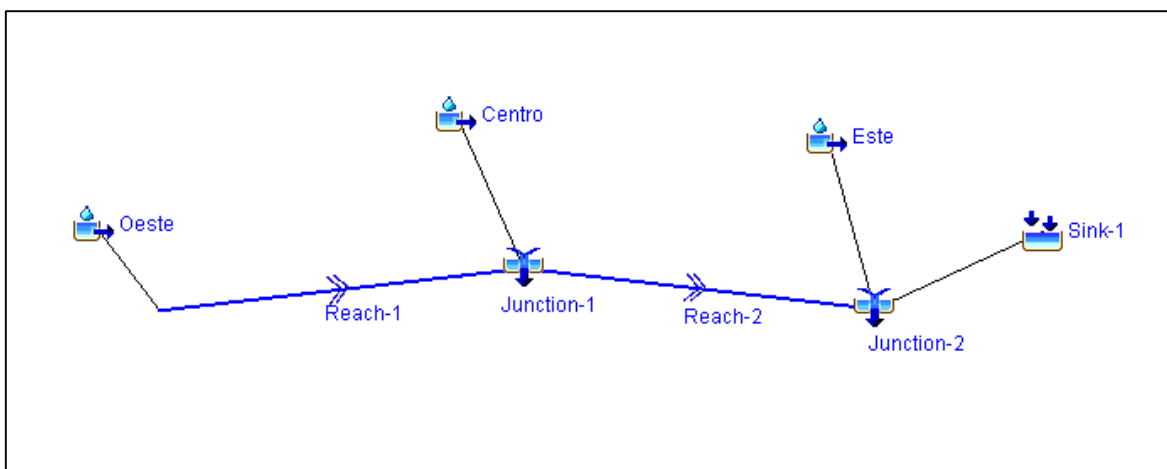


Figura 36. Esquema de distribución de subcuencas para la simulación en HEC-HMS

En la Fig. 36 se han representado varios elementos:

- Oeste, Centro y Este es el nombre que se asignó a cada subcuenca respectivamente.
- Reach es el cauce por donde el agua escurre y transita de una subcuenca a otra.
- Junction es un punto de unión de cauces que salen de las subcuencas.
- Sink es un sumidero y para este estudio el punto de salida del modelo hidrológico de la cuenca.

6.4 Resultado de la modelación

Luego de simular los distintos escenarios, en la Tabla 23 se observan los valores de caudales pico (máximos), lámina escurrida a la salida de la cuenca para dos tormentas proyecto y tres situaciones de manejo del suelo.

Tabla 23. Resultados de la modelación hidrológica para dos eventos de precipitación y tres escenarios de uso y manejo del suelo.

Escenarios	Periodo de Retorno 10 años			Evento Extremo		
	Actual	Rotación	Sist.	Actual	Rotación	Sist.
PP Máx diaria	114	114	114	220	220	220
Curva Número	80	75	70	80	75	70
Caudal al pico (m ³ /s)	85	64	46,3	253	216,3	181,3
Lámina (mm)	27,7	20,8	15	81,8	70,0	58,7

Para analizar los resultados se detalla en primer lugar el impacto de las prácticas de uso y manejo del suelo sobre el caudal pico y en segundo lugar el impacto entre eventos de precipitación:

1. Impacto del manejo del suelo en el caudal pico:

- El caudal pico se reduce significativamente al pasar del manejo actual al sistema de conservación (Sist).
- La rotación de cultivos también reduce el caudal pico, pero en menor medida que el sistema de conservación.
- La reducción del caudal pico entre uso "Actual" y "Sist" es mayor para el evento extremo que para el evento con PR de 10 años en términos de altura de lámina (23,1 mm vs 12,7 mm).
- En términos de eficiencia, si toda la cuenca se encuentra sistematizada, la disminución del caudal pico es de 28% para el evento extremo y del 46% cuando el evento tiene un PR de 10 años.
- Por su parte, si el manejo es en rotación adecuada, la eficiencia es de 25% para un evento con PR de 10 años vs el 14% en escenario de evento extremo.

2. Impacto entre eventos de precipitación:

El caudal pico y la lámina escurrida son significativamente mayores para el evento extremo que para el evento con PR de 10 años en todos los escenarios de manejo del suelo.

El sistema de conservación es el escenario más efectivo para mitigar los efectos de un evento extremo.

A modo de conclusión el manejo del suelo tiene un impacto significativo en el caudal pico y la lámina escurrida.

El sistema de conservación es el escenario más efectivo para reducir el caudal pico y la lámina escurrida, tanto para eventos de 10 años como para eventos extremos.

La Fig. 37 y 38 muestran la relación entre la lámina escurrida (en mm) y el NC para tres escenarios de manejo del suelo: actual, rotación de cultivos y sistematización de predios con terrazas de desagüe.

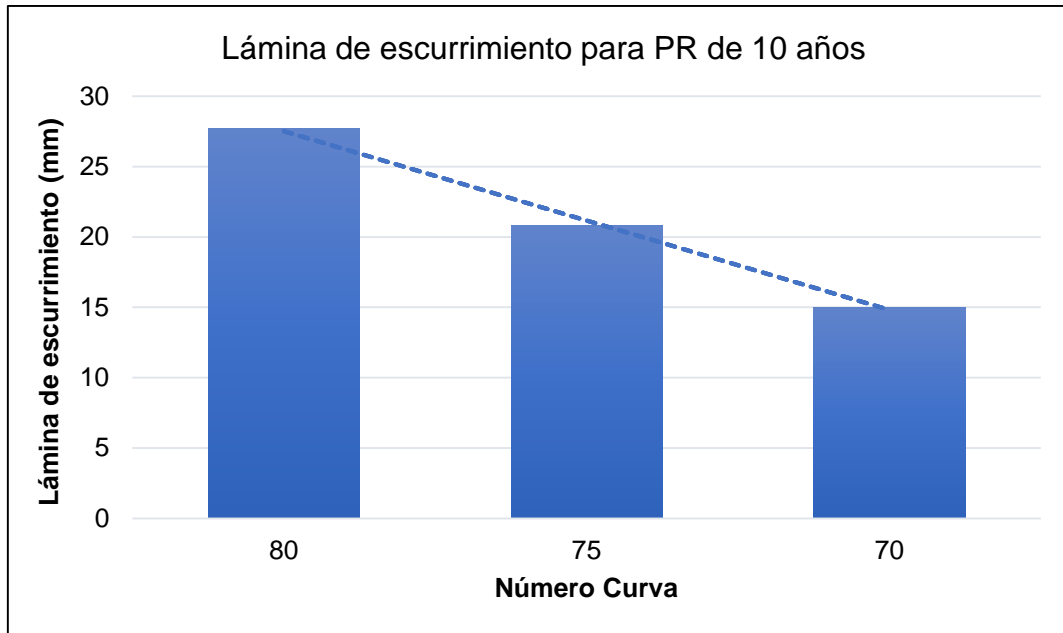


Figura 37. Láminas de escurrimiento en mm para una tormenta cuyo periodo de retorno es de 10 años.

Existe una relación directa entre la lámina escurrida y el NC. A mayor NC, mayor lámina escurrida.

La lámina escurrida es mayor para el escenario actual y menor para el sistema de conservación. La rotación de cultivos presenta una lámina escurrida intermedia.

El manejo del suelo tiene un impacto significativo en la lámina escurrida. La sistematización de predios reduce la lámina escurrida en un 46% y la rotación de cultivos en un 25% en comparación con el escenario actual.

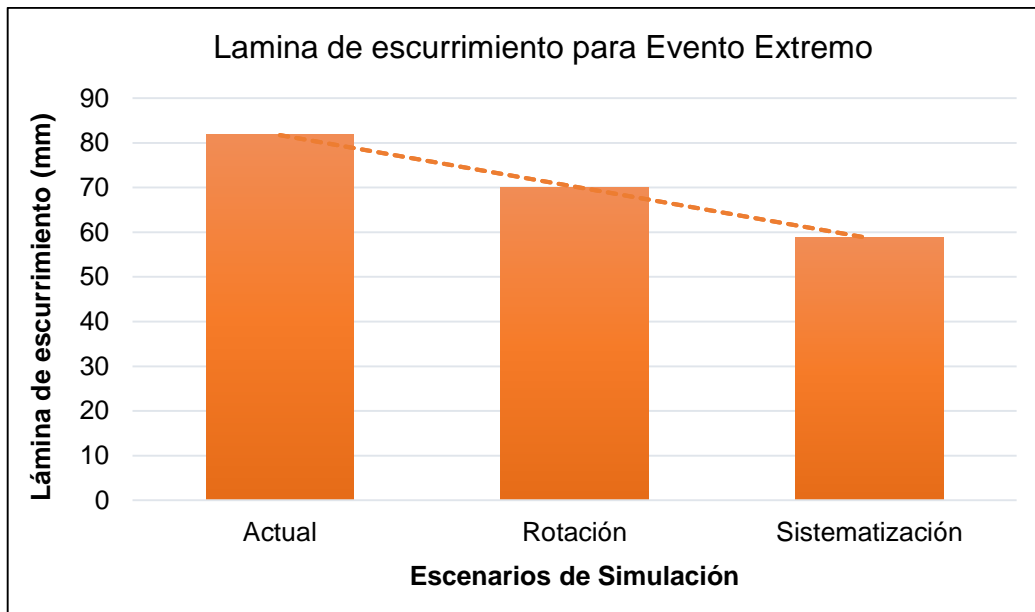


Figura 38. Láminas de escurrimiento para una tormenta de evento extremo.

En comparación con el análisis de la Fig. 37, la eficiencia por sistematizar los predios rurales es menor dando como resultado una reducción entorno al 28% para la cuenca sistematizada y de 14% si todos los predios realizaran una rotación 50/50 entre gramíneas y leguminosas.

Por último, la Fig. 39 muestra la comparación de lámina de escurrimiento para los seis escenarios simulados.

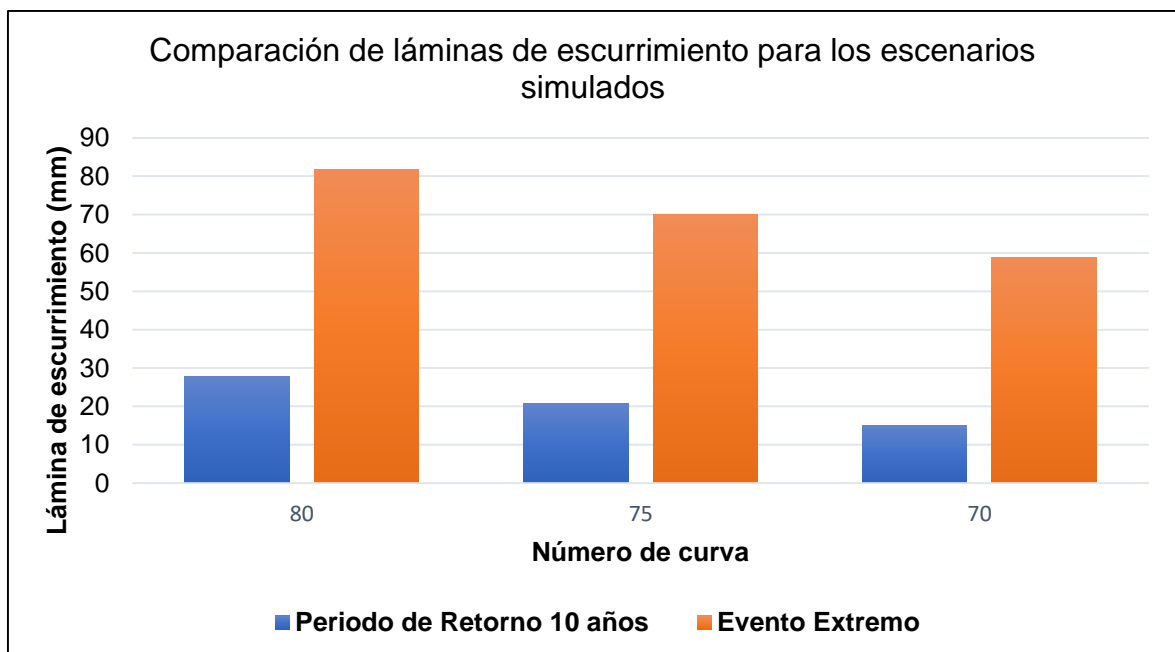


Figura 39. Comparativo de láminas de escurrimiento para seis escenarios simulados.

Hay que destacar que la magnitud de la lámina que escurre en un evento extremo aún bajo un manejo conservacionista (sistematizado el 100% de la superficie de la cuenca) es más del doble si se compara con el escenario bajo el actual manejo y un evento con PR de diez años.

En las Fig. 40 y 41 muestran los hidrogramas para la tormenta proyecto con un periodo de retorno de 10 años y 220 mm de lluvia total, respectivamente. Los hidrogramas comparan el comportamiento del caudal escurrido en el punto de salida de la cuenca bajo los tres escenarios de manejo del suelo propuestos.

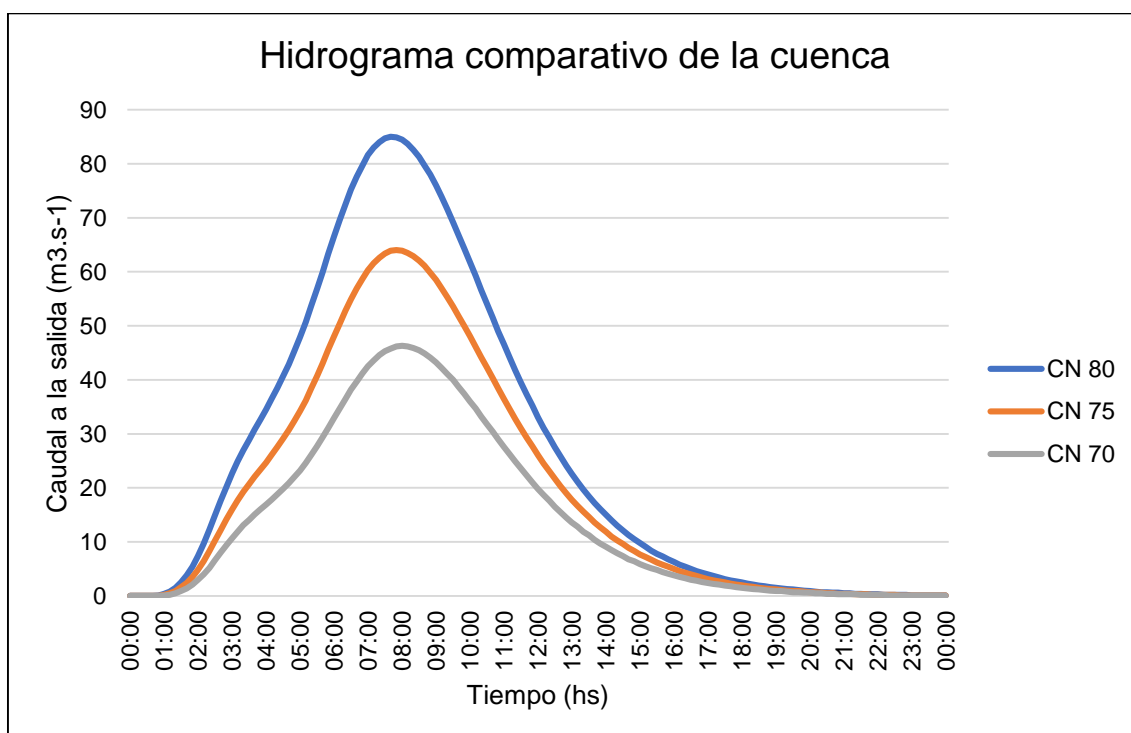


Figura 40. Hidrograma comparativo para una precipitación con PR de 10 años.

El caudal pico para el escenario “Actual” es de 85 m³. s y ocurre a las 7:40 hs de iniciada la lluvia (curva de color azul).

Para el escenario de “Rotación” el caudal desciende a 64 m³. s y se produce a las 7.50 hs (curva de color naranja), mientras que para el escenario “Sistematización” el caudal es de 46,3 m³. s a las 8:00 hs (curva de color gris).

El tiempo de pico se retrasa ligeramente en los escenarios de rotación y sistematización.

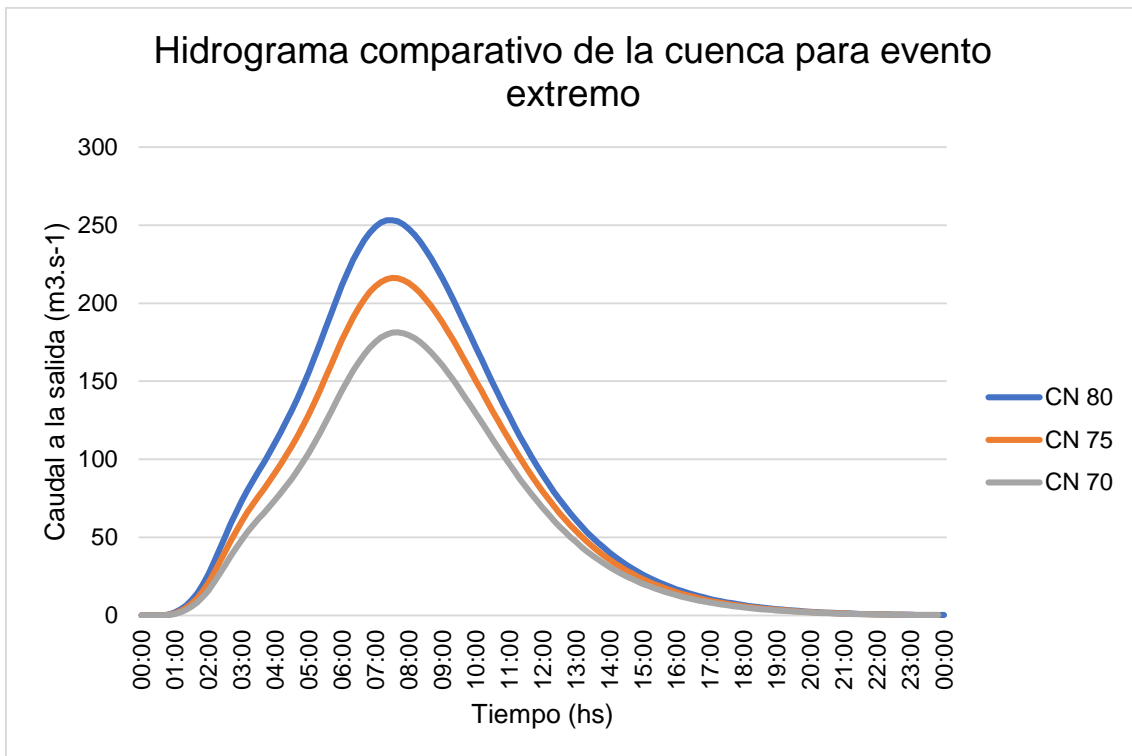


Figura 41. Hidrogramas comparativo para un evento extremo de precipitación.

Las tendencias observadas en la Fig. 40 se repiten en el evento extremo.

La sistematización reduce el caudal pico en un 28% en comparación con el escenario actual.

La rotación de cultivos reduce el caudal pico en un 14%.

El tiempo de pico se retrasa aún más en los escenarios de rotación y sistematización.

Impacto de la pérdida de agua sobre la productividad de los cultivos

En esta sección se analiza el impacto de la pérdida de agua sobre la productividad de los principales cultivos que se realizan en la cuenca bajo estudio. Se utilizó en primera instancia, el diferencial de lámina escurrida entre el uso actual y rotación adecuada. En segunda instancia se estimó el incremento de rendimientos a partir de la diferencia entre la lámina escurrida bajo el uso actual y lotes sistematizados.

Metodología:

1 Cálculo de la diferencia de lámina escurrida:

En primer lugar, el diferencial de lámina escurrida entre uso actual y rotación adecuada es de 6,9 mm, mientras que la diferencia entre uso actual y lotes sistematizados arrojó un valor de 12,7 mm.

2 Estimación del incremento de producción:

Para estimar el incremento en producción se realizó un producto entre el diferencial de lámina y la eficiencia de uso de agua (EUA) de cada cultivo. La EUA en soja es de 7 kg/mm y en maíz de 18 kg/mm.

- **Cálculo del incremento productivo por hectárea bajo rotación adecuada:**

Soja = 6,9 mm * 7 kg de grano/mm = 48,3 kg/ha

Maíz = 6,9 mm * 18 kg de grano/mm = 124,2 kg/ha

- **Cálculo del incremento productivo por hectárea para un uso conservacionista.**

Soja = 12,7 mm * 7 kg de grano/mm = 89 kg/ha

Maíz = 12,7 mm * 18 kg de grano/mm = 228 kg/ha

3 Cálculo del beneficio económico

Para calcular el beneficio económico se multiplicó el incremento productivo por un valor de cotización tomando como referencia el mercado de Rosario del día 17 de abril de 2024. En el caso de soja la cotización fue de 290 U\$/tn (posición mayo de 2024) y en maíz de 173 U\$/tn (posición julio 2024)

- **Beneficio económico por hectárea bajo rotación adecuada**

Soja = 48,3 kg/ha * 0,29 U\$/kg = 14 U\$/ha

Maíz = 124,2 kg/ha * 0,173 U\$/kg = 21,5 U\$/ha

- **Beneficio económico por hectárea para un uso conservacionista.**

Soja = 89 kg/ha * 0,29 U\$/kg = 25,8 U\$/ha

Maíz = 228 kg/ha * 0,173 U\$/kg = 39,4 U\$/ha

Debo aclarar que estos resultados son sólo para una precipitación. Si consideramos que en el ciclo productivo puede existir más de un evento con estas características, el incremento de la producción sería mayor a lo indicado.

En conclusión, la implementación de prácticas de conservación de suelo, como la sistematización, pueden aumentar significativamente la disponibilidad de agua para los cultivos y además evitan un deterioro irreversible de los suelos causados por los escurrimientos, a lo que debe agregarse una disminución considerable en el costo de mantenimiento de la red vial secundaria y terciaria.

7 Consideraciones finales

De acuerdo con el objetivo general del presente trabajo se recopiló y analizó la información disponible que permitió una caracterización en sus distintas dimensiones, esto permitió obtener los parámetros requeridos por los modelos de simulación utilizados.

Del análisis y resultados de las modelaciones se concluye que el escurrimiento cobró mayor preponderancia que la erosión hídrica. Si bien en el área de estudio existen signos de erosión hídrica, ésta afecta las vías de desagüe principalmente en la parte alta de la cuenca y es ocasionada por el mismo escurrimiento.

La adopción de prácticas de conservación de suelo como la sistematización, permitiría reducir en un 46% el volumen de escurrimiento para eventos cuya tormenta proyecto tiene un periodo de retorno de 10 años. Mientras que una rotación adecuada de cultivos lograría reducir el caudal en un 25%.

Si bien la ejecución de obras de sistematización, en general disminuyen el caudal escurrido, ante la ocurrencia de eventos extremos, se generan caudales excesivos difíciles de controlar.

Las prácticas de conservación de suelo aumentan la disponibilidad de agua para los cultivos, evitan que el suelo siga deteriorándose, a lo que debe agregarse una disminución considerable en el costo de mantenimiento de la red vial terciaria.

8 Bibliografía

Almorox, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, Ma. Gasco JM (1994) Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española, Madrid.

Apezteguia, H. P.; Amaya, H.; Crusta L. (1987). Medición de pérdidas de suelo y disminución de los rendimientos de soja debidos a la erosión hídrica en la región semiárida central de Córdoba - Manejo de Suelos - Departamento de Recursos Naturales - Facultad de Ciencias Agropecuarias - UNC - CC 509 (5000). Córdoba.

Army Corps of Engineers (2000). HEC-HMS hydrologic modeling system user's manual. Davis CA, Estados Unidos.

Bianchi, A. R.; Cravero, S. A. C. (2010). Atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Salta, Argentina.

Bracalenti A, Müller O, Berbery E (2017) Efectos remotos del cambio de uso de suelo en el clima del sudeste de Sudamérica. 37–41. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60763>

Caamaño Nelly, G., Dasso C (2005) Red regional de lluvias de diseño en la Pcia. de Córdoba. Informe técnico. Estación no 74- Rafael Garcia. Zona Centro. Dpto. Santa Maria. Córdoba.

Catalini C., Guillén N., García C., Baraquet M., Bazzano F., (2021). Precipitaciones Máximas Diarias para diseño hidrológico. Mapas Córdoba. <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/342>.

Chuvieco Salinero E (2008). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio, 3ra. Editorial Ariel S.A., Barcelona.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Boehner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

Equipo de desarrollo de qgis, 2020. Sistema de Información Geográfica QGIS. Abierto Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.org>.

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.

Gaspari, F. J. (2010). Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas - 2a ed. - La Plata: ISBN 978-987-26211-1-7.

Gorgas J. y Tassile, J.L. (Editores). 2003. Recursos Naturales de la provincia de Córdoba. Los Suelos. Escala 1:500.000. Agencia Córdoba DACYT-SEM, INTA.

IDECOR, 2023. Mapas Córdoba.

- Cartas de suelo: <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/#/mapa/334>
- Mapa vial: <https://gn-idecor.mapascordoba.gob.ar/maps/336/view>
- Precipitaciones máximas diarias para diseño hidrológico: <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/342>

INTA y Gobierno de la Provincia de Córdoba. (2008). Hoja 3163-32 ONCATIVO. Serie Carta de Suelos de la República Argentina. Córdoba. Escala 1:50.000

Instituto Geográfico Nacional (IGN), 2023. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

Karlen DL, Varvel GE, Bullock DG, Cruse RM (1994) Crop rotations for the 21st century. Advances in Agronomy. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60611-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60611-2)

Kirby, M.J, Morgan, R.P.C. (1994). Erosión de suelos. Limusa Noriega Editores. 375 pp.

Luti R.; Bertran De Solís M. A.; Galera F.M.; Muller N.; Berzal M.; Nores M.; Herrera M. A.; Barrera J.C. (1979). Vegetación. En: Vázquez JB, Miatello RA & ME Roqué (Directores). Geografía Física de la Provincia de Córdoba. Banco de la Provincia de Córdoba. Editorial Boldt, Buenos Aires, Argentina.

Marcos Lavagna (director). Censo Nacional Agropecuario 2018: resultados definitivos / 1a ed. (2021). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.

Marelli JH. (1988). La Erosión Hídrica. XII Reunión Nacional de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Corrientes, Argentina.

Marelli, J. H. (2012). Estimación del potencial erosivo en la provincia de Córdoba a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Publicación INTA Marcos Juárez.

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. del V., y Vigliecca E. N. 2019. Plan Básico Consorcio de Conservación de Suelos “Paso del Puma” – CCSPDP Provincia de Córdoba. Convenio Facultad de Ciencias Agropecuarias UNC. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba.

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>.

Nolasco M, Willington E (2014) Clasificación del uso de suelo en agricultura a partir de series temporales de imágenes LANDSAT. Sexto Congreso Argentino de Agroinformatica 64–73.

Nolasco M, Willington E, Bocco M (2016) Uso del suelo agrícola: comparación entre series temporales e imágenes satelitales individuales para su clasificación. Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNR 26:017–021.

Parodi, L. R. (1964). Las regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia argentina de agricultura y ganadería, ACME SACI, Bs. As, Argentina.

Ragonese, A. E. (1967). Vegetación y ganadería en la República Argentina. Colección Científica del INTA, Buenos Aires, Argentina.

Scotta J., et. al. (1986). Manual de sistematización de tierras agrícolas para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Estación Experimental Agropecuaria Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Troeh, F.R., Hobbs, J.A., Daonahue, R.L. (1991). Soil and Water Conservations. Second Edition. Prentice Hall, Ind. 530 pp.

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.