

Cambios en la cobertura vegetal y erosión del suelo en Sierras Chicas
– Córdoba en el periodo 2005-2017:
Aproximaciones desde el modelo RUSLE con base en la teledetección

Por Sara Celia Abbondanza

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, y
el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los
requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Octubre 2019

© IG - CONAE/UNC 2019

© FAMAFA – UNC 2019

Director: Giovanni Laneve

Scuola di Ingegneria Aerospaziale. La Sapienza Università di Roma

Co Director: Gabriel Platzeck

Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”

Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Universidad Nacional de Córdoba

INVAP

Asesora: Anabella Ferral

Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”

Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Universidad Nacional de Córdoba



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Agradecimientos

Cuando CONAE me dio la oportunidad de estudiar, INVAP me dio la posibilidad de ingresar. Inicie este camino con todo lo que significaba un “dale para delante” de Gabriel Platzek y Gustavo Wiman, quienes me dieron su apoyo para aprovechar esta oportunidad. Gracias a ellos y en especial a Anabella Ferral por su predisposición y acompañamiento, fueron mis ejemplos. Extiendo este agradecimiento a ambas instituciones por su aval y consideración. Asimismo, este estudio no podría haberse llevado a cabo sin el sustento de quienes me acompañaron desde un principio en la decisión de cursar y continuar. Agradezco a cada uno/a de los/as integrantes del Instituto de Altos Estudios Mario Gulich, de todos/as me llevo buenas anécdotas de cocina y muchos recuerdos más. Con una especial atención a Gastón González Kriegel por su comprensión y asesoramiento. Con una especial atención a mis amigos/as del estudio. Logramos formar un todo porque por parte no era lo mismo, pasaron muchas situaciones, pero sobresale el recuerdo de las risas armónicas y alguna algarabía. Gracias por todo compañeros/as y sobre todo porque sin esas charlas entre sobrias y no tan sobrias, no podría haber continuado ni haberlos/as conocido (María de los Ángeles Luna, Fabricio Herrera, Martín Calvo Rey, Emiliano Álvarez Zanelli, Leandro Cara, Ignacio Pascual, Natalia Orozco, Almendra Brasca Merlín, Ayelén Sánchez Valdivia, Micaela Trucco, Micaela Amorós).

Encarar un viaje por tanto tiempo con una gran carga de significados, fue la mejor de mis experiencias. Inolvidable la bienvenida de quien nos esperaba para brindarnos su apoyo en la inserción de la práctica. Con un amplio bagaje de conocimientos recién aprendidos, supo orientarme y dirigirme hacia esta meta. *Grazie* Giovanni Laneve, la confianza alcanzada da cuenta de su predisposición para quienes buscan seguirlo. Pues, para que exista un discípulo es necesario que exista un maestro. Gracias a la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) por el otorgamiento de beca y a todo el equipo por hacernos parte de él, tanto así que mi estadía pareciera haber sido de toda la vida.

Agradezco a mis colegas catamarqueños, quienes contribuyeron con los procedimientos administrativos necesarios para mis licencias laborales.

Gracias a los/as colaboradores/as a quienes consulté y supieron aclararme el panorama, y a los revisores asignados, cuyas devoluciones mejoraron en gran medida este trabajo.

Amigos/as, les agradezco su acompañamiento constante. Gracias a María de los Ángeles González y especialmente a Carolina Abbondanza, mi hermana, pero también una amiga; quienes me ayudaron en esta tarea investigativa y en su transcurso. Gracias Papá por impulsarme a construir una mirada crítica de lo que nos rodea, esa que me impulsa cada vez que encaro nuevos desafíos. Finalmente, Ana María gracias por aprobar todo de mí, dejándome ser como lo hacía, así mirándome, así admirándome. Gracias mamá por sostenerme.

Resumen

Las dinámicas territoriales actuales en la región de Sierras Chicas – Córdoba, entendidas desde la expansión urbana, la construcción de vías de comunicación, la extracción de recursos, entre otras intervenciones antrópicas, cooperan en la intensificación de los cambios producidos en la cobertura vegetal. La preocupación por los cambios, principalmente por aquellos asociados a prácticas de deforestación, radica en el papel significativo de estos en el proceso de formación del suelo. La aparición de suelos desnudos vulnerables a las precipitaciones y la pérdida de la capacidad de absorción e infiltración que predispone el terreno para una mayor escorrentía, constituyen una serie de componentes que ponen en riesgo a las poblaciones expuestas. Esto es por su influencia negativa en la hidrología de cuencas y el impacto de estas interacciones históricas sobre los ecosistemas. En este contexto, las técnicas geoespaciales basadas en modelos que incorporan variables climáticas, edafológicas, biológicas y antrópicas, permiten evaluar la distribución espacial de los cambios en la tasa de erosión del suelo a partir de las modificaciones de la cobertura vegetal. Como metodología se definieron los factores locales en la adaptación de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada para el periodo 2005-2017. El cálculo del modelo se realizó a partir de la fusión de información satelital y de archivo, con énfasis en la clasificación supervisada de imágenes ópticas. Las variaciones temporales en los mapas evidenciaron que los cambios de la cobertura vegetal, afectan mayormente la clase arbustiva e impacta en la tasa de erosión de suelos de pendiente inclinadas, ribereños y próximos a las poblaciones de piedemonte; sin embargo, la utilización del modelo requiere del establecimiento de supuestos y simplificaciones que deben tenerse presentes durante la interpretación de los resultados, en especial cuando mediante la simulación se pretende cubrir la falta de información.

Abstract

The actual territorial dynamics in the region of Sierras Chicas – Córdoba, the urban expansion, the construction of communication routes, the selective use of resources, among other anthropic interventions; tend to cooperate in the intensification of the changes produced in the vegetation cover. The change-type produced cause some wormies, mainly by those associated with deforestation practices, lies in his significant role in the soil formation process. The appearance of bare soils which are vulnerable to rainfall, the loss of the capacity of absorption and infiltration, constitute a series of components that exposed populations at risk. This is because of its negative influence on watershed hydrology and of these historical interactions on ecosystems. In this context, the geospatial techniques based on the models that incorporate climatic, of the soil, biological and anthropic variables, allow the evaluate the spatial distribution in the soil erosion rate from changes in the covered land. The RUSLE model (Revised Universal Soil Loss Equation), adapted by means of local factors, is used as a methodology to carry out the análisis for the period 2005-2017. The model calculation was made from the fusion between satelital information and files, with the emphasis on the supervised classification of the optical images. he temporary variations in the maps evidenced that changes in the vegetal cover affect mainly in the shrub class and causa an impacts on the erosion rate of inclined slopes, river sectors and piedmont populations. However, the use of the model requires the establishment of assumptions and simplifications that must be taken into account during the interpretation of the results, especially when seeking to cover the lack of information through simulation.

Palabras claves

Cobertura vegetal, erosión del suelo, RUSLE, teledetección y cartografía.

Índice de contenidos

<i>Agradecimientos</i>	2
Resumen	4
Abstract.....	4
Palabras claves	4
Capítulo 1.....	8
1. Planteo del problema.....	8
2. Hipótesis.....	11
3. Objetivos	11
3.1. Generales	11
3.2. Específicos.....	11
4. Marco teórico.....	12
4.1. Suelo - especificaciones físicas.....	12
4.2. Suelos - dinámicas.....	16
4.3. Escenarios conceptuales en torno a la definición de cambio en cobertura vegetal y deforestación	19
4.4. Erosión del suelo	21
4.5. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica	22
4.6. Efectos de la pérdida del suelo por erosión hídrica sobre las poblaciones expuestas	24
4.7. Acerca de la aplicación del modelo RUSLE.....	24
4.8. Aportes desde la teledetección espacial.....	26
Capítulo 2.....	28
5. Posición y situación geográfica	28
6. Geografía del área de estudio	29
6.1. Descripción físico-natural.....	29
6.2. Descripción socio-territorial	33
7. Encuadre metodológico.....	35
7.1. Postura metodológica	35
7.2. Estructura metodológica	36
7.3. Materiales y métodos por etapa.....	36
Capítulo 3.....	48
8. Mecanismos de adaptación de los factores locales del modelo RUSLE	48
8.1. Factor R: Erosividad de la lluvia.....	48
8.4. Factor K: Erodabilidad del suelo.....	51
8.3. Factor LS: Topografía del terreno	53
8.4. Factor C: Cobertura del terreno.....	55
8.5. Factor A: Pérdida del suelo por unidad de área y tiempo	65
9. Consideraciones finales.....	67
Capítulo 4.....	68
10. Conclusiones.....	68
10.1. Acerca de los resultados obtenidos para el área de la cuenca	68
10.2. Limitaciones y beneficios en la implementación del modelo RUSLE	70
Bibliografía	73
Apéndice	81

Índice de tablas

Tabla 1: Nomenclatura de los horizontes de un hipotético perfil del suelo, que podría representar un suelo forestal de un clima húmedo y fresco.....	12
Tabla 2: Naturaleza de las características diferenciadoras de las categorías del sistema de los E.U.A	16
Tabla 3: Superficie (ha) según las clases erosión hídrica y susceptibilidad a la erosión hídrica. Pedanía Río Ceballos.....	31
Tabla 4: Promedio de las precipitaciones (2016 y 2017), de acuerdo a las estaciones meteorológicas próximas al área de la cuenca	39
Tabla 5: Características del GDEM ASTER - Versión 2. 2011	41
Tabla 6: Características del producto Landsat 5 Sensor TM.....	43
Tabla 7: Características del producto Landsat 8 Sensor OLI.....	44
Tabla 8: Características del producto SENTINEL sensor S2A MSI.....	45
Tabla 9: Valores de Factor C para bosque no alterados	46
Tabla 10: Valores del Factor C para matorrales y vegetación permanente	46
Tabla 11: Características generales del procedimiento 2005-2017	48
Tabla 12: Valores de PMA y Factor R según Gaitán <i>et al.</i> (2017), para las localidades municipales emplazadas de norte a sur en el área este de la cuenca del arroyo Saldán.....	50
Tabla 13: Resultados del cálculo del factor K.....	52
Tabla 14: Matriz de error para la clasificación del 2005 (superior) y del 2014 (inferior). Valores expresados en porcentajes.....	57
Tabla 15: Matriz de error para la clasificación del 2016 (superior) y del 2017 (inferior). Valores expresados en porcentajes.....	58
Tabla 16: Detección de cambio 2005 - 2014. Valores expresados en hectáreas.....	61
Tabla 17: Detección de cambio 2016 - 2017. Valores expresados en hectáreas.	62
Tabla 18: Asignación del factor C según las clases definidas en el área de la cuenca del arroyo Saldán.	64
Tabla 19: Cálculo de la superficie por cada intervalo de erosión del suelo para el año 2005 y 2014. Área de la cuenca del arroyo Saldán.....	66
Tabla 20: Cálculo de la superficie por cada intervalo de erosión del suelo para el año 2016 y 2017. Área de la cuenca del arroyo Saldán.....	66

Índice de figuras

Figura 1: Triángulo de texturas del suelo.....	14
Figura 2: Relación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo.....	23
Figura 3: Delimitaciones del área de la cuenca del arroyo Saldán.	28
Figura 4: Perfil de la distribución altitudinal de la vegetación nativa en la Sierras Chicas	32
Figura 5: Mapa de PMA. 2005-2014.....	49
Figura 6: Mapa del Factor R. 2005-2014.....	49
Figura 7: Mapa de PMA. 2015-2017.....	50
Figura 8: Mapa de Factor R. 2015-2017.....	50
Figura 9: Mapa de tipos de suelo	53
Figura 10: Mapa del Factor K.	53
Figura 11: Mapa de las alturas del terreno.....	54
Figura 12: Mapa de pendientes	54
Figura 13: Longitud de la pendiente.....	54
Figura 14: Inclinación de la pendiente según el grado	54
Figura 15: Conjugación de factores. En unidades adimensionales.....	55
Figura 16: Cobertura del terreno 2005 y 2014 del área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014.....	60
Figura 17: Cobertura del terreno 2016 y 2017 del área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016 Derecha: enero/2017.....	62
Figura 18: Factor C 2005 y 2014. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014.	63

Figura 19: Factor C 2016 y 2017. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016. Derecha: enero/2017	64
Figura 20: Factor A 2005 y 2014. Perdida de suelo expresada en toneladas por hectárea por año. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014	65
Figura 21: Factor A 2016 y 2017. Perdida de suelo expresada en toneladas por hectárea por año. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016. Derecha: enero/2017	67

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Factor A	37
Ecuación 2: Factor R	37
Ecuación 3: Factor K.....	39
Ecuación 4: Contenido de arena y arcilla	39
Ecuación 5: Contenido de limo y arcilla.....	39
Ecuación 6: Contenido de materia orgánica.....	40
Ecuación 7: Contenido de arena.....	40
Ecuación 8: Factor L	40
Ecuación 9: Parámetro según longitud de la pendiente	40
Ecuación 10: Longitud de la pendiente	40
Ecuación 11: Factor S.....	40
Ecuación 12: Factor S.....	40

Capítulo 1

1. Planteo del problema

Los cambios en la cobertura vegetal por acción antrópica, son esperables en la medida que existe una apropiación del espacio geográfico y este es potencialmente productivo, tanto en términos económicos como socio-territoriales. El problema se instala cuando esos cambios no son controlados o cuando no se prevén sus consecuencias, inherentes a toda intervención humana capaz de generar un impacto directo e indirecto a corto y largo plazo.

Actualmente, se ha puesto de manifiesto que el proceso de cambio en la cobertura involucra una complejidad asociada a múltiples causas: directas, como la expansión de la agricultura, extracción de productos del bosque, fuegos; y subyacentes, referida a lo ambiental, socio-económico y tecnológico (Lambin *et al.*, 2003 citado en Cabido, *et al.*, 2005). La mayoría de estas prácticas se asocian inicialmente a la deforestación, lo cual se torna preocupante si se atienden los modos en los que se fue desarrollando, el impacto que generó en los últimos tiempos y sus tendencias.

Definida como la “conversión de bosques en otro tipo de cobertura, o a la disminución de la cobertura arbórea por debajo de un nivel crítico, 10% para la FAO, 2001” (Cabido, *et al.*, 2005, p.274), la deforestación apunta a una actividad no regulada con la que disminuye la superficie forestal a través de la tala y el desmonte, con fines y modos diversos sin asegurar su regeneración natural. Dentro de este proceso, también se tiene en cuenta la fragmentación del bosque. Esto ocurre cuando un área continua resulta dividida en fragmentos menores, aislados entre sí por una matriz de tierra con otro tipo de cobertura, como la vegetación arbustiva, áreas urbanas, etc. (Gavier Pizarro y Bucher, 2004.p 4).

A escala mundial, la pérdida neta de bosques entre el año 1990 y 2000 se estima en 10,9 millones de ha por año (Achard *et al.*, 2002 citado en Cabido, *et al.*, 2005). Los últimos reportes indican que desde 1990 a 2015 se produjo a nivel global una pérdida neta de unos 129 millones de ha de bosque natural y plantado (Montes Galbán, *et al.* 2016). “La deforestación no sólo ha aumentado significativamente, sino ha dejado de ser patrimonio del hemisferio norte para pasar a ser un fenómeno concentrado en el hemisferio sur” (Montenegro, *et al.* 2004. p.3). Un estudio sobre deforestación publicado por la Organización Mundial de Conservación, asegura que de mantenerse las tendencias actuales podrían destruirse hasta 170 millones de ha de bosque entre 2010 y 2030. Más del 80 % de la pérdida de superficie forestal en todo el mundo, se concentrará sólo en once “Frentes de Deforestación”: este de Australia, Gran Mekong, Nueva Guinea y Sumatra, la cuenca del Congo, África oriental, Borneo, El Cerrado, Chocó-Darién, Amazonia, el Bosque Atlántico y el Gran Chaco (WWF, 2015)¹.

Es destacable el creciente aislamiento y fragmentación de bosques subtropicales, estacionalmente secos y sabanas en el Gran Chaco (Hoyos, *et al.* 2013). Desde la Asociación Guayra Paraguay², en el territorio del Gran Chaco Americano se detectaron entre los años 2010 y 2011 un total de 560.684 ha deforestadas, semejantes cifras para el 2012 con 539.233 ha deforestadas. Se han podido constatar picos máximos de deforestación alrededor de las 1.400 ha por día en promedio. En estudios actuales se detectaron cambios de uso en la cubierta natural

¹ Fondo Mundial para la Naturaleza, por sus siglas en inglés World Wildlife Fund.

² Organización de la sociedad civil sin fines de lucro, que trabaja en la defensa y protección de la diversidad biológica de Paraguay. Actualmente se ocupan del monitoreo del Gran Chaco, para comparar el patrón de comportamiento espacial y temporal de los cambios que se observan en esta región, brindando información regularmente cada mes desde el año 2010.

en el Gran Chaco Americano que alcanzan las 40.343 ha para el año 2017 (Arévalo, *et al.* 2017).

Las selvas subtropicales y el Chaco en Argentina, son los sectores de mayor pérdida de bosque. Entre 1990 y 2000 desaparecieron 28.510.00 ha de bosques (el 7,6% del total existente en 1990) a una tasa del 0,8% anual. Esta tasa de deforestación es una de las más altas registradas en Sudamérica (Gavier Pizarro y Bucher, 2004). La década de los años 90, es vista como un nuevo pulso de deforestación favorecido por la inversión en infraestructura, los cambios tecnológicos en la agricultura y el contexto internacional que motivan probablemente uno de los procesos de transformación de bosques nativos de mayores dimensiones en la historia del país (Montenegro, *et al.* 2004. p.5).

Argentina representa, en la actualidad, uno de los países que ha comunicado las mayores reducciones anuales en el área de bosque, con una pérdida del 1% para el 2010 (FAO, 2015). Para la asociación Guayra Paraguay, en el año 2012 el país ha liderado las tasas de deforestación entre abril y julio. El sector argentino del Gran Chaco, registró en octubre del 2017 cambios de uso en la cubierta natural de 2.450 ha, es decir el 18% del total, ocupando el segundo lugar después de Paraguay (Arévalo, *et al.* 2017). Más de la mitad de la deforestación ocurre en la región fitogeográfica del Chaco Semiárido, siendo el bioma de mayor superficie remanente en la Argentina, el de menor biodiversidad y el que históricamente ha sido más degradado por el sobrepastoreo y el aprovechamiento forestal selectivo (Bucher y Huszar, 1999 citado en Giménez, 2017. p.9).

Córdoba, como provincia atravesada por el Gran Chaco, se ve directamente involucrada en la situación. En el informe de 2013, sobre la “Situación de los Bosques y Desmontes” publicados desde el Foro Ambiental Córdoba, se demuestra que existió una pérdida de 68.176 ha de tierras forestales entre 2006 y 2011 en la región Chaqueña de Córdoba, al noroeste de la provincia. La Ley Nacional N° 26.331 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos (vigente desde 2009) y la Ley N° 9.814 de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba (2010), si bien responden como instrumento de protección ambiental, hasta el momento sólo ha generado un leve descenso en la práctica de deforestación. Los informes publicados por la Policía Ambiental, los registros mensuales de deforestación de la Asociación Guayra Paraguay y las declaraciones de organizaciones sociales, corroboran que después de la aprobación de la Ley de Bosques han continuado los desmontes en la Provincia de Córdoba; entre 2012 y 2014 se desmontaron 14.823 ha de monte chaqueño en la provincia, una tasa de casi 5.000 ha/año (Cabrol y Cáceres, 2017. p.139).

Los cambios en la cobertura vegetal que se asocian principalmente a la deforestación, ocurren por la conversión de bosques a tierras de uso agrícola (Turner, *et al.* 1995; Lambin, *et al.* 1999 citado en Cabido, *et al.* 2005) y en efecto, en zonas de llanura; sin embargo, no son menores las alteraciones que se producen en zonas de montaña. Estudios realizados en el área de Sierras Chicas, dan cuenta de una actividad que se concentró desde el Siglo XX en los valles interserranos y sobre bosques autóctonos. La degradación incrementó su susceptibilidad a los incendios iniciados en pastizales, transformando porciones importantes de bosque en otras coberturas, principalmente arbustales. (Cabido *et al.* 1991; Miglietta 1994 citado en Gavier Pizarro y Bucher, 2004, p.6). En la actualidad, según la evaluación del estado de conservación de las ecorregiones de América, el estado de conservación del bosque en este sector entra en la categoría “*en peligro*”, mientras que se le otorga la de “*amenazado*” al bosque serrano de Córdoba.

En este contexto, la importancia de los cambios en la cobertura vegetal, radica en el papel significativo de la deforestación en la pérdida de suelo. Esto es por su influencia negativa en la hidrología de cuencas (Schietecatte *et al.* 2008; Bewket y Teferi, 2009) y el impacto de estas interacciones históricas sobre los servicios ecosistémicos (Norder *et al.* 2017), en tanto que la erosión hídrica afecta la productividad de todos los ecosistemas no sólo la agricultura,

sino también bosques y pastizales (Pimentel, 2006 citado en Bueno Hurtado et al. 2016).

Análisis específicos sobre la cobertura vegetal dan cuenta que la reducción de la pérdida de suelo es el resultado de los efectos combinados de las raíces y la cobertura del dosel. Para la erosión por salpicadura, la vegetación es el parámetro más importante, mientras que en la erosión de cárcavas las raíces de las plantas son al menos tan importantes como la vegetación (Gyssels, *et al.* 2005).

Considerando que los cambios en la cobertura tienen un impacto directo sobre la condición de los suelos (Trimble y Crosson, 2000, citado en Cabido, *et al.*, 2005), se pone énfasis en la influencia de estos sobre los procesos de erosión de suelo ocurridos en zonas de sierras. Por un lado, debido a que el suelo es un recurso natural limitado, cuya tasa de formación está relacionada con la tasa de erosión bajo vegetación nativa y el ritmo de la erosión en tiempos geológicos (Montgomery, 2007, citado en Norder. *et al.* 2017). y por otro, al tratarse de zonas donde la existencia de pendientes abruptas que comprometen la permanencia y formación de los suelos, sumado a las alteraciones de la estructura edáfica por remoción de la cobertura vegetal nativa, suelos vulnerables a las precipitaciones por impacto de la gota de lluvia y por la escorrentía, y la pérdida de la capacidad de absorción e infiltración, constituyen una serie de componentes que ponen en peligro a las poblaciones pedemontanas expuestas.

A partir de las implicancias del problema, el desarrollo de la investigación tiene como base analizar en qué medida los cambios en la cobertura vegetal influyen en la erosión del suelo a partir de la aplicación del modelo basado en la ecuación universal de pérdida del suelo revisada, RUSLE por su nombre en inglés (*Revised Universal Soil Loss Equation*) para el análisis de la erosión del suelo en zona de sierras. Por consiguiente, el objeto de estudio está conformado principalmente por el suelo propenso a la erosión y por los mecanismos de aplicación del modelo RUSLE. Este último, en el sentido que se busca una metodología idónea en la adaptación de los factores locales para comprobar la aplicabilidad del modelo desde la teledetección y como trabajo indirecto.

El estudio experimental a través del modelo RUSLE, en el que se combinan técnicas propias de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, permite obtener con mayor frecuencia información para evaluar la distribución espacial de los cambios en la tasa de erosión del suelo, mediante variables climáticas, edafológicas, biológicas y antrópicas. A raíz de que la cobertura vegetal del terreno posee la condición de ser modificada por las actividades humanas (Gaitán *et al.* 2017), la aplicación del modelo resulta útil para evaluar a tiempo las repercusiones de determinados manejos de las áreas forestales y evitar consecuencias en las poblaciones expuestas.

Con la aplicación correcta de la RUSLE, se deben obtener tasas de erosión más cercanas a la realidad de cada zona que con la USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Estudios a través de técnicas de acoplamiento temporal, en los que se analizan las interacciones históricas entre la deforestación y la pérdida de suelo, destacan la eficiencia de las estimaciones indirectas como RUSLE sobre las tasas de denudación a corto plazo (Norder *et al.*, 2017), a la vez que demuestran la simplicidad de su aplicación (Du *et al.* 2016). No obstante, se destaca el carácter empírico del modelo y el relativo grado de incertidumbre de los resultados obtenidos cuando no se dispone de datos de campo para su contraste. Esto da a las estimaciones efectuadas, un valor relativo para cuantificar la mayor influencia de los factores naturales más limitantes, la localización de las zonas más críticas y las posibilidades de disminuir las tasas de erosión modificando la cobertura vegetal (González del Tánago, 1991).

Aunque muchos aspectos de este modelo están siendo investigados, es probable que la relevancia de investigaciones con fines agrícolas, la dificultad para la obtención de información básica y la complejidad de los modelos de cuantificación y estimación involucrados, resulten una de las principales limitantes para su implementación (Díaz, 2006).

Para el estudio de caso, se escoge como área la zona de sierras abarcada por la cuenca del arroyo Saldán, sobre el faldeo oriental de las Sierras Chicas, departamento Colón, provincia de Córdoba. Con una superficie aproximada de 21.300 ha (213 km²) y delimitada por las dimensiones de esta cuenca, el área de estudio se posiciona en el cuadrante de los 31°05', 31°18' de latitud Sur y 64°15', 64°25' de longitud Oeste (Formica, *et al.* 2015). Atraviesa con dirección norte-sur las localidades de piedemonte desde Río Ceballos a Saldan.

En suma, de la influencia negativa de la deforestación en la hidrología de cuencas y específicamente sobre la erosión del suelo (Schietecatte *et al.* 2008), surge la necesidad de indagar en la relación de ambos procesos y en los medios experimentales para su análisis a partir de los siguientes interrogantes: **¿en qué medida los cambios en la cobertura vegetal contribuyen a la erosión del suelo en el área de la cuenca del arroyo Saldán?** y respecto de la metodología **¿cuán posible es la aplicación del modelo RUSLE abordado desde la teledetección espacial como análisis indirecto?**

2. Hipótesis

Los cambios de la cobertura vegetal ocurridos en los últimos años por las prácticas de deforestación en el área de la cuenca del arroyo Saldan, al dejar el suelo vulnerable a las precipitaciones y al disminuir la capacidad de absorción e infiltración, contribuyen en gran medida a la erosión del suelo.

3. Objetivos

3.1. Generales

- Evaluar, mediante la aplicación del modelo RUSLE, la distribución espacial de la tasa de erosión a partir de los cambios en la cobertura vegetal en el área de la cuenca arroyo Saldan, periodo 2005-2017; a fin de analizar en qué medida contribuye a la erosión del suelo.
- Proponer los mecanismos de aplicación del modelo RUSLE a partir de una metodología idónea, para demostrar las ventajas de la teledetección espacial en trabajos indirectos.

3.2. Específicos

Describir el escenario del área de la cuenca del arroyo Saldán a partir de las condiciones físico-naturales, socio-territoriales y el marco normativo vigente en el periodo 2005-2017, a fin de conocer las causas que motivan los cambios de la cobertura vegetal.

Determinar la metodología idónea para la adaptación de los factores locales del modelo RUSLE para cada año establecido (2005 - 2014 y 2016 - 2017).

Experimentar sobre las metodologías de clasificación de imágenes ópticas de acuerdo con los materiales disponibles para confeccionar el mapa del factor “cobertura del terreno” del modelo RUSLE en cada año establecido.

Detectar los cambios producidos en los resultados que arroja la aplicación del modelo RUSLE para cada año establecido, a fin de analizar en qué medida los cambios en la cobertura vegetal contribuyeron a la erosión del suelo.

Establecer comparaciones entre los resultados obtenidos y otros estudios en torno a la tasa de erosión del suelo, a modo de proporcionar una dimensión de la magnitud del problema.

4. Marco teórico

Se propone una revisión de los supuestos en torno a la erosión del suelo y sus efectos, a fin de dar curso a nuevas perspectivas de análisis acerca de la aplicación del modelo RUSLE con base en la teledetección.

4.1. Suelo - especificaciones físicas

4.1.1. Definición en torno al concepto de suelo

El vocablo suelo proviene del latín *solum*, que significa sólido. Partiendo de la etimología y de las coincidencias en las definiciones edafológicas sobre el vocablo, se entiende por suelo a la capa más externa de la corteza terrestre, compuesta por materias orgánicas e inorgánicas, cuya característica distintiva es su capacidad para sostener vida vegetal. Cumplen su función como soporte de las raíces de las plantas y como medio químico para su proceso alimenticio, del cual obtienen las sustancias nutritivas.

El suelo es una capa delgada que se divide en subcapas denominadas horizontes. Difiere de su material parental (masa mineral no consolidada) en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas. Se formó lentamente a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales. En la formación intervienen fragmentos de roca, minerales originarios, material orgánico con distintos grados de descomposición, organismos vegetales y animales, aire y agua. En su parte más externa, el humus (material oscuro sobre el perfil del suelo) retiene agua, nutrientes y ayuda a prevenir la erosión. Todas las sustancias que dan lugar al suelo son importantes por sí mismas, pero lo fundamental es el equilibrio adecuado entre los diferentes constituyentes.

A razón de la importancia que recae sobre las características del suelo, se considera conveniente aclarar las definiciones básicas de los aspectos a partir de los cuales se describen (perfil edafológico, textura y estructura) y las clases en la que se agrupan de acuerdo a estas.

4.1.2. Perfil

Tabla 1: Nomenclatura de los horizontes de un hipotético perfil del suelo, que podría representar un suelo forestal de un clima húmedo y fresco

Nomenclatura	Características
01	Hojas caídas y residuos orgánicos poco descompuestos
02	Restos orgánicos parcialmente descompuesto
A1	Horizonte oscuro compuesto de materia mineral y orgánica mezcladas y con gran actividad biológica.
A2	Horizonte claro, con máxima eluviación.
A3	Transición hacia B, mayor parecido al A.
B1	Transición hacia A, mayor parecido al B.
B2	Máxima acumulación de silicatos de arcillas ineral o de sesquióxidos y materia orgánica.
B3	Transición hacia C, mayor parecido a B.
C	Sustrato alterado, ausente ocasionalmente; la formación de los horizontes puede seguir alterándolos, tanto que los horizontes A o B pueden descender finalmente sobre la roca consolidada.
R	Estrato de roca consolidada por debajo del suelo.

Nota. Recuperado de Strahler, Strahler, (1989), p.391, sobre la base de Roy W. Simonson, Servicio de Conservación del Suelo - Departamento de Agricultura de los E.U.A.

El perfil del suelo es el conjunto de los estratos sucesivos cuasi paralelos (horizontes), cuyo espesor y grado de diferenciación determina la evolución del perfil. Para representar la diferencia del perfil (Tabla 1), los horizontes edafológicos se designan con las letras A (horizonte mineral superficial), B (horizonte de acumulación de arcilla, hierro, sales o materia orgánica iluviada) y con la letra C a la capa mineral similar al material original. Las subdivisiones vendrán caracterizadas por una serie de números que acompañan a las letras (Strahler, Strahler, 1989, p.391). De este modo, el perfil de los suelos jóvenes no presenta diferenciación de horizontes y están próximos a la roca madre. Los suelos poco evolucionados, presentan una porción superficial rica en humus sobre la roca madre, dando lugar a un perfil del tipo AC. Mientras que el perfil ABC, aparece cuando la evolución del suelo es mayor y se forma el horizonte B, resultante de la alteración de la roca madre. En la nomenclatura de horizontes y capas, se distingue también la letra O (horizonte orgánico), la E (horizonte de eluviación o pérdida de arcilla) y la R como manto rocoso consolidado (Arrigo, 2000, p.179).

4.1.3. Textura

La textura es el parámetro que mejor caracteriza al suelo desde el punto de vista físico. Esta se define a partir de la composición por tamaño de las partículas (granulométrica) de un suelo y refiere al “porcentaje de materia mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las partículas minerales en dos o más clases por tamaño mutuamente excluyentes” (Rucks, *et al.* 2004). Las partículas del suelo tienen tamaños muy variables, cuyas propiedades difieren considerablemente, por lo que se han establecido algunos límites basados en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas del suelo a través del agua aumenta con el diámetro de estas (Rucks, *et al.* 2004).

La textura define la relación porcentual de cada uno de los grupos de partículas menores de 2 mm de diámetro, las cuales constituyen las fracciones granulométricas y otorgan al suelo alguna de las siguientes características (Antonini, *et al.* 2008, p.9):

- Arena gruesa: macroporosidad alta, permeabilidad alta, compacidad baja, poca inercia térmica, facilidad de laboreo, energía de retención de agua baja, almacenamiento de nutrientes bajo.
- Limo: fertilidad física deficiente, riesgo de encostramiento superficial, velocidad de infiltración baja, inestabilidad estructural alta, permeabilidad media a baja, erosionabilidad alta, almacenamiento de nutrientes y capacidad de retención de agua útil media a baja.
- Arcilla: fertilidad química alta, superficie específica muy alta, capacidad de intercambio catiónico alta y variable con mineralogía, capacidad de retención de agua útil alta, microporosidad alta.

La plasticidad y tenacidad son cualidades que aparecen si las partículas de arcilla y limo cubren las fracciones gruesas de arena y grava, de lo contrario los grandes espacios entre las partículas separadas de estas fracciones, generan que el paso del agua gravitacional sea rápido y por consiguiente la capacidad de retenerla sea escasa. Las partículas de arcilla tienen forma laminar, si se humedecen son plásticas y con una cantidad adecuada de agua, se expande y se tornan pegajosas. A diferencia de las partículas de limo, por lo general tienen forma irregular, pocas veces lisa. Su poca plasticidad, cohesión y adsorción se debe a una película de arcilla que recubre la fracción de limo (Rucks, *et al.* 2004).

La predominancia de fracciones finas en un suelo, le determina una textura que tiende a retardar el movimiento del agua y aire, siendo altamente plástico y fuertemente adhesivo cuando esté demasiado mojado. Tales suelos se llaman pesados por sus cualidades de difícil laboreo, en contraste marcado con los livianos (suelos arenosos), de fácil laboreo. Sin embargo,

suelos de textura fina, si tienen una buena estructura, pueden poseer buenas características de drenaje y aireación (Rucks, *et al.* 2004).

Si bien, la textura es una de las propiedades más permanentes del suelo, puede sufrir cambios:

[...] por laboreo (mezcla de horizontes), erosión eólica (suelos más gruesos por pérdida de material), erosión hídrica (deposición de materiales más finos), etc. La permeabilidad, la consistencia, la capacidad de intercambio de iones, de retención hídrica, distribución de poros, infiltración y estructura, son algunas de las características del suelo que en gran medida dependen de la proporción de las distintas fracciones texturales que constituyen un determinado suelo. (Antonini, *et al.* 2008, p.9)

Entre las escalas de clasificación de texturas, la definida por el *United States Department of Agriculture* (escala americana) es expresada mediante un triángulo (Fig. 1). Las líneas paralelas a los lados en el triángulo fijan los límites porcentuales de cada componente (Arcilla, limo y arena).

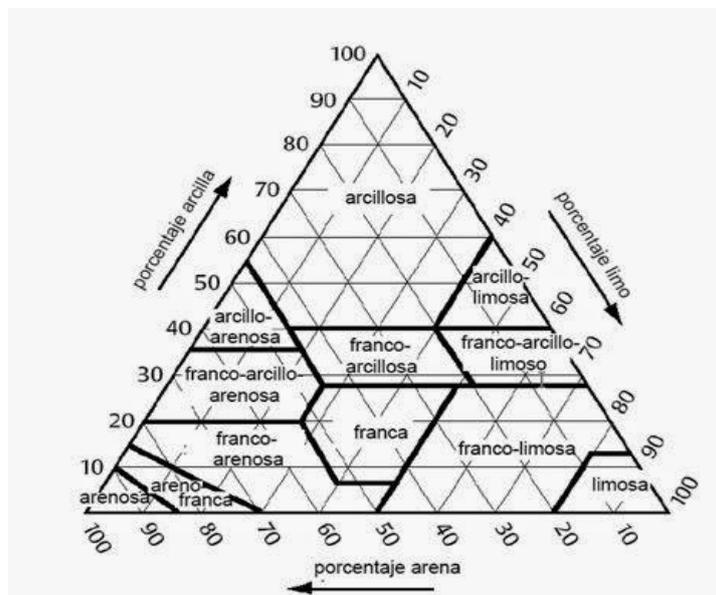


Figura 1: Triángulo de texturas del suelo. Muestra las 12 principales clases de texturas y las escalas de tamaño de partículas definidas por el United States Department of Agriculture, (USDA). Fuente: Copyright Palmer, 1980.

4.1.4. Estructura

La estructura se refiere a la presencia de agregados (terrones o agrupaciones arracimadas) de partículas de suelo (Strahler y Strahler, 1989, p.389). Esto es, se sustenta en la agregación de las partículas primarias de diferentes tamaños (arcilla, limo, arena y grava), como resultado del proceso que se inicia con la meteorización del material parental y continúa con la formación de unidades más grandes (agregados) por la acción de fuerzas vitales (plantas, animales, microorganismo) y físicas (estados y movimientos del agua). Por consiguiente, “la estructura es la relación entre tamaño, forma y disposición de los poros o espacios que separan las partículas y agregados” (Palma, 2000. p.135). Estos espacios son superficies naturales delgadas (hendiduras) que separan agregados contiguos.

La combinación de estos parámetros determina la estructuración y permiten definir criterios de descripción. La forma se relaciona con el tipo, modelo o patrón de los agregados (laminar, columnar, prismática, bloques angulares o subangulares); el tamaño determina la clase (muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa) y la resistencia es el grado de desarrollo que se relaciona con la estabilidad. Estos arreglos también incluyen el espacio poroso dentro de los agregados y entre los agregados que, de acuerdo con un tamaño y continuidad determinada, posibilitan el movimiento, la retención de agua y el intercambio gaseoso (Palma, 2000, pp.136-149).

La estructura es una de las propiedades del suelo que puede alterarse fácilmente, debido a las labores agrícola-ganaderas u otro tipo de perturbación. Los suelos resistentes a la erosión son suelos bien estructurados, porque ofrecen óptimas condiciones para la penetración y crecimiento de las raíces y permite el equilibrio entre el drenaje y la retención hídrica. Así también, la estabilidad de la estructura del suelo se refiere a la capacidad de los agregados para mantener su forma al estar sometidos a fuerzas externas, como el humedecimiento, el impacto de la gota de lluvia o el paso del agua. Se habla de suelos con estructuras estables, cuando estos cumplen con una estructura granular o migajosa, abundancia de poros grandes para la percolación del exceso de agua y una buena emergencia de las plántulas, sumado a un adecuado desarrollo radicular (Palma, 2000, pp.136-149).

4.1.5. Clasificación general de suelos

Mediante la clasificación se agrupan los caracteres más destacados de la morfología del suelo. La clasificación natural, permite agrupar los grandes tipos de suelos en función de su génesis y sus propiedades fundamentales, a la vez que proporciona a la cartografía un instrumento para la construcción de mapas a gran escala, sobre la base de una clasificación única, jerarquizada que comprenda todas las categorías (Berasategui, *et al.* 2000, p.353).

Dada la extensión conceptual respecto de los tipos, se explican someramente los arreglos en los que se agrupan mediante la definición de categorías superiores (Orden, Suborden, Gran Grupo) e inferiores (Subgrupo, Familia y Serie) propuestas por el Sistema Americano Soil Taxonomy. Se busca proporcionar una síntesis de la clasificación taxonómica sustentada principalmente por Jarsún, *et al.* (2006) en el informe “Recursos Naturales de la provincia de Córdoba - Los Suelos - Nivel de reconocimiento 1:500.000”. Según la taxonomía norteamericana, la clasificación se basa en propiedades que pueden obtenerse de observaciones *in situ*, o inferencias a partir de estas o de datos físicos y químicos de laboratorio.

Para la interpretación de las características diferenciadoras, en los niveles más altos de categorías se considera la población entera de suelos y se los ubica en alguno de los órdenes de suelo. Luego, dentro de cada orden se analiza la naturaleza de los suelos y se determina los subórdenes (Berasategui, *et al.* 2000). Por consiguiente, la categoría “Orden” agrupa según el tipo e intensidad de los procesos dominantes de formación y se divide en “Suborden”, según las propiedades que influyen en la génesis. Los Subórdenes a su vez, se dividen en “Grandes Grupos”, a partir de las similitudes en el tipo, disposición y grado de desarrollo de los horizontes genéticos. Cada Gran Grupo tiene “Subgrupos” típicos más otros que representan integrados (transición) o extragrados, referidos a alguna propiedad que no corresponde al Gran Grupo, ni tampoco indica transición (Jarsún, *et al.* 2006, p.55), tabla 2.

La categoría “Familia”, se establece dentro de los subgrupos, en función de las propiedades fisicoquímicas que afectan el manejo, como: tamaño de partícula, composición mineral, régimen de temperatura, la profundidad de la zona de enraizamiento la consistencia, la humedad equivalente, la pendiente y el agrietamiento. Por último, la serie se refiere a suelos con perfiles semejantes en color, estructura, reacción, consistencia, composición mineral, química y textura, aunque esta puede variar dentro de las series (Jarsún, *et al.* 2006, p.56), tabla 2.

Las descripciones del suelo a nivel de Subgrupo, también refiere al paisaje asociado, la posición del suelo, la vegetación y los materiales originarios; la distribución regional del suelo; y la enumeración de las Unidades Cartográficas que el suelo integra como dominante y subordinado. La simbología se define a través de dos letras mayúsculas iniciales que indican el Gran Grupo, seguida de dos letras minúsculas que refieren al Subgrupo. Esta nomenclatura se usa para denominar la Unidad Cartográfica donde el Subgrupo es dominante.

En el informe “Recursos Naturales de la provincia de Córdoba - Los Suelos - Nivel de reconocimiento 1:500000”, las Unidades Cartográficas constituyen las referencias base sobre las que se elaboró la cartografía de los tipos de suelo de la provincia de Córdoba. Estas son asociaciones geográficas de los Subgrupos y Familias. El relevamiento define los componentes taxonómicos de cada unidad cartográfica con una estimación porcentual del grado de participación de cada uno dentro del conjunto de la unidad para determinar la representatividad de los taxones en términos de superficie ocupada. Esto permite calcular el área ocupada por cada una de las diferentes clases de suelos reconocidas en el relevamiento (Jarsún, *et al.* 2006).

Las unidades cartográficas pueden estar compuestas por un sólo tipo de suelo, con escasas variaciones internas (consociación), o por mezclas geográficas de varios suelos en proporciones establecidas (complejos y asociaciones). En dicho informe, se explica cómo está compuesta la unidad cartográfica a partir de los componentes pedológicos, de los que se analiza: la posición del paisaje, nombre taxonómico del componente, porcentaje en que participa el total de la Unidad; clase de drenaje; profundidad efectiva; textura superficial y subsuperficial; salinidad y sodicidad; contenido de materia orgánica; capacidad de intercambio catiónico; índice de productividad del suelo individual, número de perfil representativo, y conjuntamente sus características técnicas (Jarsún, *et al.* 2006, p.169).

Tabla 2: Naturaleza de las características diferenciadoras de las categorías del sistema de los E.U.A

Categorías	Nº de taxas	Naturaleza de la característica diferenciadora
Orden	12	Procesos formadores de suelo indicados por la presencia o ausencia de horizontes diagnósticos mayores
Suborden	58	Homogeneidad genética. Subdivisión de órdenes de acuerdo con la presencia o ausencia de propiedades asociadas con la humedad, régimen de humedad del suelo y material madre.
Gran Grupo		Subdivisión de los subórdenes. De acuerdo con clase, ordenamiento y grado de expresión de horizontes, nivel de base, régimen de temperatura y humedad del suelo, presencia o ausencia de capas diagnósticas.
Subgrupo		Concepto central de taxón para los grandes grupos y propiedades indicando intergradaciones a otros grandes grupos, subórdenes y órdenes, extragradación a “no suelo”.
Familia		Propiedades importantes para el crecimiento de las plantas, amplias clases texturales de suelos promedios sobre la sección de control o solum, clases de temperatura del suelo (basada sobre temperatura media anual del suelo a 50 cm de profundidad).
Serie		Tipo y ordenamiento de horizontes, color, textura estructura, consistencias y reacción de los horizontes; propiedades químicas y mineralógicas de los horizontes.

Nota: Recuperado de Berasategui, *et al.* 2000.

4.2. Suelos - dinámicas

4.2.1. Formación del suelo

Luego de la descripción y clasificación de lo que podría definirse como características estáticas del suelo (de acuerdo con su aspecto), se analizan las relaciones dinámicas

involucradas en su formación, a través de las causas que le dieron lugar. Entre ellas, la meteorización es la causa principal que origina los procesos de formación del suelo. “El suelo se constituye como una capa dinámica, en el sentido que una gran cantidad de complejas reacciones fisicoquímicas se llevan a cabo en su interior” (Strahler y Strahler, 1989, p.386).

La meteorización es un proceso natural, que consiste en la combinación de destrucción y síntesis del material parental. Inicialmente ocasionado por las alteraciones físicas y luego por alteraciones químicas, como consecuencia de las interacciones con la atmósfera, hidrosfera y la biosfera. El material resultante se denomina regolita y sobre este se desarrollan los suelos (Giufré de López Camelo, 2000, p.107).

Estas alteraciones se producen por procesos mecánicos de desintegración denominados meteorización física, a través de la cual se disminuye el tamaño de la roca, sin afectar su composición. La desintegración puede ser por dilatación (descompresión), presión de cristales de hielo internos (gelifracción), diferencias de temperatura (termoclastia), cristalización de la sal (haloclastia), fuerza de gravedad, actividad biológica, etc. La meteorización química, modifica la naturaleza primitiva mediante la descomposición de la materia. Es un proceso acelerado por la presencia de agua, oxígeno y ácidos orgánicos e inorgánicos, que convierten los minerales primarios en secundarios.

4.2.2. Factores formadores del suelo

Considerando ambos mecanismos (desintegración y descomposición), resulta indispensable detenerse en los factores formadores del suelo, ya que de estos depende el estado actual del sustrato. Tales factores, se definen como agente, fuerza o condición que afecta o puede influir en un material original del suelo, con potencial para cambiarlo.

Los factores formadores, se discriminan en pasivos o agentes afectados por otros factores (la roca madre, el relieve, el tiempo) y activos o agentes modificadores que actúan sobre otros factores (el clima, la vegetación y las actividades humanas). Sobre la base de estos, se establece una secuencia de suelo (litosecuencia, climosecuencia, biosecuencia, toposecuencia, cronosecuencia) definidas por el factor que varía, mientras el resto permanece constante (Pascale, 2000). Dada la interacción de subfactores del clima (viento, temperatura y lluvia), surgen procesos que determinan propiedades para cada tipo de suelo, como las transformaciones, translocaciones, pérdidas y adiciones (Chinchilla, *et al.* 2011).

El clima es uno de los factores de formación más importante, porque permite caracterizar en forma global un conjunto de procesos de descomposición; siendo las precipitaciones y la temperatura los agentes que generan mayor efecto en los procesos de meteorización y descomposición. El agua precipitada que ingresa al suelo, a través de su movimiento determina la diferenciación de horizontes y ciertas propiedades de este. A medida que aumentan las precipitaciones, se produce un mayor lavado de sales solubles y poco solubles, siendo arrastradas a mayor profundidad y ocasionando un aumento de la acidez de los suelos. El contenido de arcilla aumenta e indirectamente por el aumento de la vegetación, hay un mayor aporte de materia orgánica y nitrógeno en los suelos (Pascale, 2000, p.119).

La vegetación actúa sobre la evolución de los suelos de cuatro modos diferentes: a) la disposición de los microclimas, diversos según sean formaciones arbóreas, (sectores de bosque donde predomina la sombra y la humedad) o herbáceas, donde la temperatura del suelo es mayor y menor la humedad; b) la profundidad de enraizamientos, que determina un mayor lavado de los elementos coloidales; c) la naturaleza del humus en relación a la velocidad de descomposición y mineralización de la vegetación; y d) la eficacia en la protección contra la erosión. Aunque, la vegetación herbácea con la masa radicular superficial incorpora abundante materia orgánica que favorece un horizonte húmico de mayor espesor que la de suelos con enraizamiento profundo, el bosque por el follaje protege mejor el suelo contra la erosión (Pascale 2000, pp.120-122).

La configuración superficial del terreno, al influir en la formación de los suelos determina su morfología. Esta incluye en su definición dos aspectos: a) la orientación del terreno que determina el grado de insolación, y b) la pendiente, cuyos parámetros constituyen los elementos principales del relieve (elevación). Cuando la infiltración y la permeabilidad del suelo son constantes, la cantidad de agua que drena depende del gradiente (ángulo de la pendiente) y, por consiguiente, el escurrimiento y la erosión del suelo serán proporcional a este. Otros parámetros son: la longitud, la disposición y la forma de la pendiente. En suelos con relieve plano, la superficie es estable y la meteorización da origen a perfiles profundos, el agua que cae percola y profundiza dentro (Pascale, 2000, p.123), pudiendo contribuir a la formación del suelo.

En un relieve de sierras existen tres posiciones: relieve residual (o erosional), relieve transposicional y relieve deposicional. La variación depende del transporte de material, las características hídricas y los microclimas. El transporte se produce por la gravedad y según sea la posición del suelo, será sometido a la erosión o a la acumulación. En las zonas inclinadas, el suelo no incorpora el total de agua que cae porque parte se pierde por escurrimiento, también está sometido a una intensa erosión, lo que da lugar a suelos esqueléticos. A media ladera, los suelos están sometidos a un continuo transporte de sólidos y soluciones, presentan pequeños espesores y cantos angulosos, propio de suelos coluviales. En la zona baja (piedemonte), recibe el agua superficial y subsuperficial que proviene de los suelos de media loma, se produce la deposición de los materiales arrastrados y se forman suelos acumulativos espesos y de texturas finas.

Según la zona geográfica, la pendiente influye en las propiedades del suelo: profundidad, espesor del horizonte húmico, contenido de materia orgánica, humedad relativa, diferenciación de los horizontes, entre otras. El grado de evolución del suelo y su posición en el paisaje genera una dependencia que se definen como toposecuencia, la cual representa una sucesión regular de suelos que varían de forma continua con la pendiente y se manifiesta en niveles de igual desarrollo para suelos situados en la misma posición topográfica.

Las actividades humanas y el tiempo tienen la capacidad de actuar como factores de formación. El hombre, controla los procesos evolutivos del suelo por el impacto de las acciones que ejerce, desde un sentido progresivo o regresivo/destructivo. La mayor intervención antrópica se produce a través de la agricultura y sus dinámicas asociadas. “Por influencia del trabajo del suelo a una profundidad constantes, los horizontes superiores se homogeneizan y el tipo de humus primitivo ya no es reconocible” (Pascale, 2000, p.127).

La regresión en la evolución no sólo puede producirse por la alteración del equilibrio natural ocasionado por la actividad agrícola, sino también por prácticas coyunturales como las alteraciones forestales, que en complemento desencadenan procesos erosivos. La alteración que afecta la salud y la vitalidad de los bosques se define según la Evaluación de los Recursos Forestales, como “fluctuación ambiental y evento destructivo que altera la salud del bosque, su estructura, y/o cambia los recursos o el ambiente físico en cualquier escala espacial o temporal” (FAO-FRA, 2005, p.12). Entre estas: los incendios, la degradación forestal y la deforestación sobresalen por la magnitud del daño que generan.

La alteración debida a un incendio, “es cualquier incendio imprevisto e incontrolado de tierras silvestres que, independientemente de su origen, puede requerir de una intervención para suprimirlo” (FAO-FRA, 2005). Mientras que la degradación forestal, involucra cambios llevados a cabo dentro del bosque, que afectan negativamente la estructura o función del sitio y disminuyen la capacidad de suministrar productos y/o servicios (FAO-FRA, 2005, p.28)

“El hombre ha sido el principal factor alterador del medio ambiente. [...] la mayoría de esas modificaciones están relacionadas con altas tasas de deforestación, contaminación de cauces hídricos, degradación de suelos, [...]” (Rojas e Ibarra, 2003). Los impactos acumulativos y en evolución de las interacciones históricas, sugiere que el suelo actual es parcialmente degradado por las prácticas agrícolas y la deforestación en el pasado (Norder, *et al.* 2017).

Teniendo en cuenta las alteraciones naturales producidas por las acciones antrópicas que actúan a modo de factor formador activo, se detalla a continuación las implicancias respecto de los cambios de cobertura vegetal y la práctica de la deforestación, como causa directa de la erosión del suelo.

4.3. Escenarios conceptuales en torno a la definición de cambio en cobertura vegetal y deforestación

Los cambios de la cobertura vegetal comenzaron a generar mayor impacto desde la década de los cincuenta. Entre estos, sobresale la pérdida de la mitad de la cobertura forestal mundial y la devastación o perturbación irreversible de los ecosistemas producto principalmente del incremento poblacional, aunado a las tasas de consumo (Mas; Velázquez y Couturier, 2009). Si bien, las dinámicas impulsoras de grandes cambios están estrictamente relacionadas con actividades extensivas, como el incremento en la ganadería con pastos cultivados y la agricultura mecanizada, también se reconocen prácticas puntuales aisladas propias de sistemas montañosos, que generan cambios localizados intensivos.

En estas zonas, pueden reconocerse varias causas de los cambios en la cobertura vegetal, algunos son el resultado de las características del suelo y su proceso evolutivo natural, mientras que otros antropogénicos, son los que más enfatizan esta situación. Según Álvarez del Castillo y Agredo Cardona (2013, p.37) se distinguen:

- Carencia de una planificación que integre los procesos político-administrativos y las particularidades ecosistémicas y ambientales del territorio.
- Migración o desplazamiento.
- Escasez de suelo urbanizable.
- Aumento de la población por fertilidad.
- Topografía con altas pendientes.
- Desarrollos urbanísticos espontáneos no planificados.
- Desarrollos urbanísticos en suelos no aptos.
- Deficiencia de control urbano estatal.
- Regímenes de lluvias, que superan los niveles pluviométricos normales.
- Actividades agrícolas y ganaderas en laderas.

Las políticas económicas, el aprovechamiento selectivo o minero, construcción de vías de comunicación y áreas productivas bajo diferentes usos que garantizan la función socio-económica de la tierra, constituyen otros elementos que se han ido incorporando, relacionando con el cambio de cobertura y que están ligados a la deforestación como práctica inicial.

La deforestación, es “la conversión de los bosques a otro tipo de uso de la tierra o la reducción de la cobertura de copa, a menos del límite del 10%” (FAO, 2001 citado en FAO-FRA, 2005, pp.26-27); por cuanto se entiende que el bosque es “la tierra que se extiende por más de 0,5 ha dotadas de árboles de una altura superior a 5 metros y una cobertura de copa superior al 10%, o de árboles capaces de alcanzar esta altura *in situ*” (FAO-FRA, 2005, p.16). Aunque, el bosque incluye áreas temporáneamente desprovistas, se espera su regeneración y están sujetas a la reforestación para alcanzar las condiciones antes mencionadas. La deforestación, implica la pérdida permanente de la cobertura de bosque, porque se trata de áreas en donde, por ejemplo, el impacto del disturbio, la sobreexplotación o el cambio de las condiciones ambientales, afectan el bosque de manera tal que este no puede albergar una cobertura de copa superior al umbral del 10%. Dicha pérdida puede ser causada y mantenida por inducción humana o perturbación natural (FAO-FRA, 2005).

En términos de aprovechamiento forestal, basado en prácticas que pueden incluir la tala de árboles, la deforestación puede responder a un manejo racional de los bosques si se realiza

bajo criterios de conservación. Por ejemplo, la tala sobre forestaciones implantadas para producir madera y otros productos, equivale a la cosecha de los cultivos como parte del manejo. Esta, si se produce correctamente no origina un impacto negativo; por ello, la deforestación no es en sí misma una actividad que genere problemas ambientales. Sin embargo, los criterios conservacionistas no se aplican y los bosques generalmente se talan en forma desmedida (Kopta, 1999), lo que se agrava si se trata de bosques nativos.

Aunque existen diferencias sustanciales, se habla de deforestación en varios términos: pérdida de bosque, fragmentación, conversión o degradación, según se trate de una visión amplia o estrecha. A partir de la primera, comprende no sólo la conversión del bosque a otros usos, sino también diferentes tipos de degradación que reducen la calidad del bosque en términos de densidad y estructura, servicios ecológicos, biomasa, diversidad de especies, entre otros. La versión estrecha de deforestación, se enfoca estrictamente en el cambio del uso de la tierra forestal y puede implicar una completa destrucción de la cobertura (Wunder, 2001 citado en Leguía Aliaga, *et al.* 2011).

La tala excesiva y el desmonte, constituyen las modalidades más drásticas de las alteraciones de la cobertura vegetal. Esto es, una situación de remoción completa de la cobertura forestal, que refleja una actividad no regulada, con fines y modos diversos sin asegurar su regeneración natural. La tala de árboles puede realizarse como "tala selectiva" sobre especies seleccionadas; o "tala rasa" sobre todos los ejemplares arbóreos de un bosque. Por otro lado, "desmontar" es eliminar el bosque o monte para dar otro uso al suelo (Kopta, 1999). Esta concepción, podría asociarse a la deforestación como la forma de cambio del uso de la tierra forestal a gran escala a partir del desmonte mecanizado (Wachholtz, *et al.* 2006 citado en Leguía Aliaga, *et al.* 2011)

El problema de la deforestación a través del tiempo, tiene que ver con la presión demográfica y el crecimiento de la demanda tanto del recurso forestal como del recurso suelo. El crecimiento de la población y sus efectos sobre la deforestación no son lineales ni directos, dependen de otros factores como: los derechos de los propietarios (en relación a tenencia de tierra con bosque y políticas de titulación que premian el desmonte); el uso de la tierra (en relación a la distribuciones espaciales y ambientales de las actividades económicas); los factores espaciales y la infraestructura vial (respecto de la ubicación y la existencia de caminos cerca al bosque); los factores ambientales (en términos de calidad); y la relación entre la morfología del terreno (planos o inclinados) y el costo de producción (Leguía Aliaga, *et al.* 2011. pp.10-13).

Las repercusiones ambientales están ligadas a la conversión de las tierras deforestadas en pastizales. Debido a la ausencia del follaje forestal y las estructuras de las raíces que protegían el suelo de los agentes erosivos, el pasto ofrece pocos nutrientes y escasa protección, lo que acelera la erosión.

El cambio en la cobertura [...] tiene serias implicaciones en el equilibrio general de los ecosistemas y dentro de una perspectiva ecopedológica, el suelo al ser un subsistema de los ecosistemas terrestres, también muestra impactos ante estos cambios, constituyéndose así, en uno de los subsistemas cuya estructura y funcionalidad son menos conocidas (Zapata, 2002 citado en Quichimbo, *et al.* 2015).

En estos términos, el daño ambiental ocasionado por la deforestación se torna irreversible. Si se consideran las consecuencias adversas de la deforestación, como pérdida de biodiversidad, reducción del suministro de madera, sedimentación e inundaciones (Angelsen y Kaimowitz, 2001 p.2), conviene abordar el problema desde las causas inmediatas que le dieron lugar, focalizando los parámetros de decisión de los agentes económicos y evidenciando el grado de afección del proceso. La cuantificación de las respuestas de un sistema socioecológico al cambio de uso de la tierra y la deforestación es importante para tomar decisiones informadas

sobre el equilibrio de las demandas humanas y funcionamiento del ecosistema (De Fries *et al.* 2004 citado en Norder, *et al.* 2017).

4.4. Erosión del suelo

“La erosión es un proceso que consiste en la pérdida de suelo fértil, debido a que los agentes naturales externos arrastran el material expuesto de la capa superficial de la tierra. Esta puede producirse por el agua, el viento, el hielo, o la gravedad. Por consiguiente, se habla de erosión hídrica, eólica, glaciaria y mecánica respectivamente. Dadas sus implicancias para análisis póstomos, entre todas se hace hincapié en la erosión hídrica, siendo el agua el agente erosivo interviniente en sus diversas condiciones, y los usos del suelo (preferentemente relacionados con las alteraciones forestales), su principal agravante.

Retomando la cuestión origen/fin en torno a la evolución del suelo, se reconocen 3 fases o mecanismos básicos: a) desprendimiento de las partículas; b) transporte de las partículas desprendidas; y c) depósito/sedimentación. La primera fase que se presenta es el desprendimiento de partículas (por acción de la gravedad reforzada por los agentes externos) o bien la rotura de los agregados del suelo por el impacto de la gota de lluvia (García Fayos, 2004). Como ya se mencionó, la meteorización es un proceso *in situ* que predispone el material para su posterior transporte sobre la superficie, cuando esto ocurre se produce la erosión del suelo. La segunda fase implica la movilización del material, el cual puede actuar a su vez como agente abrasivo. Mientras que en la etapa de depósito/sedimentación, partes de las partículas transportadas se acumulan como sedimento laminar donde comienza a disminuir la pendiente. El resto del material continúa en movimiento hasta depositarse en la base del valle por una disminución de la energía del escurrimiento, ya sea por disminución de la pendiente, presencia de obstáculos que reducen la velocidad, etc.

La erosión fluvial tiene lugar en el área de una cuenca hidrográfica³. La acción hídrica se inicia con el evento de precipitación; el agua que cae se infiltra penetrando en el perfil del suelo por medio de macroporos. La infiltración forma una capa delgada de saturación, cuyo equilibrio natural permite (según las condiciones del terreno) la escorrentía superficial del agua en exceso y corrientes subterráneas. La escorrentía superficial, es la proporción de agua precipitada que fluye por acción de la gravedad sobre la superficie del terreno. La capacidad de infiltración y la concentración del agua que escurre, dependen de la intensidad de la lluvia, la cobertura vegetal, la humedad natural, la morfología de la cuenca hidrográfica (área, forma y rugosidad superficial), pendiente y longitud de las laderas, textura del suelo, características de los suelos subsuperficiales, prácticas antrópicas, etc.

El proceso, se produce cuando el agua de escorrentía ejerce una fuerza de arrastre sobre la superficie del suelo, arrancando partículas de diversos tamaños. La velocidad de la corriente, la turbulencia, los caudales y la forma/rugosidad del canal, determinan la fuerza de arrastre que actúa; mientras que la resistencia del suelo a dicha fuerza viene dada por la estructura, las interacciones fisicoquímicas entre las partículas y el grado en que estas están unidas por las raíces de las plantas o mantenidas bajo un manto de hojas caída.

La erosión es un fenómeno natural que debe enmarcarse en la interfase entre la litosfera, la atmósfera y la biosfera, y cuya principal fuerza motriz es la gravedad. Sin embargo, el hombre ha agudizado voluntaria o involuntariamente los procesos erosivos a través del aprovechamiento secular de los recursos naturales (García Fayos, 2004, p.310).

³ Impronta sobre el terreno que dejan los flujos superficiales y subsuperficiales (infiltración del agua y desplazamientos en el interior del perfil, por medio de movimientos verticales y horizontales) en forma de corrientes tributarias, que moldean el terreno a través de quebradas y ríos. El área total que drena el agua hacia un río principal (identificado por su mayor caudal) o punto de salida, determina la cantidad de agua recogida por la cuenca, la cual está delimitada por la línea divisoria de aguas.

Bajo condiciones naturales estables, la erosión en climas húmedos es suficientemente lenta para que se forme y mantenga un suelo con distintos horizontes. Cuando las condiciones naturales son alteradas por las actividades humanas que modifican la cobertura vegetal y el estado físico del terreno, se genera un arrastre de suelo a un ritmo mucho mayor que el de formación, determinando un estado de **erosión acelerada**. Esto, se manifiesta a modo de “erosión por salpicadura”, “erosión laminar” y “erosión en surco” (Strahler y Strahler, 1989). En cualquier circunstancia el factor externo al suelo que más influye sobre la erosión es la pérdida total o considerable de la cobertura vegetal.

La erosión por salpicadura surge por el impacto de la gota de lluvia que golpea sobre el suelo, levanta las partículas y las deja caer en una nueva posición. “Se estima que una tormenta violenta puede llegar a cambiar de sitio unas 225 toneladas de suelo por hectárea” (Strahler y Strahler, 1989). Como consecuencia, las partículas removidas obstaculizan los poros afectando la dinámica hídrica y produciendo una disminución de la capacidad de infiltración del suelo. Inmediatamente, se produce un aumento de la escorrentía e intensificación de la remoción del suelo por “erosión laminar”. En sectores donde la pendiente es abrupta, gobierna la “erosión en surco”, caracterizada por la formación de innumerables acanaladuras en el suelo que posibilitan la aparición de barrancos, cuyas cabeceras se van desarrollando progresivamente vertiente arriba.

La erosión del suelo conlleva eminentemente a su degradación y esto reviste gran importancia, porque su regeneración es extremadamente lenta. En consecuencia, se producen numerosos acontecimientos negativos que desembocan en la pérdida del suelo como recurso natural no renovable, entre estos: la pérdida de materia orgánica, acidificación, salinización, compactación, desertificación, anegamiento, etc. Estos últimos, conciernen a la manifestación fenomenológica de todos los procesos en conjunto, bajo climas concretos.

El gesto desatinado de un ser humano, puede hacer desaparecer para siempre decenas de toneladas de suelo, de cada hectárea que éste utiliza. En pocos días, puede extinguirse el legado de miles de años, de paciente reciclado natural. [...] El uso actual que se le da a la tierra, es el tema ambiental que hoy reviste mayor gravedad y, a la vez, mejores posibilidades para la región, siendo sus principales consecuencias la erosión y pérdida de fertilidad, la desertificación, [...]. (Rojas e Ibarra, 2003)

4.5. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica

Los factores que llevan a la erosión del suelo son múltiples sin embargo destaca la eliminación de la cobertura vegetal que desencadena procesos de degradación. Dado que los diversos tipos de vegetación actúan protegiendo el suelo de diferentes maneras, su destrucción reduce la resistencia de la superficie frente a la erosión. En una vertiente con bosque denso, la fuerza de la escorrentía superficial es detenida por la presencia de hojas, ramas, raíces y troncos caídos que contienen el agua de forma aislada. En un suelo cubierto por formaciones herbáceas, los tallos de las plantas generan que el agua en movimiento disminuya con la fricción. “La destrucción de la vegetación, o los incendios forestales constituyen el comienzo de una serie de cambios drásticos. No existe interceptación de la lluvia por el follaje [...] En consecuencia, la lluvia cae directamente sobre el suelo”. (Strahler y Strahler, 1989, p.281).

Desde los años cuarenta, la estabilidad de los agregados constituye el parámetro ecológico a partir del cual se identifica la alteración de los ecosistemas y la actividad de los procesos erosivos (Imeson, 1984 citado en Belmonte, Delgado, López, 1999) en función de su relación con la capacidad de retención hídrica y la erodibilidad del suelo, esencial en la dinámica hidrológica (Cerdá Bolinches, 1998 citado en Belmonte, Delgado, López, 1999). Resulta importante destacar la interacción de reciprocidad entre la vegetación y la erosión hídrica del suelo.

La vegetación influye sobre la erosión aumentando la estabilidad de los agregados de suelo y su coherencia, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía. [...] La erosión influye sobre la vegetación directamente, mediante el desarraigo de las plantas y la eliminación y redistribución de las semillas. Pero también influye de manera indirecta, pues los procesos de erosión alteran o eliminan la superficie del suelo, que es donde se produce el establecimiento de las plántulas y donde reside gran parte de la reserva de agua y nutrientes. (García Fayos, 2004, p.314)

La relación entre la cobertura vegetal y la tasa de erosión hídrica se ajusta a una curva exponencial negativa (Gyssels *et al.* 2004, citado en García Fayos, 2004) que manifiesta la disminución de la erosión y la escorrentía con pequeños incrementos de la cobertura (Fig. 2). En la interacción existente entre la cobertura vegetal y la erosión del suelo, se reconoce la influencia determinante de la intensidad de las lluvias. El papel de la vegetación en el control de la erosión es mayor cuando es baja la intensidad (García Fayos, 2004, p.314).

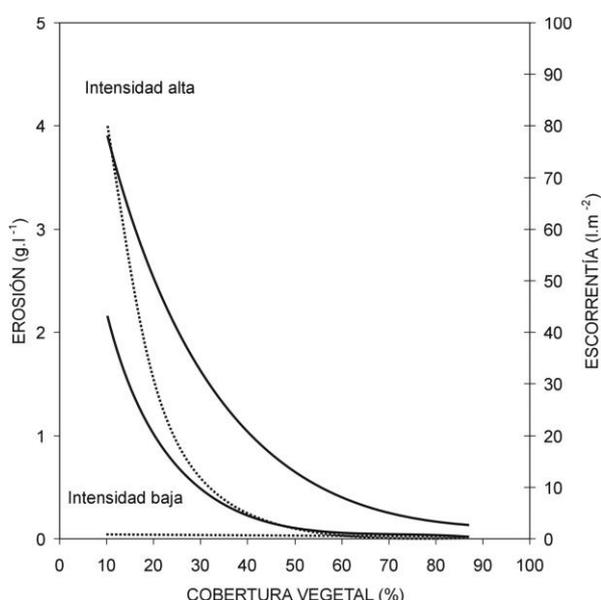


Figura 2: Relación entre la cobertura vegetal, la erosión (línea continua) y la escorrentía (línea discontinua). Los datos se obtuvieron en parcelas de erosión de 10 m² con matorral mediterráneo a partir de experimentos de simulación de lluvia con intensidad elevada (>100 mm.h⁻¹) y con intensidad baja (<25 mm.h⁻¹) (modificado a partir de Francis y Thornes 1990). García Fayos, 2004, p.315.

No obstante, es importante detenerse en los efectos de la erosión sobre la vegetación. Según la bibliografía de referencia, se observan efectos sobre la composición y diversidad de las especies a través del descalzamiento de las raíces y de la pérdida directa de plantas, propágulos y mantillo; también, sobre las características morfológicas y funcionales de las especies, las cuales tienen que hacer frente a problemas derivados de la escasez de agua y nutrientes, producto de la erosión (García Fayos, 2004, pp.322-324)

La reciprocidad de efectos, se ha tratado mediante modelos para dar cuenta de la evolución del paisaje en sistemas de sierras y los límites de alteración tanto de la cobertura vegetal como de la erosión.

4.6. Efectos de la pérdida del suelo por erosión hídrica sobre las poblaciones expuestas

Los efectos negativos basados en los procesos de degradación de suelos y en los cambios hidrológicos asociados, ya de por sí graves debido a la disminución de la capacidad productiva de las tierras, se tornan dramáticos al incrementar los riesgos y problemas de sequía (conducentes a procesos de desertificación) y demás desastres naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra, movimientos en masa y flujos de barro (Pla Senti, 2015). Los eventos naturales desencadenados por la erosión acelerada del suelo, acaparan mayormente la atención cuando corre peligro la seguridad social.

Los eventos de precipitación de gran intensidad están relacionados con las crecidas máximas de los caudales, debido a un aumento de la escorrentía superficial. La carga de sedimentos que llega a un curso de agua está dividida en sólidos suspendidos (se mueven en la columna de agua) y sedimentos de fondo, partículas que se mueven en contacto con el lecho del curso de agua (Rodríguez Osses, 2013). En total, el material transportado y los depósitos de lodo obstruyen los lechos de las corrientes y al llegar las lluvias intensas los ríos se desbordan e inundan tierras de labranza y ciudades, indiscriminadamente (Rojas e Ibarra, 2003, p.4). Entre los impactos pueden mencionarse: la destrucción de cultivos, daños en la infraestructura, colmatación, reducción de la capacidad de represas y embalses, etc.

Entretanto, las poblaciones expuestas por estar asentadas sobre el piedemonte sufren directamente las secuelas de la degradación del suelo. Cada año el deterioro del suelo es mayor, no sólo por las dimensiones crecientes de las áreas afectadas, sino también porque el ritmo del perjuicio se acelera. Estos son los signos más evidentes que en muchos casos impulsan a los gobiernos a reparar los daños ocurridos (reparación de caminos, puentes, dragados, etc.) y no a prevenirlos atacando causas del deterioro (FAO, 1994).

Por lo expuesto, resulta necesario atender estas dinámicas de un modo integrado para comprender los procesos que ocurren al interior de una cuenca durante eventos de precipitación intensa, y de esta manera la naturaleza de los problemas asociados a las crecidas de caudal con transporte de material. Conocer el estado de la erosión del suelo, aporta fundamentos concretos para la difusión de técnicas conservacionistas, que contribuyen a la prevención de la degradación. Esto, permitirá mejorar la calidad y salud del suelo e incrementar la producción agropecuaria, conducirá a evitar los daños y perjuicios por destrucción de la infraestructura, y disminuirá el impacto de las crecientes, a fin de mejorar la calidad de vida de las poblaciones expuestas.

4.7. Acerca de la aplicación del modelo RUSLE

Originalmente, la *Universal Soil Loss Equation* - USLE fue propuesta por Wischmeier y Smith en 1962 y publicado en 1978 en el manual 534 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (González del Tánago, 1991). Fue desarrollado para su uso en tierras de cultivo, permitiendo estimar la pérdida anual promedio de suelos desde una pendiente específica, estableciendo su longitud máxima tolerable para un sistema de cultivo determinado y bajo condiciones de uso/manejo específico. La agregación del concepto de “universal” proviene del hecho que los factores involucrados representan la influencia del clima, suelo, relieve y manejo (Vich y Mariani, 2010).

Se trata de una ecuación de regresión, cuyo uso es recomendado para (Ramírez, 2010):

- Predecir la pérdida media anual de suelos en una parcela concreta, con un uso y ordenación determinada.
- Servir de guía en la selección de las medidas de conservación de un terreno determinado.
- Estimar la reducción en las pérdidas del suelo que pueden obtenerse con distintas

alternativas de cultivo y/o manejo y definir cuál de las prácticas de conservación incluidas en el factor P es la más adecuada para el terreno.

La relación entre los factores que componen la ecuación se produce en la medida en que las precipitaciones son el agente activo principal de la erosión y directamente proporcional a la pérdida de suelo. La erosividad de la lluvia será diversa según las características del suelo sobre las que actúa, siendo estas las que determinarán la erosionabilidad. El suelo expuesto a las precipitaciones sufre intensidades de erosión distintas según la altura y la pendiente de la ladera en la que se encuentra. El relieve sumado a la cobertura vegetal y las prácticas de cultivo, son los factores modificadores de la acción erosiva de las lluvias sobre la vulnerabilidad del suelo, dando por resultado una tasa de erosión que puede evaluarse a través de la estimación del efecto de cada factor.

La aparición de nuevos campos de aplicación del modelo USLE, más allá de aquellos para los que fue desarrollado, reveló limitaciones ligadas a la solidez técnica y la falta de alternativas. A razón de estas, entre 1991 y 1997 se plantea una revisión centrada en la base de datos, en el análisis hidrológico y en los procesos de erosión no incluidos previamente. La metodología de la *Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE es el resultado de las actualizaciones realizadas por Renard *et al.* (1991). Se proponen métodos alternativos de estimación de cada uno de los factores de la ecuación, para solucionar principalmente los problemas de extensión del área, disponibilidad de datos y las formas irregulares del terreno.

A partir de una revisión crítica propuesta por González del Tánago (1991), quien destaca las ventajas e inconvenientes de la metodología USLE/RUSLE de acuerdo con la escala de trabajo, medios disponibles y grado de exactitud de los resultados obtenidos, se admite una explicación de las actualizaciones propuestas. La incorporación de la variabilidad del factor erosionabilidad a lo largo del año en función del contenido de humedad del suelo; la consideración de la longitud de la ladera como determinante de la formación de regueros; la cuantificación de la influencia de la biomasa del sistema radicular en la protección del suelo, etcétera, son ejemplos del avance que ha supuesto esta nueva versión RUSLE.

En la actualidad, son significativas las modificaciones respecto del factor topografía y cobertura, como las propuestas por Millward y Mersey (1999) a partir de la implementación del modelo RUSLE en sitios de topografía montañosa en México. Para el estudio de la erosión hídrica en zonas de sierras, se considera la existencia de amplias superficies con elevadas pendientes y la predominancia de una morfología que permite la rápida concentración del agua precipitada y el escaso desarrollo del drenaje. Estudios experimentales, donde la situación topográfica condiciona fuertemente las variables climáticas y los datos de estaciones son puntuales y escasos, demuestran el perfeccionamiento de metodologías que correlacionan las variables climáticas entre sí, con variables topográficas, de ubicación y cobertura del suelo (Belmonte y Núñez, 2006). Esto distingue las ventajas principales de la RUSLE para la estimación de la erosión laminar y en surco sobre superficie de cuenca donde sobresale el factor pendiente (Barrios y Quiñonez, 2000) y al requerir información más accesible que la USLE (Villanueva, Osinaga y Chávez, 2002 citado en Belmonte y Núñez, 2006).

Respecto del factor cobertura, nuevos enfoques de procesamiento en los que se utilizan conjuntos de datos disponibles y se examina la aplicabilidad del método en otras cuencas, destacan la importancia de este como el más influyente. Si bien, se reconoce la necesidad de complementar la información con estudios de campo y de laboratorio de algunos parámetros de entrada que obligan a recurrir a enfoques alternativos, la RUSLE aparece como modelo de erosión de suelo ampliamente utilizados en el mundo (Tanyas, Kolat y Sützen, 2015).

En Argentina, aunque existen estudios que dan cuenta de tasas de erosión aceptablemente predichas por el modelo RUSLE, tuvo mayor trascendencia el modelo USLE, implementado como tal aún en aquellos casos en los que se aborda una metodología alternativa. Los primeros trabajos que abordan el modelo mediante un enfoque alternativo, giran en torno al factor

erosividad para cuando no se dispone de la intensidad de la lluvia. Contrastando las técnicas originarias del modelo USLE propuestas por Rojas y Conde (1985) para el centro-este del país, con el Índice Modificado de Fournier y la precipitación media anual, se plantearon las ecuaciones de predicción del valor de R, que pueden ser usadas en aquellas localidades de la Argentina que carecen de datos pluviográficos (Maggi, 2002).

Dentro de los estudios actuales, son notorio los aportes de Gaitán (2017) o sólo por la extensión territorial, sino también por la adaptación estandarizada de este a fin de estimar y cartografiar la erosión hídrica actual y potencial de los suelos a nivel nacional. Si bien se basan en la aplicación de la USLE, reconocen las limitaciones por la falta de datos para aplicar la metodología original a escala nacional; por lo que para calcular los factores que intervienen en la ecuación se han realizado diferentes aproximaciones, principalmente el factor de erosividad, que se estimó a partir de la precipitación media anual. A pesar de las limitaciones, consideran que los mapas de erosión hídrica actual y potencial reflejan adecuadamente y en forma cualitativa, las zonas con mayores y menores riesgos de erosión.

Por su parte, Delgado (2018) presenta una de las aplicaciones más recientes del modelo USLE, con el que analiza la pérdida de suelo como resultado de las interacciones entre los atributos del paisaje natural y las actividades humanas en la cuenca serrana del arroyo Belisario, en las sierras de Ventania, para 1966 y 2016.

Aunque el modelo inicial USLE, ha sido criticado por sus carencias y por la falta de ajuste de las predicciones fuera de las condiciones climáticas particulares en las que fue desarrollado el modelo, incluso cuando se considera un periodo largo de tiempo, su revisión y mejoramiento ha proporcionado el marco conceptual en el que más frecuentemente se ha estudiado el papel de la vegetación en la erosión y su relación con el resto de los factores que la desencadenan (García Fayos, 2004, p.313).

4.8. Aportes desde la teledetección espacial

Desde el punto de vista técnico-aplicativo, el estudio de la erosión del suelo requiere del conocimiento de una serie de condiciones físico-ambientales, que al estudiarlas de un modo directo mediante observaciones *in situ* no sólo implica inversiones de tiempo, sino limita el dominio sobre el área de trabajo, en términos de extensión temporo-espacial. El modelo RUSLE y las numerosas alternativas de aplicación basadas en actualizaciones constantes, facilita en gran medida un trabajo indirecto/*ex situ*, factible de adaptación a diversas condiciones geográficas y extensiones territoriales, consiguiendo actualizar la información de manera automática. Desde este enfoque, la teledetección espacial brinda tanto el material de estudio, como las técnicas, métodos y herramientas para encarar trabajos de esta índole.

Definida como una técnica de carácter multidisciplinario que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, mediando un mecanismo de transporte de energía electromagnética, natural o artificial (Hernández y García, 2014 citado en Corrales Andino y Ochoa López, 2017), la teledetección resulta de gran utilidad para el seguimiento de problemas de erosión del suelo, especialmente desde que se lanzaron los satélites aplicados a estudios de recursos naturales.

Entre las ventajas de la teledetección, aparte del valor práctico y la multiplicidad de aplicaciones, se distinguen: a) la cobertura global, sinóptica y la perspectiva panorámica y multiescala, que posibilita una visión amplia e integral de los hechos geográficos, especialmente cuando se trata de zonas remotas, de difícil acceso o de grandes espacios; b) la capacidad de actualización y frecuencia para proporcionar datos de forma continua; y c) la homogeneidad y precisión de estos datos, registrados por un mismo instrumento y que posibilitan una representación precisa, objetiva e imparcial de la superficie terrestre (Gómez, 2014).

Las imágenes satelitales de diferentes sensores, caracterizados según la resolución

espectral, radiométrica, espacial y temporal permiten analizar los problemas de la erosión del suelo desde distintos enfoques, con el fin de aportar a un rápido desarrollo de planes de actuación para minimizar el impacto (Pérez González y García Rodríguez, 2013). Dichas características, son las que deben considerarse al momento de seleccionar las imágenes satelitales para un determinado estudio. Si bien, cuando se trata de hacer un seguimiento continuado de los distintos procesos que afectan al suelo (erosión, áreas afectadas por incendios, deforestación, regeneración de la vegetación, cambios de uso, etc.) los sistemas con alta resolución temporal y espacial son los más adecuados (Pérez González y García Rodríguez, 2013), debe considerarse: la escala geográfica de trabajo, la disponibilidad y el acceso a la información. Dada su disponibilidad y accesibilidad inmediata, las imágenes satelitales provistas por los satélites de la constelación Landsat (desarrollados por la NASA) y los de Sentinel 2 (desarrollados por la ESA), constituyen una adecuada fuente de información para estudios tanto locales que requieren mayor grado de detalles, como regionales y de gran extensión.

Capítulo 2

5. Posición y situación geográfica

Se aplica el modelo RUSLE en el área de la cuenca del arroyo Saldán. Denominación adoptada desde el Centro de la Región Semiárida perteneciente al Instituto Nacional del Agua (INA - CIRSA). Con una superficie aproximada de 21.300 hectáreas (213 km²) y delimitada por las dimensiones de esta cuenca, el área de estudio se posiciona en el cuadrante de los 31°07', 31°19' de latitud Sur y 64°15', 64°25' de longitud Oeste. La cuenca se emplaza con orientación meridiana, sobre la ladera oriental del cordón de Sierras Chicas, ambiente morfológico ubicado en el borde sudoriental de las Sierras Pampeanas (Fig. 3).

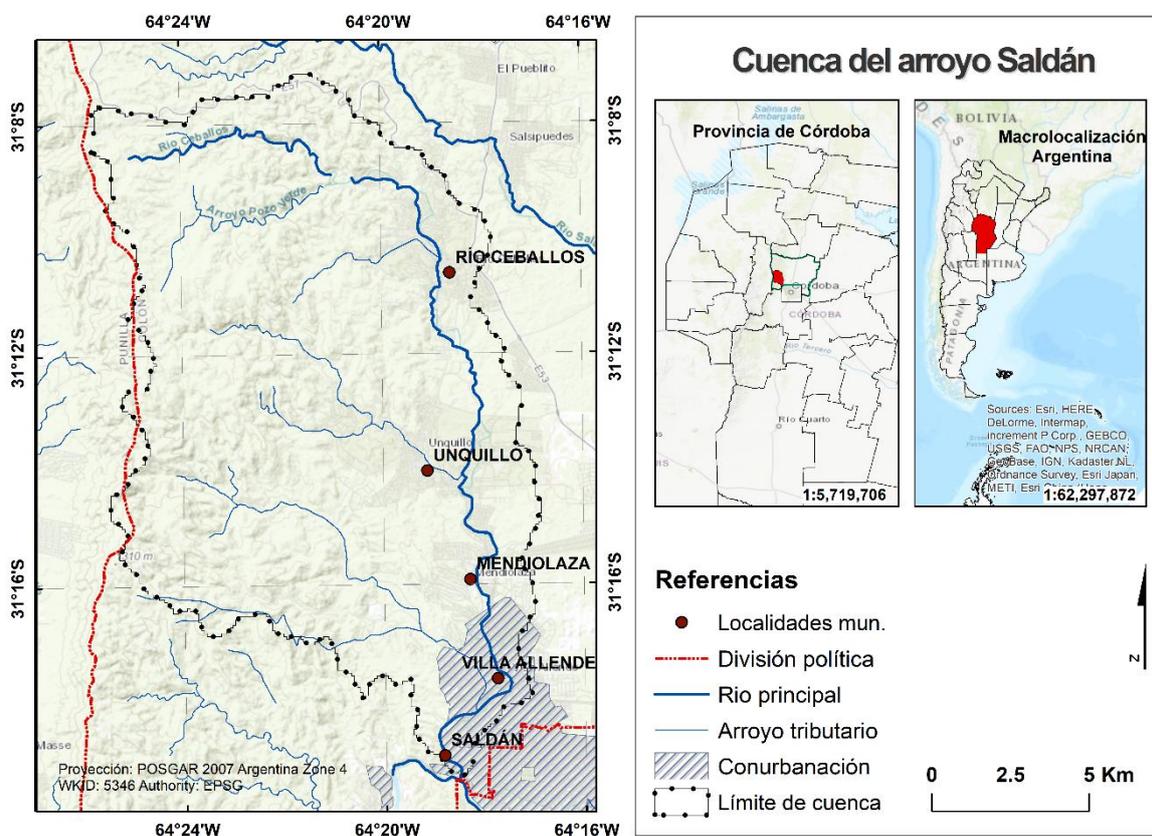


Figura 3: Delimitaciones del área de la cuenca del arroyo Saldán. Fuente: Elaboración sobre la base del material proporcionado por el IG – CONAE.

Políticamente, la cuenca del arroyo Saldán se sitúa en las pedanías Río Ceballos y Calera Norte, subdivisión sudoeste del departamento Colón, al noroeste de la ciudad capital, provincia de Córdoba, República Argentina. De norte a sur, atraviesa las localidades de: Villa Colachanga, Los Altos, Río Ceballos (municipal), Villa Ñu Pora, Los Quebrachitos, Cabana, Pajas Blancas, Unquillo (municipal), Lomas de San José, Mendiolaza (municipal), Villa Allende (municipal), Saldan (municipal), y Rivera Indarte. Todas situadas al este del área, próximas al río principal.

6. Geografía del área de estudio

Las condiciones descritas corresponden al área de estudio y al contexto de sierras más próximo, no siempre representan características estrictamente locales.

6.1. Descripción físico-natural

La cuenca del arroyo Saldán, se encuentra dentro de la zona de predominancia del **clima** tipo Cwb (clima templado, con invierno seco y verano templado) según la tabla de simbología de la clasificación de Köppen-Geiger actualizada (Peel, *et al.* 2007). Es una zona templada, de precipitaciones estivales, la primavera y el verano concentran más del 80% de las lluvias anuales, mientras que en la mayoría de los meses de otoño y durante el invierno son escasas. La orientación orográfica facilita el desplazamiento de las masas de aire en el sentido predominante, posibilitando un régimen pluviométrico de estilo monzónico (Jarsún, *et al.* 2006).

La región de Sierras Chicas no posee registros meteorológicos suficientes para caracterizar su gran variedad climática. Sin embargo, algunos estudios dan cuenta de un gradiente de disminución de las precipitaciones hacia el Oeste y un aumento correlativo de la evapotranspiración (Abril, *et al.* 2003, p.33). La región ha sido clasificada dentro del dominio semiseco con tendencia a semihúmedo. En la cuenca baja los promedios anuales fluctúan entre 500 mm y 700 mm y en alta, entre 700 mm y 1.100 mm (Barbeito, *et al.* 2016). Las temperaturas medias anuales varían entre los 14°C y los 17°C, las máximas medias anuales fluctúan entre 20°C y 25°C, mientras que las mínimas medias anuales lo hacen entre 9°C y 10°C (Capitanelli 1979, citado en Formica, *et al.* 2015, p.330).

El relieve está constituido por sierras de baja altura, entre 750 msnm y hasta 1.350 en los puntos más altos. Fisiográficamente, el complejo posee cumbres redondeadas, quebradas y valles rodeados por numerosos arroyos. Se caracteriza por pendiente pronunciadas hacia el oeste y por un gradiente suave y meteorización profunda (proceso agravado por la presencia de planos de esquistosidad sub-verticales que favorecen la alteración y edificación de la roca madre) en las laderas del este, donde se localiza el área de estudio (Gavier Pizarro, *et al.* 2003). El cordón de las Sierras Chicas está orientado de norte a sur, comienza con la Sierra de Masa y termina con la Sierra de Las Peñas. Hacia el oeste está limitado por los valles de Punilla y Calamuchita; al este por un piedemonte con parcial cubierta fluvio eólica y la depresión periférica (Jarsún, *et al.* 2006, p. 51). Forma un complejo metamórfico y sedimentario.

En el área de la cuenca del arroyo Saldán, pueden identificarse dos geomorfologías bien definidas, hacia el oeste el sector montañoso caracterizado por la presencia de relieves irregulares con pendientes más abruptas; mientras que hacia el este domina el paisaje denominado piedemonte oriental que constituye una faja de transición entre el ambiente serrano y la llanura.

En el sector montañoso, se distingue: un tipo de relieve de montaña de accidentado a fuerte con pendientes que oscilan entre los 12 y 35° (a); relieves muy fuertes de disección fluvial, con pendientes mayores a los 35°, correspondientes a las quebradas favorecidas por el fallamiento o fracturación (b); y de forma localizada en el sector oriental bajo de la pendiente estructural, hacia el sur de la cuenca y al oeste de las localidades de Villa Allende, Mendiolaza y sur de Unquillo, un tipo de relieve accidentado en rocas sedimentarias clásticas referido a los conglomerados y areniscas conglomerádicas (c). También se distinguen relieves de valles fluviales principales con fuerte control por fallas y fracturas, que corresponde mayormente al labrado por el Río Ceballos-Saldán, el cual se dispone principalmente en dirección norte-sur y se ubica altitudinalmente a 770 msnm; y valles secundarios (coluvio-aluviales) de menor desarrollo en la montaña, formados por la acción erosiva fluvial en cauces de carácter temporario y colectores de menor orden en la red de drenaje (Barbeito, *et al.* 2016).

De acuerdo a la geología del área, la secuencia sedimentaria de la ladera oriental de la Sierras Chicas está conformada por sedimentitas continentales, compuestas por conglomerados polimícticos, brechas de matriz arenosa, areniscas, limolitas y pelitas subordinadas, de típico ambiente continental árido (Formación Saldán). Hacia el norte (sector norte del río Ceballos), predominan las rocas sedimentarias del Cretácico, areniscas y conglomerados denominados Fonglomerado Valle del Sol, asignados al Cretácico tardío - Paleoceno (Gordillo y Lencinas 1979 citado en Formica, *et al.* 2015, p.330). Hacia el Sur, una porción de las Sierras Chicas está constituida por afloramientos volcánicos de formas tabulares con suelos someros (Abril, *et al.* 2003).

Las variaciones edafológicas, se distinguen respecto del sector de la ladera donde se ubican. Con excepciones en las pampas de altura, en algunos valles y laderas bajas, los suelos de las sierras están afectados por afloramientos de roca y piedras en superficie, que imposibilitan o limitan el desarrollo agrícola, generalmente no son aptos para labrado. Sobre el área norte de la cuenca, la alta dinámica del paisaje produce suelos jóvenes de escaso desarrollo pertenecientes al Orden taxonómico de los Entisoles entre los cuales, suelos del Gran Grupo *Ustorthent* (Jarsún, Gorgas y Zamora, 2003, citado en Barbeito *et al.* 2016) subgrupo lítico paralítico (textura esquelética franco-arenosa), constituyen la gran mayoría (Abril, *et al.* 2003, p.34).

Se asocian a los microclimas subhúmedos de naturaleza orogénica, suelos Udoles serranos, del Gran Grupo *Hapludol*, subgrupo lítico paralítico (textura franca-fina, mixta y térmica). En algunos sectores de pendiente media a baja, y en menor medida suelos Ustoles *Haplustol* entico (textura limosa-gruesa, mixta, térmica). En el piedemonte los materiales originarios son de texturas muy variadas, desde esqueléticas-gruesas en las partes apicales de los abanicos y en los cerrillos, hasta franco-limosas y arcillo-limosas en el loess y derrames finos.

La capa freática es profunda y no afecta al perfil de los suelos, pero los procesos de erosión hídrica son intensos. En sectores donde la cubierta de material residual (Apéndice 1) es de escaso espesor (aunque con abundante arcilla que favorece el desarrollo de cobertura vegetal), las partículas finas son lavadas por efecto de la escorrentía. De esta manera, quedan expuestos los componentes más gruesos (principalmente arena y grava), se produce un aumento de la pedregosidad del suelo y disminuye la infiltración, lo que incrementa la acción de la erosión y del escurrimiento superficial (Barbeito, *et al.* 2016).

En el sector oriental de la cuenca, desde la localidad de Río Ceballos y hacia el sur, se desarrolla el piedemonte oriental en transición con los depósitos eólicos de la llanura loéssica. La profundidad del suelo supera los 100 cm y la textura es franco-arenosa altamente susceptibles a la erosión hídrica (Barbeito, *et al.* 2016). En la Tabla 3 se observa la superficie (ha) de la pedanía Río Ceballos ocupada por las distintas clases de erosión hídrica.

La red de drenaje bien definida muestra un marcado control estructural en toda la región de Sierras Chicas. En la cuenca del arroyo Saldán, el río Ceballos es el principal (suele denominarse cuenca de Ceballos -Saldán). Este nace a 750 msnm desde el embalse La Quebrada, presa artificial formada a partir de las confluencias entre los arroyos Los Hornillos y Colanchanga, sus principales afluentes. El río Ceballos, atraviesa la ciudad homónima donde cambia su dirección hacia el sur, recibiendo sus principales afluentes desde el oeste: los arroyos Cabana (centro de la cuenca) y La Reducción (sur). Finalmente, con el nombre de río Saldán, desagua en el río Suquía (Formica, *et al.* 2015, p.330), perteneciente a la cuenca tributaria inferior del río Primero que abarca unos 1.350 km² y derrama sus aguas hacia la depresión de Mar Chiquita al Noroeste de la provincia (Recalde, 2014 *coord.* p.14).

Tabla 3: Superficie (ha) según las clases erosión hídrica y susceptibilidad a la erosión hídrica. Pedanía Río Ceballos

Clases	No	Ligera	Moderada	Grave/Alta
Erosión Hídrica	15.000	15.000	3.000	
Susceptibilidad a la erosión hídrica	2.000	2.000	15.000	14.000

Nota. Fuente: Jarsún, *et al.* 2006, p.96. Agencia Córdoba Ambiente S.E. - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi. Córdoba. 2006

Según las características hidrológicas, estos ríos están comprendidos dentro de la descripción propuesta para la región de las Sierras del Sur, en el informe “Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba”. Presentan un régimen turbulento en las zonas más altas, esto da lugar a lechos rocosos, erosivos, con saltos, rápidos y ollas. En algunos sectores de menor relieve, tienen un lecho areno - gravoso y algunos niveles de terrazas. El ambiente está sometido a una alta dinámica hidrológica, producto de crecientes cortas e intensas, lo que caracteriza un régimen de tipo torrencial. Los caudales pico en épocas de lluvia, suman gran cantidad de sedimentos de granulometría variada, producto de los procesos de erosión hídrica y remoción en masa (Abril, *et al.* 2003, p.35).

La cuenca del arroyo Saldán forma parte de Región geográfica del Gran Chaco, ubicada en Sudamérica. Se extiende por centro y sur de Brasil, parte de los territorios de Paraguay, Norte Grande de Argentina y Bolivia. Por consiguiente, la cobertura vegetal está condicionada por la región fitogeográfica del Distrito Chaqueño Serrano (Cabrera 1976, citado en Abril, *et al.* 2003, p.37). En esta, se distinguen tres pisos altitudinales de vegetación (Fig. 4) constituidos por bosques serranos, arbustales (matorrales) y pastizales de altura (Luti *et al.*, 1979; Estrabou, 1983; Cabido y Zak, 1999 citado en Gavier Pizarro, *et al.* 2003, p.53). En la zona pedemontana aparecen ejemplares⁴ de *Ceratonia siliqua* (algarrobo), *Celtis tala* (tala), *Vachellia caven* (espinillo), *Vachellia aroma* (tusca) y *Aspidosperma quebracho-blanco* (quebracho blanco).

Entre 500 y 1100 msnm, en la ladera oriental se desarrolla el bosque serrano, mixto (caducifolio/perenne y nativo/exótico), denso y puro en los faldeos húmedos y frescos y en los valles de arroyos serranos, mientras que es ralo en los sitios desfavorables y expuestos. El estrato se compone principalmente de comunidades de bosques secundarios y arbustales de sustitución, alternando con pastizales. Son representados por: *Lithraea molleoides* (molle de beber) en forma de bosque denso y húmedo, *Zanthoxylum coco* (coco), *Celtis ehrenbergiana* (tala), *Vachellia caven* (espinillo), *Croton lachnostachyus* (crotón), *Cestrum parqui* (duraznillo), *Sida rhombifolia* (afata), *Stipa pseudoichu* (paja brava), *Potentilla indica* (frutilla del monte) (Gavier Pizarro, *et al.* 2003, p.54). Así también se identifican: *Schinopsis marginata* (Horco quebracho) de laderas secas, cálidas, a veces pronunciadas y rocosas, con orientación noroeste preferentemente, donde forma bosques casi puros; nuevamente aparece el *Vachellia caven* (espinillo), *Celtis tala* (tala), junto con el *Caesalpinia gilliesii* (lagaña de perro), *Dolichandra cynanchoides* (sacha huasca), *Jodina rhombifolia* (sombra de toro), *Aloysia gratissima* (palo amarillo), *Passiflora caerulea* (pasionaria), *Ruprechtia apetala* (manzano del campo), entre otros que aparecen en forma de manchones en la estepa.

Con la altura, el bosque se confunde con el matorral serrano *Margyricarpus pinnatus* (romerillal), formado principalmente por el *Baccharis aliena* (romerillo), y otros arbustos y árboles bajos y espinosos como *Parkinsonia praecox* (brea), *Geoffroea decorticans* (chañar), especies del género *Larrea* (jarilla), *Vachellia caven* (espinillo), *Vachellia aroma* (tusca), entre otras especies espinosas del género *Acacia*.

A partir de los 1000 msnm en adelante, comienza a aparecer el estrato herbáceo como los

⁴ Las especies vegetales fueron denominadas a partir de sus nombres científicos actualizados. Los cuales fueron corroborados según el índice global de especies *Catalogue of Life: 2019 Annual Checklist* que se compone de una única lista de verificación de especies integrada, presentando el último escrutinio taxonómico de cada una.

pastizales y bosquecillos de altura en forma discontinua y en algunos sectores de las sierras matorrales (llamados localmente “romerillales”) que forman cinturones de vegetación discontinuos. La fisonomía se completa con una gran riqueza de herbáceas nativas de interesante floración que se desarrollan en el sotobosque en primavera y verano. Las especies más frecuentes son: *Festuca hieronymi* (festuca), *Nassella tenuissima* (paja fina), *Nassella trichotoma* (flechilla tendida), especies del género *Sida.*, *Paspalum dilatatum* (pasto miel) entre otros helechos, dicotiledóneas herbáceas y gramíneas.

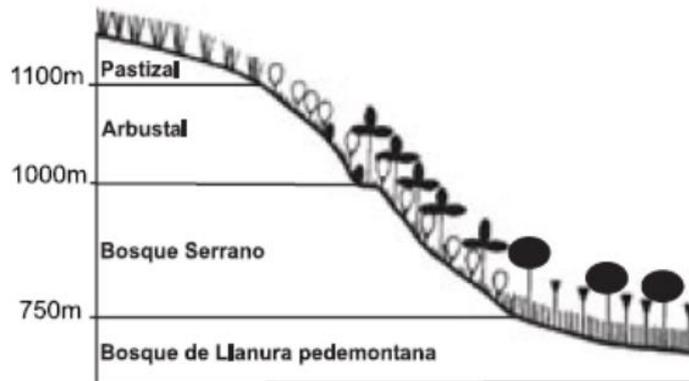


Figura 4: Perfil de la distribución altitudinal de la vegetación nativa en la Sierras Chicas. Copyright Kurtz (1904), Luti *et al.* (1979), Estrabou (1983) y Cabido y Zak (1991) citado en Gavier Pizarro y Bucher, 2004.

En la región se distingue el predominio de cuatro comunidades forestales: espinillales, quebrachales, blanquillales y horcales. Los espinillales son originadas posiblemente por la influencia de incendios ya que las especies tienen gran capacidad de rebrote post fuego. Los quebrachales se ubican en zonas bajas e intermedias, hasta los 570 msnm. La comunidad está representada por una muy pequeña porción de los bosques densos, como parches remanentes de los procesos de deforestación. Los blanquillales, se desarrollan sobre cursos permanentes o temporarios de agua. Esta especie se asocia a otras especies exóticas. Los horcales se disponen a barlovento, sobre laderas rocosas de pendientes superiores al 20%. Se encuentran individuos de gran porte.

La distribución de la vegetación según el tipo de relieve y altitud, también permite establecer distinciones en su formación. Así, en los relieves accidentados predomina monte serrano (hasta los 1.200 msnm) con elementos arbustivos y pastizales; en las quebradas y el relieve accidentado en rocas sedimentarias clásticas el monte serrano denso, con predominio del romerillal donde el sustrato se torna rocoso. Mientras que en los valles la vegetación es del tipo de bosque serrano denso y arbustales, con menor presencia de pastizales, predominan especies alóctonas por deterioro importante en la cubierta vegetal nativa (Barbeito, *et al.* 2016).

Respecto de las especies implantadas, son de destacar las especies invasoras. Bosques monoespecíficos de *Ulmus minor* (olmo), *Gleditsia triacanthos* (acacia negra), *Melia azedarach* (paraíso), *Morus alba* (mora) y *Ligustrum lucidum* (siempreverde) que hoy son parte del paisaje natural (Zupan, 2018). Esta última, es la exótica que más se extiende en el área de Sierras Chicas (1000 ha de bosque), asociada principalmente con el bosque serrano desmontado y con urbanizaciones (Gavier Pizarro y Bucher, 2004). La especie se introdujo alrededor de 1900 como planta ornamental (Rio y Achával, 1904 citado en Gavier Pizarro, *et al.*, 2012) y actualmente forman rodales densos que eliminan la mayoría de la vegetación nativa (Gavier Pizarro, *et al.*, 2012). En los suelos más profundos, generalmente en valles o bajos, se encuentran diversos clones de *Populus sp* (Álamos) y *Salix sp* (Sauces), principalmente aquellos con brotación tardía, que les permite escapar a los daños de las heladas tardías. Otras

latifoliadas han demostrado buen comportamiento en estos suelos, como las *Quercus sp* (robles), *Fraxinus sp* (fresnos), *Juglans sp* (nogales), etc. (Giorgis *et al.*, 2005; Hoyos *et al.*, Cabido, *et al.* 2010 citado en Zupan, 2018).

6.2. Descripción socio-territorial

Según datos del Ministerio de Desarrollo Social de la Provincia de Córdoba, en el Departamento Colón viven 208.244 personas, que representan el 6,4% de la población total de la provincia de Córdoba. La localidad del Dpto. Colón con mayor cantidad de habitantes es Jesús María, seguida por la localidad de La Calera (Recalde, *coord.* 2014, p.16). Las ciudades que se emplazan en la cuenca del arroyo Saldán, se localizan en los sectores pedemontanos. De acuerdo con su ubicación respecto de la ciudad capital y las condiciones climáticas y paisajísticas, se consideran localidades satélites de función predominantemente turística. Pertenecen a la conurbación del Gran Córdoba (formación edilicia continua de los departamentos limítrofes a la capital y pequeñas localidades que fueron formándose alrededor de la RN N° 9), comportándose como ciudades dormitorio de la Capital, por su cercanía.

De norte a sur, sobresalen como municipios: la localidad de Río Ceballos, localizada a 35 km de la capital provincial. Constituye la segunda ciudad de mayor desarrollo urbano, debido al turismo y la construcción de casas de fin de semana y barrios privados. Continua Unquillo, se ubica a 24 km de la ciudad capital. La localidad de Mendiolaza se ubica a 23 km al noroeste de la capital. Se considera ciudad a partir de 2012, dado que alcanzó los 10.855 habitantes en 2010, posee un crecimiento demográfico exponencial desde los años noventa, por la radicación de numerosos barrios cerrados. Saldán se sitúa a 18 km de la ciudad capital, y tres cuartas partes de su territorio y sus habitantes se asientan sobre el sector que pertenece al departamento Capital, siendo la localidad cordobesa que más ha crecido en la década. Villa Allende se encuentra a 19 km del centro de la capital, representa casi el 13% de la población total del Departamento Colón.

La Ruta Provincial N° E-53, es la principal conexión con la Ciudad de Córdoba. Fue transformada en autovía durante el 2011, uniendo la ciudad capital con las localidades de Salsipuedes y Río Ceballos, e incluyendo la conexión con el Valle de Punilla mediante el acceso al Camino del Cuadrado (sector norte de la cuenca del arroyo Saldán). El tránsito del corredor está determinado por el turismo con alta participación metropolitana y el impacto generado por el desarrollo de urbanizaciones en las localidades de Villa Allende, Unquillo y Mendiolaza, conectadas a través de la Av. Luchesse y Ruta Provincial E-57. De acuerdo con datos de la estación de peaje, la ruta presenta un Tránsito Medio Diario Anual del orden de los 26.000 vehículos (Bracamonte y Maldonado, 2013, citado en Recalde, 2014 *coord.* p.17).

La región ha sufrido el mayor crecimiento demográfico de la provincia de Córdoba en las últimas décadas. A su vez, registra un aumento temporal de la población durante la estación estival, como consecuencia de una importante actividad turística (Formica, *et al.* 2015, p.330). La economía del sector incluye la explotación minera puntual a través de canteras, y sus terrenos han dado sustento a actividades ganaderas, agrícolas (incipiente) y forestal maderable. En la actualidad persiste la actividad vitivinícola, así como industrias familiares o artesanales; pesca de río y de lago. Desde fines del siglo XIX la principal actividad económica es el turismo, bien dotada de una infraestructura que incluye hoteles, hosterías, albergues, etc. Según el Decreto 552-86 (artículo 12), el Área Turística Sierra Chica comprende entre otras, todas las localidades municipales mencionadas (Recalde, 2014 *coord.* p.3).

Las dinámicas socio-territoriales en la región se intensificaron durante los años veinte y treinta, con el loteo de nuevos barrios (Ñu Pora y La Quebrada en Río Ceballos) alrededor de los principales centros urbanos, sostenidos por la actividad ganadera de supervivencia (cría de vacas, cabras) y producción de cultivos, lo que incrementó la intervención humana. Durante este periodo se abrió la ruta entre Río Ceballos y Córdoba (Ruta E-57) y comenzó a

desarrollarse la red vial, que facilitó el acceso a las áreas boscosas y en consecuencia la explotación forestal se intensificó rápidamente (Gavier Pizarro y Bucher, 2004, p.8).

En la época de auge de los hornos de cal (ciudad de Unquillo a principios del siglo XX) se originó una importante deforestación para alimentar la producción. Los desmontes ya habían afectado una gran porción de las Sierras Chicas, y esto llevó a un retroceso del bosque nativo. Los periodos de tala y desmonte se expandieron en los años cuarenta, para la obtención de leña, dada la reducción en las importaciones de carbón mineral. La degradación de los bosques incrementó su susceptibilidad a los incendios iniciados en pastizales, los cuales transformaron porciones importantes de bosque en otras coberturas (principalmente arbustales).

A esto se suma como intervención negativa, la situación demográfica del sector, que da cuenta de un crecimiento exponencial de la población urbana en dirección al piedemonte, generando presión sobre los recursos naturales vulnerables. La cobertura y el suelo, sujetos a manejos inadecuados, trae severas consecuencias que afectan a través de la escasez hídrica y las inundaciones las zonas más bajas. El agua del sistema hídrico estudiado es utilizada principalmente como fuente para consumo humano y recreación (Gavier Pizarro y Bucher, 2004). En la actualidad, las Sierras Chicas de Córdoba están sometidas a una grave crisis hídrica como consecuencia de prolongadas sequías y un manejo inadecuado del recurso (Dasso, *et al.* 2014, p.1223).

La deforestación es un ejemplo de este tipo de intervenciones. Según el informe del Ministerio de Agroindustria de Argentina, en la actualidad se estima en 1,25 millones de ha el remanente del bosque nativo, en formaciones atomizadas y muy degradadas, de los 10 millones existentes 100 años atrás (Zupan, 2018). En los sectores donde la deforestación del bosque nativo fue intensiva (principalmente en la localidad de Unquillo en el 1900), se abrieron espacios vacantes, donde avanzó el bosque de especies exóticas. A su vez, la silvicultura genera un impacto considerable, la plantación es realizada sobre terrenos previamente desmalezados, o habiendo reducido la cobertura vegetal, potencial competidora de los plantines que se pretenden implantar. En el caso de la zona serrana, lo habitual es partir con lotes pastoreados en forma intensiva, con un bajo volumen de pastizal (Zupan, 2018).

Como prácticas de conservación, en la región se destaca la Reserva Hídrica Natural Parque la Quebrada ubicada al norte de la cuenca (aproximadamente 31°10`S y 64°20`O). Con un área de 4.200 ha, es la más importante de la región de Sierras Chicas, fue creada en 1987 para proteger la cuenca hídrica del dique de La Quebrada y su vegetación (Ley 6964/83, Áreas Naturales Provinciales y sus Ambientes Silvestres, Córdoba, Argentina. El embalse tiene una superficie de 17 ha, fue construido en entre 1974 y 1976 por la Dirección Provincial de Hidráulica, y desde 1988 provee de agua potable a las ciudades de Río Ceballos, Unquillo y Mendiolaza. Decreto 5620). Al respecto “pueden destacarse ciertos elementos que constituyen una problemática ambiental actual y atentan contra la integridad del Bosque en la Reserva (Estrabou, 1983; Mogni, 1992 citado en Arán, Iván y Huais; 2015), tales como incendios, sobrepastoreo, y desmontes; estos últimos relacionados con el crecimiento de villas veraniegas como Colanchanga y emprendimientos inmobiliarios (Arán, Iván y Huais; 2015). Al sudoeste, se encuentra la Reserva Municipal Quebrada de Los Quebrachitos, que comprende también las nacientes de los arroyos Cabana y las Ensenadas; afluentes del arroyo Unquillo.

En disputa, aparece la Ley de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba (Ley N° 9.814) sancionada y publicada en agosto de 2010, en base y complementando la Ley Nacional N° 26.331. Esta regula la conservación, el manejo sostenible y el aprovechamiento con cambio de uso de suelo de los bosques existentes en la provincia, así como todos los que se formaren en el futuro, sean nativos o exóticos, públicos o privados, sus servicios ambientales, sus frutos, productos y subproductos. Quedan excluidos de la presente los Bosques Implantados. Las tensiones sobre la implementación provincial de esta Ley, giran en torno al incumplimiento de los procesos que demanda la Ley Nacional en materia de

ordenamiento de estos espacios; y al establecimiento y adaptación a nivel provincial de los criterios de zonificación de la conservación del bosque nativo. Por cuanto se destaca:

[...] en los últimos años, la pérdida de bosques nativos ha alcanzado niveles tan críticos que la Argentina fue declarada como "país en estado de emergencia forestal" por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Informe GEO ARGENTINA)", de acuerdo al informe elaborado por la Universidad Nacional de río Cuarto para el Defensor del pueblo de la Provincia de Córdoba en rechazo de la Ley de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba (Deon, 2016)

Actualmente, también aparece en disputa Ley Agroforestal, que obliga a forestar el 2 % del área productiva provincial. La iniciativa recibió cuestionamientos referidos a la plantación de especies exóticas como pinos y eucaliptus, que tendrán un impacto negativo sobre la vegetación nativa; y a las causas de aquellos productores que hayan realizado desmontes ilegales de bosque nativo, ya que no plantea nada al respecto.

En línea de las actividades de intervención y que generan impactos considerables se hace especial énfasis en la explotación minera del sector, efectuada a través de canteras de áridos. Entre estas se destaca la cantera El Gran Ombú S.A. ubicada en Villa Allende desde hace 30 años. Se dedica a la extracción y trituración de roca granítica de montaña. Cuenta con un predio de 41 hectáreas, en donde se realizan las tareas de explotación, trituración, mantenimiento, transporte y administración. Así también, sobresalen en producción las canteras de áridos localizadas en la localidad de Río Ceballos.

7. Encuadre metodológico

7.1. Postura metodológica

La investigación es cuantitativa de evaluación indirecta y se ajusta a un método hipotético-deductivo con base en el estudio de caso. El foco de la investigación fue la aplicación del modelo RUSLE mediante la teledetección, para evaluar la tasa de erosión según los cambios en la cobertura vegetal en el área de la cuenca del arroyo Saldán, región de Sierras Chicas Córdoba, en los años 2005, 2014, 2016 y 2017. Con este propósito, la investigación tiene un alcance descriptivo cuyas categorías a trabajar refieren a los cambios en la cobertura vegetal y a la erosión del suelo, por cuanto contienen los conceptos teóricos específicos que designan los fenómenos que se van a estudiar (Juni y Urbano, 2014).

El objeto de estudio es el suelo propenso a la erosión hídrica, mientras que las unidades de análisis corresponden a los tipos de cobertura identificados en el área preestablecida. La muestra está determinada por aquellas características del terreno y de las coberturas vegetal observables desde el sensado remoto. El escenario se enmarca en las condiciones geográficas actuales del área de estudio, definidas a partir de las condiciones físico-naturales (características actuales del medio) y las socio-territoriales (respecto de las intervenciones humanas).

Se consideró un periodo de 12 años desde 2005 a 2017 que acapara los picos de mayor deforestación en la provincia de Córdoba (Agost, 2015 p.115) a la vez que coincide con los años de incrementos pluviográficos (Apéndice 2 y 3). Dados los materiales disponibles para el procesamiento de cada factor del modelo, se seleccionaron cuatro años para su análisis: 2005, 2014, 2016 y 2017. El análisis se centró en el estado inicial y en el estado final, pudiendo dar cuenta de los cambios producido para todo el periodo. La fecha de observación de la cobertura vegetal coincide con la estación de verano cuando se producen las precipitaciones más abundantes, siendo adecuada para identificar los diferentes estratos de vegetación (Gavier Pizarro y Bucher, 2004, p.8).

El desarrollo siguió en primer lugar un enfoque exploratorio-descriptivo mediante observaciones indirectas, auxiliadas por sistemas de globo virtual como el *Google Earth Pro*, técnicas de interpretación de imágenes satelitales (Sheppard y Cizek, 2009; De Castro Panizza y Padovesi Fonseca, 2011) y fuentes secundarias como los antecedentes bibliográficos (Juni y Urbano, 2014). En esta instancia se asumió una perspectiva crítica a fin de conocer: a) la situación actual acerca de las condiciones geográficas del área de la cuenca del arroyo Saldán y b) las posibles causas del problema de la erosión del suelo, identificando suelos propensos a la erosión, zonas vulnerables a los cambios de cobertura vegetal y sectores donde la población queda expuesta; pudiendo comprender y establecer posturas acerca del escenario en el que se enmarca dicho problema.

En segundo lugar, un enfoque técnico-aplicativo, que implicó medir el grado de erosión del suelo por unidad de área en cada año de análisis, adaptando los factores locales del modelo RUSLE (Wischmeier, 1975; Wischmeier y Smith, 1978). La concreción de cada factor es resultado de la integración metodológica propuesta por la bibliografía de referencia. En esta instancia se realizó un estudio comparativo entre los estados iniciales y finales, para plantear consideraciones finales respecto de la evolución e implicancias del problema.

7.2. Estructura metodológica

Estructuralmente, la tarea investigativa se realizó en cuatro etapas: en la primera se introduce al caso de estudio a partir del planteo del problema. En este, se hace hincapié en los antecedentes acerca de los cambios de cobertura vegetal ligados a prácticas de deforestación en el área de estudio. En referencia a la aplicación del modelo RUSLE abordado desde la teledetección, se revisan algunos ejemplos relevantes de la bibliografía disponible, a modo de conocer a grandes rasgos la atención investigativa y analítica que está teniendo en las décadas recientes. En este apartado también se incluye el desarrollo del marco teórico. Los resultados se presentan en el Capítulo I. En la segunda se describió el escenario a investigar sustentado en las condiciones geográficas del área, y se encuadra la metodología a partir de la cual se encara el estudio, cuyos resultados se presentan en el Capítulo II.

En la tercera etapa, luego de experimentar y determinar la metodología idónea para la adaptación de los factores locales del modelo RUSLE, se presentan los resultados obtenidos. En esta etapa se puso especial énfasis en el proceso de clasificación de las imágenes satelitales, para la confección del mapa del factor cobertura del terreno. Los resultados se presentan en el Capítulo III.

En una última etapa se discutió acerca de los cambios detectados en cada año analizado. A partir de su análisis se buscó responder en qué medida los cambios en la cobertura vegetal favorece la erosión del suelo. Luego, respaldándose en la bibliografía de referencia, se reflexionó en torno a los posibles efectos de la erosión del suelo sobre las poblaciones pedemontanas expuestas, describiendo aquellas situaciones en las que puede agravar el problema de las inundaciones. Por último, se arribó a las conclusiones respecto de las posibilidades de aplicación del modelo RUSLE abordado desde la teledetección, detallando los beneficios y limitaciones ligadas a un trabajo indirecto.

7.3. Materiales y métodos por etapa

7.3.1. Primera y segunda etapa: Planteo del problema, recopilación de antecedentes y marco teórico.

Tanto para la elaboración del marco teórico, como para la descripción del escenario, las fuentes secundarias fueron conformadas por la bibliografía de referencia hallada en la indagación web. La búsqueda se realizó inicialmente en servidores académicos de uso libre y luego en la base de datos bibliográficos *Scopus*, con la que se delimitó el alcance de la

exploración. Para la revisión de la bibliografía disponible electrónicamente, se seleccionó una nómina en la que se destacan documentos que son puntos de confluencia conceptual desde la perspectiva propuesta. Se consideró como material a analizar aquel que no supera los 20 años desde su publicación, pero haciendo hincapié en la bibliografía precedente.

Sumado a la información bibliográfica empleada en la descripción del escenario se incorpora: información periodística histórica y actual referida a casos estrictamente locales; y aportes complementarios fundados en las observaciones de imágenes satelitales de alta resolución, proporcionadas por sistemas de globo virtual (*Google Earth Pro*).

7.3.2. Tercera etapa: Mecanismos de adaptación de los factores locales del modelo **RUSLE**.

La práctica se sustentó en la combinación de diferentes técnicas, programas informáticos de procesamiento de imágenes satelitales, otros tipos de información raster e información vectorial, auxiliados por sistemas de información geográfica, que posibiliten estimaciones con mejor precisión según los requerimientos para la adaptación de cada factor del modelo **RUSLE**. Si bien el análisis se fundamentó en la bibliografía precursora, en el desarrollo del modelo se consideraron las variantes documentadas en trabajos de regiones que presentan condiciones climáticas y topográficas semejantes a las del área de estudio.

A través del modelo empírico basado en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (**RUSLE**), que presenta la reformulación de las estimaciones de los factores topográficos y de la extensión del área propuestos inicialmente en la *Universal Soil Loss Equation* – **USLE** (Wischmeier, 1975; Wischmeier y Smith, 1978), se estimó las tasas anuales de erosión a largo plazo (Ec.1).

Ecuación 1: Factor A

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

donde "A" es la pérdida de suelo anual promedio (t/ha·año); **R** es el factor erosividad de la lluvia anual promedio (MJ·mm/ha·h·año), mientras que **K** el factor de erosionabilidad del suelo (t h/MJ mm). El factor compuesto **LS** corresponde a las magnitudes adimensionales asociadas con la longitud y gradiente de la pendiente. **C** es el factor cobertura terrestre y **P** representa las prácticas de conservación del suelo en función de C, ambos adimensionales.

7.3.2.1. Factor R: Erosividad de la lluvia

A los fines prácticos, se indagó sobre aquella metodología derivada de un análisis de regresión que considera las condiciones climáticas en las que se enmarca el área de estudio. Esta metodología fue propuesta por referentes argentinos a partir de ensayos de diferentes aproximaciones, las cuales fueron resultantes de modelos de regresión lineal entre valores conocidos de R y datos de registros meteorológicos básicos, como el índice modificado de Fournier (IMF) o las que sólo consideran las precipitaciones medias anuales (PMA) (Maggi, 2002; Gaitán, *et al.* 2017). Para Argentina, se halló un modelo de predicción de R (Ec. 2) basado en la PMA con un ajuste lineal del 79% (equivalente a $R^2=0.79$) respecto del factor R de localidades cercanas (Gaitán, *et al.* 2017).

Ecuación 2: Factor R

$$R = 0,2266 \text{ PMA}^{1,1289} \quad (2)$$

donde **R** es la erosividad de la lluvia en MJ·mm/ ha·h·año y **p** es la precipitación media anual (PMA) en mm.

El valor de PMA se obtuvo del promedio anual de las lluvias de cada año analizado. Si

bien para el cálculo de las PMA es necesario un estudio mínimo de 30 años según lo estipulado para el uso de las normales climáticas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM-N° 49 y OMM/DT-N° 1188), esto no pudo ser considerado por la falta información histórica en el área de estudio. Sin embargo, se procedió con los datos disponibles teniendo en cuenta que periodos menores permiten calcular los promedios de una gama mucho más amplia de estaciones, y que la duración óptima del registro varía en función del elemento climático, la geografía y la tendencia secular. Esto admite calcular en cualquier momento periodos de promediación más cortos (normales provisionales), especialmente para las estaciones que carecen de datos correspondientes a un periodo de 30 años (OMM-N° 100, 2011, p.18).

La obtención de los datos de PMA del área de la cuenca del arroyo Saldán, constituye una de las razones por la que se toma la decisión de dividir el periodo establecido (2005-2017) en dos cortes temporales. Esto se debe a que sólo se disponía de datos continuos observados en campo desde el año hidrológico 2013-2014.

Para el primer corte temporal (2005-2014) se recurrió a datos mensuales proporcionados por el *European Center for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF), debido a que brindan información procesada desde 1979, de forma inmediata y acceso libre. Son datos obtenidos de un reanálisis climático mundial a través del proyecto *ERA-Interim*. Este utiliza una versión fija de un sistema numérico de predicción meteorológica *Integrated Forecast System* (NWP), *cycle 31r2* (IFS - Cy31r2) para producir datos reanalizados combinando las observaciones con un pronóstico previo (Serio, Spescha y Murphy, 2006). Esta base de datos, “es esencial para la asimilación de datos en zonas donde existe una cobertura reducida de sistemas de medición atmosférica como el hemisferio sur, siendo aplicada en la validación de modelos a largo plazo para sistemas de predicción como el *Ensemble Prediction System*” (Serio, Spescha y Murphy, 2006). Los datos utilizados corresponden al parámetro *Total Precipitation*, en unidades de milímetros operados a través de un factor escalar y otro aditivo. Los archivos raster con un tamaño de píxel de 0.002463 grados de latitud y longitud, fueron obtenidos en formato NetCDF y posteriormente convertido a Tiff para su procesamiento en ENVI⁵ 4.8 y ArcGIS 10.2.

Los datos de precipitaciones mensuales obtenidos de las observaciones de campos y con los que se calculó el valor de PMA, permitieron definir el segundo corte temporal (2016-2017). La información obtenida corresponde a las estaciones meteorológicas ubicadas en el interior y alrededores del área de la cuenca del arroyo Saldán, identificadas en la Tabla 4 según nombre, ubicación y altura sobre el nivel del mar. La información fue proporcionada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (SRH - MAAYSP) y por el Instituto Nacional del Agua - Centro de la Región Semiárida (INA - CIRSA).

Los datos de PMA obtenidos de las estaciones meteorológicas, fueron empleados para la elaboración de una capa raster mediante la interpolación espacial. Esta se realizó aplicando el método de kriging ordinario sobre la base de observaciones de un sólo elemento (PMA). El procedimiento consistió por un lado en el análisis estructural de los datos, a fin de estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada según la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad (Díaz Viera, 2002); y por otro, en la estimación de los valores de toda la extensión del área de estudio.

El procedimiento completo se realizó de manera automática utilizando las herramientas predeterminadas del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 10.2. En la etapa del análisis estructural, en la que se exploran los datos, se caracterizó estadísticamente la muestra para verificar su adecuación según requerimientos básicos del método (distribución probabilística normal, estacionaridad y tendencia). Luego se calculó el semivariograma experimental, mediante el gráfico de la varianza de todos los pares de datos según la distancia,

⁵ ENVI® (Environment for Visualizing Images) software comercial desarrollado por *Research System Inc.*, Boulder, CO, USA. La aplicación ofrece un entorno amigable para la visualización y análisis de imágenes.

y se ajustó el modelo teórico teniendo en cuenta el intercepto con la ordenada, el crecimiento monótono y la meseta (Díaz Viera, 2002). Por último, se validaron los resultados a través del método de validación cruzada.

Tabla 4: Promedio de las precipitaciones (2016 y 2017), de acuerdo a las estaciones meteorológicas próximas al área de la cuenca

Estación	Situación	Y	X	Altura msnm	PMA
Villa Caieiro	Externa	6537215,21	361037,79	681	710,5
Cerro San Roque	Externa	6529145,77	380962,9	1.100	744
Las Juntas	Externa	6546329,72	358640,92	716	736,5
Pan de Azúcar	Interna	6543670,73	364869,96	1.100	804,5
Cont. Saldan	Interna	6533734,54	375730,58	497	701,5
Chateau	Externa	6529145	380962	2.200	791,5
Las Minas	Externa	6581588,93	381247,98	1.723	1431
El Diquecito	Externa	6530400,23	367470,9	536	640,5
Capilla Buffo	Interna	6548046,67	370003,56	818	746,5
Dique La Quebrada	Interna	6553269,53	371528,25	807	550
Camino de las Sierras	Externa	6520078,71	372010,75	555	863
Camino Cuadrado	Externa	6558661,62	362000,16	1.378	827
Ascochinga	Externa	6573617,82	381601,02	672	663,5
A Chiviquin	Interna	6551484,8	371535,96	829	602,5
A Quebrachito	Interna	6546261,08	370446,69	832	743,5

Nota. Fuente: Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (SRH - MAAySP) y por el Instituto Nacional del Agua - Centro de la Región Semiárida (INA - CIRSA).

7.3.2.2. Factor K: Erodabilidad del suelo

El factor que cuantifica el carácter cohesivo de un tipo de suelo y su resistencia a desprenderse y ser transportado durante un evento de lluvia, se calculó mediante las ecuaciones de los subfactores de K (Ec. 3), a partir de las concentraciones de arena (Ec. 4 y Ec. 7), limo, arcilla (Ec. 5) y materia orgánica (Ec. 6) en el suelo. En la ecuación (Ec. 3), f_{csand} es un subfactor que disminuye el valor de K en suelos con alto contenido de arena gruesa y viceversa para suelos con poca arena; asimismo f_{cl-si} proporciona factores de erosión del suelo bajos para suelos con altas proporciones de arcilla a limo; f_{orgc} reduce los valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico, y f_{hisand} reduce los valores de K para suelos con un contenido de arena extremadamente alto (Williams, 1995; Wawer, *et al.* 2005, Souphihalath, T. *et al.* 2017).

Ecuación 3: Factor K

$$K_{USLE} = KW = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (3)$$

Ecuación 4: Contenido de arena y arcilla

$$f_{csand} = (0.2 + 0.3 \cdot \exp[-0.256 \cdot m_s \cdot (1 - m_{silt}/100)]) \quad (4)$$

Ecuación 5: Contenido de limo y arcilla

$$f_{cl-si} = (m_{silt}/(m_c + m_{silt}))^{0.3} \quad (5)$$

Ecuación 6: Contenido de materia orgánica

$$f_{orgc} = (1 - (0.25 \cdot orgC / (orgC + \exp[3.72 - 2.95 \cdot orgC]))) \quad (6)$$

Ecuación 7: Contenido de arena

$$f_{hisand} = (1 - (0.7 \cdot (ms/100) / ((1 - ms/100) + \exp[-5.51 + 22.9 \cdot (1 - (ms/100))]))) \quad (7)$$

dónde: **ms** es el contenido de arena en la fracción (0.05-2.00 mm de diámetro); **msilt** es el contenido de limo en la fracción (0.002-0.05 mm de diámetro); **mc** es el contenido de arcilla en la fracción (<0.002 mm de diámetro); **orgC** es el contenido de materia orgánica en la fracción. Todos expresados en porcentaje.

Los puntos de muestreo para el área de la cuenca fueron extraídos del archivo vectorial proporcionado por el Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", confeccionado sobre la base de datos georreferenciados por el sistema de geoinformación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se seleccionaron luego de contrastar la información descriptiva con la proporcionada por la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO).

Los datos de las concentraciones de limo, arcilla y arena fueron extraídos del informe "Recursos Naturales de la provincia de Córdoba - Los Suelos - Nivel de reconocimiento 1:500000" de acuerdo con el perfil de cada unidad cartográfica involucrada en el área de la cuenca del arroyo Saldán.

La implementación de las ecuaciones se realizó mediante hoja de cálculo y los resultados se adicionaron como atributo al archivo vectorial sobre "tipos de suelo", para luego confeccionar el raster con el que se obtuvo el mapa del factor K. El procesamiento del mapa se realizó en el entorno SIG de ArcGIS. El mapa del factor K resultante fue implementando para ambos cortes temporales dado que el material utilizado no presenta actualizaciones en el periodo tratado.

7.3.2.3. Factor LS: Topografía del terreno

Con el factor LS se determinó el efecto de la longitud de la pendiente o subfactor L (Ec. 8; Ec. 9 y Ec. 10) y del grado de la pendiente o subfactor S (Ec. 11 y Ec. 12), en la proporción de pérdida de suelo, respecto de aquella que se produce en una longitud y grado de pendiente estándar 22,13 m y 9% respectivamente. Estas variables fueron reconocidas a partir de las modificaciones realizadas sobre el cálculo original (McCool *et al.* 1987, Desmet y Govers, 1996, Sánchez Olivera y Bicca Rodríguez, 2013, Gaitán, *et al.* 2017). En el presente trabajo, se aplicaron las ecuaciones propuestas:

Ecuación 8: Factor L

$$L = ((\lambda_{(i,j)} + D^2) \cdot (m+1) - \lambda_{(i,j)} \cdot (m+1)) / (D \cdot m + 2 \cdot (22,13)m) \quad (8)$$

Ecuación 9: Parámetro según longitud de la pendiente

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (9)$$

Ecuación 10: Longitud de la pendiente

$$\beta = ((\text{sen} \theta / 0,0896) / (3 \cdot (\text{sen} \theta)^{0,8} + 0,56)) \cdot 0,5 \quad (10)$$

Ecuación 11: Factor S

$$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03; \quad \text{para } \tan s_{(i,j)} < 0,09^\circ \quad (11)$$

Ecuación 12: Factor S

$$S = 16,8 \cdot \text{sen} \theta - 0,5; \quad \text{para } \tan s_{(i,j)} > 0,09^\circ \quad (12)$$

donde L es el factor longitud de la pendiente. λ es el área de captación de la cuenca o acumulación del flujo a nivel de píxel i,j . D es el lado del píxel. m es un parámetro variable de la longitud de pendiente, que depende del radio β de la erosión del cauce (causada por el flujo) para intercalar la erosión (causada principalmente por el impacto de la gota de lluvia). θ es el ángulo de la pendiente. S es la inclinación de la pendiente, cuya ecuación varía según su grado.

Como dato de entrada, se utilizó un mosaico creado a partir de cuatro capas de un modelo de elevación de digital (DEM) que cubre el área de estudio. Este es un producto GDEM (*Global Digital Elevation Model*) de ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) que se distribuye como formato de imagen, etiquetada, georeferenciada (GeoTIFF), tabla 5.

Tabla 5: Características del GDEM ASTER - Versión 2. 2011

Tamaño de la toma	3601 x 3601 (1 x 1)
Tamaño del píxel	1 arco-segundo
Sistema de coordenadas geográficas	Geográficas: latitud y longitud
Formato de salida del DEM	GeoTIFF, 16 bit, en unidades de metros verticales. Geoide de referencia: WGS84/ Modelo gravitacional de la Tierra de 1996 EGM96
Valores especiales de ND (números digitales)	-9999 para píxeles vacíos y 0 para cuerpo de agua.
Cobertura	Norte 83° a sur 83°, 22702 tomas.

Nota. Fuente: Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) in Japan and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). E.U.A. 2011

Los archivos se descargaron de *The Consortium Spatial Information* (CGIAR). El *Ministry of Economy, Trade, and Industry* (METI), *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC) en Japon y el *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) en E.U.A son los encargados de su distribución.

El procesamiento del factor LS se realizó mayormente en un entorno SIG, dada la complejidad de la distribución del flujo y los patrones de convergencia de la cuenca dentro de un terreno de sierras. Las características hidrológicas estudiadas para obtener el área de captación de la cuenca (λ a nivel de píxel i,j) se extrajeron del DEM ASTER aplicando las herramientas predeterminadas del software ArcGIS 10.2: *Flow Direction* y *Flow Accumulation*. La primera herramienta dirige el flujo desde cada píxel hasta su vecino según el descenso más empinado; para lo cual, fue necesario calcular previamente el parámetro variable de la longitud de pendiente (m) a partir del ángulo de la pendiente (θ). Cuando se encuentra la dirección del descenso más empinado, el píxel de salida se codifica con el valor que representa esa dirección, considerando: a) si el descenso máximo de varios píxeles es el mismo, la vecindad se agranda hasta que se encuentra el descenso más empinado; b) si todos los elementos próximos son más altos que el píxel de procesamiento, se considerará un ruido que se rellena con el valor más bajo de los elementos próximos; y c) si dos píxeles fluyen entre sí, se trata de sumideros que deben rellenarse previamente. Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con los ocho píxeles adyacentes hacia dónde puede ir el flujo (Jenson y Domingue, 1988). Para el procesamiento se ingresó el DEM como dato de entrada y se obtuvo un ráster que muestra la dirección del flujo.

Para utilizar la herramienta *Flow Accumulation* se ingresó el ráster de dirección de flujo como dato de entrada y se obtuvo un ráster que muestra el número de píxeles que fluyen hacia cada píxel. Esto calculó el flujo acumulado como el peso acumulado de todos los píxeles que fluyen hacia cada píxel con pendiente descendente en el ráster de salida. El valor de los píxeles en este ráster es el número de píxeles que fluyen hacia cada píxel. Luego de obtener el ráster del área de captación del flujo y de calcular la pendiente a partir del DEM, se procedió a ejecutar

las ecuaciones planteadas mediante álgebra de bandas en el entorno SIG a fin de elaborar el mapa del factor LS.

7.3.2.4. Factor C: Cobertura del terreno

Para la adaptación del factor C asociado a cada cobertura, se recurre a tablas (9 y 10) propuestas por la bibliografía de referencia (Wischmeler y Smith, 1978; González del Tánago, 1991; Clérici y Préchac, 2001; Díaz, 2006; Mansilla Escobar, 2008; Bewket y Teferi, 2009; López Santos, *et al.* 2012, Bueno Hurtado, *et al.* 2016, Correa, *et al.* 2016; Delgado, 2018) En la selección de los valores para la tabulación, se consideraron aquellos calculados a partir de características del tipo de vegetación determinadas que coincidan con las clases de cobertura existentes en el área de estudio.

Por consiguiente, el procedimiento para la clasificación del terreno se inició con la determinación de las clases de cobertura. En primer lugar, se realizó una identificación basada en las condiciones geográficas del área de estudio desarrolladas con anterioridad. En este sentido, se hizo hincapié en la clasificación según la Agenda de Desarrollo Económico Regional” para las Sierras Chicas (Recalde, 2014 *coord.* p.1).

- Urbana (localidades, vías de acceso, asentamientos).
- Bosque nativo (fragmentos de bosque natural).
- Especies exóticas (sitios invadidos por árboles exóticos).
- Arbustal (matorral natural y degradado).
- Pastizal (pastizal de altura, vegetación baja, degradada y cultivos).
- Suelo expuesto (afloramientos rocosos en la sierra, canteras y suelo desnudo sin cultivar).

En segundo lugar, sobre la base de la diferenciación de clases propuesta y a los efectos de identificar los contrastes en la adaptación del factor C, la definición de las clases se basó en la interpretación de las imágenes satelitales sustentada en sistemas de globos virtuales. La estimación de los parámetros en relación con el tipo de vegetación, se realizó sin recurrir a mediciones específicas. Conforme a las características de la vegetación y a su aspecto aéreo, se consideró estimativamente el porcentaje de cobertura aérea, la cobertura superficial en contacto con el terreno y con esto la distribución del estrato vegetal, la altura del estrato y la posibilidad de presencia o ausencia de sotobosque, hojarasca y materia orgánica.

En la etapa de interpretación, las imágenes Landsat TM son una herramienta adecuada para el mapeo de la vegetación (Jensen, 1996 citado en Cingolani, *et al.* 2004). La disponibilidad de imágenes satelitales de mediana resolución espacial para el primer corte temporal y la posibilidad de utilizar imágenes de mayor resolución espacial para el segundo corte temporal, constituyen otra de las razones por la cual se tomó la decisión de definir dos cortes temporales. El factor C se calculó para los cuatro años establecidos (2005, 2014, 2016 y 2017). Los cuatro mapas de cobertura del terreno correspondientes a los dos cortes temporales se derivaron de imágenes satelitales ópticas. Para la observación de los cambios producidos entre el año inicial y el año final de cada corte temporal, se seleccionaron fechas dentro del mes de enero.

Como dato de entrada para el primer corte temporal, se utilizaron escenas provista por Landsat 5 (L05) sensor "TM" (*Thematic Mapper*) adquirida el 20 de enero de 2005 y Landsat 8 (L08) sensor "OLI" (*Operational Land Imager*) adquirida el 13 de enero de 2014. *Path*: 229, *row*: 082, resolución espacial de 30 metros. Las imágenes fueron descargadas del servidor *United States Geological Survey* (USGS) previa solicitud y corresponden al set de datos de la primera colección. Estas son escenas con valores de reflectancia en superficie, incluyen datos corregidos de Nivel 1 de Precisión y Terreno (L1TP) que tienen una radiometría bien

caracterizada, intercalibrados con instrumentos Landsat. El registro geográfico es coherente y está dentro de las tolerancias prescritas de imagen a imagen (Zanter, 2017).

Las imágenes del Landsat 5, proporcionadas por el satélite óptico de observación de la Tierra de la NASA, en actividad desde el 1 de marzo de 1984 hasta noviembre del 2011 se seleccionaron de acuerdo a su potencial para aplicaciones en campos como la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos. Características técnicas:

- Órbita: Polar, heliosíncrona, a una altitud 705 km
- Ancho de pasada: 185 km
- Distancia de muestreo (GSD): 30 - 120 m
- Tiempo de revisita: 16 días

Este satélite llevó a bordo dos sensores: *Multispectral Scanner System* (MSS) y el *Thematic Mapper* (TM). Este último es un radiómetro multiespectral, que opera simultáneamente en siete bandas espectrales (Tabla 6), diseñado para la cartografía temática.

El satélite óptico de observación de la Tierra rebautizado como Landsat 8, es la octava versión del programa Landsat denominada *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM). Fue lanzado el 11 de febrero de 2013, con el objetivo de proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Es el satélite más completo respecto de los anteriores, dado que amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, mantenimiento la misma calidad de sus siete predecesores. De acuerdo con sus características técnicas:

- Órbita: Polar, heliosíncrona, a una altitud 705 km
- Ancho de pasada: 185 km
- Distancia de muestreo (GSD): 15 - 100 m
- Tiempo de revisita: 16 días

El satélite contiene dos sensores, un sensor Infrarrojo Térmico o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) que posibilita medir la temperatura de la superficie de la Tierra; y un sensor operacional de imágenes de Tierra u *Operational Land Imager* (OLI). Este último está formado por nueve bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas (Tabla 7). Adicionalmente incluye con cada producto de datos generado una nueva banda de control de calidad, que proporciona información detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve (Ariza, 2013).

Tabla 6: Características del producto Landsat 5 Sensor TM

Modo Espectral	Resolución espacial (metros)	Resolución espectral (micrómetros)		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Multiespectral	30	Banda 1 Azul	0.45 - 0.52	8 bits	16 días
		Banda 2 Verde	0.52 - 0.60		
		Banda 3 Roja	0.60 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2	1.55 - 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio	2.08 - 2.35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico	10.4 - 12.5		

Nota. Fuente: USGS, 2013. Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-5-history>

Tabla 7: Características del producto Landsat 8 Sensor OLI

Modo Espectral	Resolución espacial (metros)	Resolución espectral (micrómetros)	Resolución radiométrica	Resolución temporal	
Multiespectral	30	Banda 1 Aerosol	0.43 - 0.45	12 bits	16 días
		Banda 2 Azul	0.45 - 0.51		
		Banda 3 Verde	0.53 - 0.59		
		Banda 4 Rojo	0.64 - 0.67		
	Banda 5 Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88			
	Banda 6 SWIR 1	1.57 - 1.65			
	Banda 7 SWIR 2	2.11 - 2.29			
	15	Banda 8 Pancromático (PAN)	0.50 - 0.68		
	30	Banda 9 Cirrus	1.36 - 1.38		

Nota. Fuente: USGS, 2013. Recuperado de 2018 de <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-mission>

Para el segundo corte temporal se utilizaron imágenes provistas por el satélite Sentinel sensor MSI S2A. Las escenas fueron adquiridas en enero de 2016 y 2017. *Path*: 229, *row*: 082, resolución espacial 10 metros, descargadas del servidor *United States Geological Survey* (USGS). El producto corresponde al *Level-1C*, proporciona reflectancia ortorrectificada a tope de atmósfera (TOA), con registro multiespectral subpíxel. Este fue preprocesado para obtener los valores de reflectancia en superficie.

El satélite Sentinel 2A fue desarrollado por la *European Space Agency* (ESA) dentro del programa *Copernicus*. Fue lanzado el 23 de junio de 2015. La misión proporciona información útil para el sector agrario, contribuyendo a la gestión de la seguridad alimentaria. También sirve para cartografiar el estado y los cambios de la superficie terrestre y para vigilar las selvas. De acuerdo con sus características técnicas:

- Órbita: Polar, heliosíncrona, a una altitud de 786 km
- Ancho de pasada: 290 km
- Tiempo de revisita: 10 días (now, 5 días with the constellation of 2 satellites)

La misión Sentinel 2 está compuesta por el instrumento *MultiSpectral Instrument* (MSI) que toma datos de alta resolución espacial, con 13 bandas espectrales que proporcionan altas prestaciones geométricas y espectrales en sus datos (Tabla 8). La cámara cuenta con dos grandes planos focales, uno en las bandas del visible (VIS) y del infrarrojo próximo (NIR) y el otro, en el infrarrojo medio (SWIR).

Considerando la distinción entre clases según la firma espectral de cada cobertura y en concordancia con el reconocimiento del área en torno la descripción del área de estudio, se identificó cada una a partir de la ordenación de los atributos de la cobertura que mejor predicen los patrones generales de reflectancia (Cingolani, *et al.* 2004, p.88).

Como punto de partida, se optó por una clasificación supervisada basada en el algoritmo "Máxima Verosimilitud", que toma como parámetros la media y la desviación típica de cada una de las clases, asumiendo que los datos siguen una función de distribución normal. A partir de la definición de las clases y la captura de las regiones de interés de cada una en cada imagen, se realiza una segmentación píxel a píxel de forma predeterminada en el programa de procesamiento de imágenes satelitales ENVI 4.8, en la que se considera los parámetros de clasificación previamente calculados (clasificador calibrado) para etiquetar cada píxel de la imagen en una de las clases definidas (Lira, 2010 citado en Camacho Sanabria, 2015. p.97). Para un refinamiento progresivo, el resultado es supervisado manualmente, es decir, "si detecta

una cantidad significativa de errores, puede modificar las regiones de interés y repetir de nuevo el proceso. Esto asegura un resultado muy preciso, pero a costa de un alto coste para el operador” (González Esquivá, 2016).

Tabla 8: Características del producto SENTINEL sensor S2A MSI

Modo Espectral	Resolución espacial (metros)	Resolución espectral (micrómetros)		Resolución radiométrica	Resolución temporal	
Multiespectral	60	Banda 1 Aerosol	0.43 - 0.45	12 bits	10 días	
		Banda 2 Azul	0.45 - 0.52			
	10	Banda 3 Verde	0.54 - 0.57			
		Banda 4 Roja	0.65 - 0.68			
	20	Banda 5 (NIR)	0.69 - 0.71			
		Banda 6 (NIR)	0.73 - 0.74			
		Banda 7 (NIR)	0.77 - 0.79			
	10	Banda 8 (NIR)	0.78 - 0.90			
		20	Banda 8a (NIR)			0.85 - 0.87
			60			Banda 9 Vapor de agua
		Banda 10 Cirrus				1.36 - 1.39
		20				Banda 11 (SWIR)
Banda 12 (SWIR)	2.10 - 2.28					

Nota. Fuente: ESA. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi>

Previa ejecución del clasificador, las imágenes preprocesadas fueron enmascaradas para invalidar sitios con sombra y cuerpos de agua. Las muestras o ROI (regiones de interés) de cada una de las clases, se tomaron de modo simultáneo enfrentando las imágenes a clasificar, correspondientes al estado inicial y al estado final, se aplicó este modo por cada corte temporal. El set total de muestras de un corte temporal, se dividió en 2 grupos, un grupo con 58 muestras⁶ o polígonos (2.587 píxeles) utilizado en el entrenamiento del clasificador, que sirve para extrapolar la información obtenida a toda la escena y el otro con 47 muestras o polígonos (1.777 píxeles) para validar la clasificación resultante. La verificación de las muestras se sustenta en: la tecnología de globo virtual que ofrece el *Google Earth Pro*, en el que se visualizan imágenes satelitales de alta resolución (a); en relevamientos fotográficos de fuentes secundarias (b) y en la bibliografía respaldatoria (c).

Para evaluar el grado de heterogeneidad entre las muestras se calculó la prueba de separabilidad basada en el método de distancias de firmas de Jeffries Matus y la Divergencia Transformada. A través de este, se producen valores entre 0 y 2, donde 0 indica una superposición completa y 2 indica una separación completa entre las clases. Cuanto más cerca de 2 sea el valor, mejor será el resultado.

Una vez empleadas las muestras de entrenamiento en la ejecución del clasificador, se evaluó la precisión global y el coeficiente kappa mediante la matriz de confusión. Este último indica cuánto mayor es la clasificación realizada con respecto a una clasificación hecha al azar, asumiendo valores comprendidos entre -1 y +1. Los valores representan el grado de discordancia y concordancia respectivamente. Un valor de K igual a 0 refleja que la concordancia observada es la que se espera del azar. También se calculó el error por comisión y omisión.

⁶ La cantidad de muestras de entrenamiento y validación por clases para ambos cortes temporales, se encuentra detallada en los resultados de ENVI 4.8 adjuntos en el respectivo apéndice.

Tabla 9: Valores de Factor C para bosque no alterados

% Superficie cubierta por capas de árboles y sotobosques	% Superficie cubierta por humus de al menos 5 cm de espesor	Factor C
100-75	100-90	0,0001-0,001
70-45	85-75	0,002-0,004
40-20	70-40	0,003-0,009

Nota. Recuperado de Wischmeier y Smith, 1979 citado en González del Tánago, 1991.

Tabla 10: Valores del Factor C para matorrales y vegetación permanente (1)

Cubierta de copa	Cubierta en contacto con el suelo	Porcentaje suelo cubierto	Cubierta de copa		Cubierta en contacto con el suelo							
			Tipo y altura (2)	Cubierta % (3)	Tipo (4)	0	20	40	60	80	+95	
No apreciable					G	0,45	0,2	0,1	0,042	0,013	0,003	
					W	0,45	0,24	0,15	0,091	0,043	0,011	
Herbáceas altas o matorral bajo, con altura media de caída de la gota de lluvia 0,5 m	25			G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,013	0,003		
				W	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011		
	50			G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003		
				W	0,26	0,16	0,11	0,076	0,039	0,011		
75				G	0,17	0,1	0,06	0,032	0,011	0,003		
				W	0,17	0,12	0,09	0,068	0,038	0,011		
Apreciable cubierta de matorral y arbustos con una altura media de caída de la gota de lluvia de 2 m	25			G	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003		
				W	0,40	0,22	0,14	0,087	0,042	0,011		
	50				G	0,34	0,16	0,08	0,038	0,012	0,003	
					W	0,34	0,19	0,13	0,082	0,041	0,011	
75				G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003		
				W	0,28	0,17	0,12	0,078	0,040	0,011		
Árboles, pero sin cubierta apreciable de matorral. Altura media de caída de la gota de lluvia de 4-5 m	25				G	0,42	0,19	0,1	0,041	0,013	0,003	
					W	0,42	0,23	0,14	0,089	0,042	0,011	
	50					G	0,39	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
						W	0,39	0,21	0,14	0,087	0,042	0,011
75					G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003	
					W	0,36	0,2	0,13	0,084	0,041	0,01	

Nota. (1) Los valores de C asumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo. (2) La altura de la copa se mide como altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación. El efecto de las copas es inversamente proporcional a dicha altura media de caída de las gotas de lluvia, siendo nulo si esta es mayor de 10 m. (3) Porción de superficie que quedaría oculta por las copas en una proyección vertical de estas. (4) G: cubierta sobre el suelo de césped o similares, restos vegetales en descomposición o humus de al menos 5 cm de espesor. W: cubierta sobre suelo de herbáceas de hojas anchas, con escasa extensión lateral de su sistema radial, o residuos vegetales sin descomposición. Fuente: Recuperado de Wischmeier y Smith, 1979 citado en González del Tánago, 1991.

Luego del proceso de clasificación, los productos obtenidos fueron comparados mediante la herramienta de detección de cambios en ENVI 4.8. Cada raster fue reclasificado a través del lenguaje de programación *Interface Definition Language* (IDL 8.0.1) según los valores del

factor C correspondientes y luego transformados a Tiff para la confección del mapa y cálculo del modelo RUSLE en ArcGIS 10.2.

Sobre la base de bibliografía referente (Wischmeir y Smith, 1978; González del Tánago, 1991; Mancilla Escobar, 2008), los diferentes tipos de cobertura vegetal pueden tener asignado un valor de C distintivo, otorgado por medio de tabulaciones según el tipo de formación y características fisonómicas de la vegetación (Tabla 9 y 10).

7.3.2.4. *Factor P: Prácticas de conservación*

En el presente trabajo, el factor P se asumió con valor uno, dado que no se hallaron sectores de agricultura intensiva en el área, y ninguna otra actividad que genera alteraciones del suelo en breves lapsos de tiempo. Por otro lado, si se considera la bibliografía de referencia (Renard, *et al.* 1997) en la que se incluyen en el estudio de este factor los pastizales de montaña, las especificaciones documentadas sobre las prácticas que se desarrollan en sectores de montaña son escasas.

7.3.2.5. *Factor A: RUSLE*

Este se confeccionó ejecutando la ecuación del modelo por medio de operaciones de álgebra de bandas de ArcGIS 10.2, para el inicio y fin de cada corte temporal. Los mapas resultantes de todos los factores, se componen de una matriz remuestreada a un tamaño de píxel según la imagen satelital aplicada. Fueron trabajados en coordenadas geográficas Lat/Long, datum WGS-84 y proyectadas al Sistema de Referencias oficial de la República Argentina POSGAR 2007 y a la faja N° 4 correspondiente a la provincia de Córdoba (WKID: 5346 Authority: EPSG). Cada mapa se confeccionó con los límites de la cuenca, recortados a partir de la capa vectorial proporcionada por el Instituto Gulich de la CONAE. La cartografía se elaboró usando las potencialidades del SIG.

Capítulo 3

8. Mecanismos de adaptación de los factores locales del modelo RUSLE

En esta tercera etapa, la práctica se sustentó en la combinación de diferentes técnicas, programas informáticos de procesamiento de imágenes satelitales, información raster y vectorial, auxiliados por sistemas de información geográfica, que posibiliten estimaciones con mejor precisión según los requerimientos para la adaptación de cada factor del modelo RUSLE, implementado para ambos cortes temporales. En la Tabla 11 se muestra resumen general.

Tabla 11: Características generales del procedimiento 2005-2017

Factores	Datos de entrada	Métodos	Resultados
R1	ECMWF - ERA-Interim PMA (mm)	Gaitán, <i>et al.</i> 2017	MJ·mm/ha·h·year Min= 195 Max= 223
R2	SRH – MAAySP e INA - CIRSA		MJ·mm/ha·h·year Min= 281 Max= 431
K	IG – INTA Mapa tipos de suelo	Wawer, <i>et al.</i> 2005	t·h/MJ·mm Min=0,02 Max= 0,04
LS	CGIAR GDEM ASTER	Desmet y Govers, 1996	Adimensionales Min=0.03 Max=205
C05	<i>Earth Explorer - Landsat Collection 1</i> L5 “TM” 2005 (Reflectancia en superficie; 30 m)	Clasificación supervisada “Máxima verosimilitud”	Cobertura del terreno 1: Bosque denso 2: Matorral serrano denso 3: Matorral serrano ralo 4: Pastizal mixto 5: Pastizal ralo 6: Construcción y roca expuesta
C14	<i>Earth Explorer - Landsat Collection 1</i> L8 “OLI” 2014 (Reflectancia en superficie; 30 m)		
C16	<i>Earth Explorer - Misión Sentinel</i> Sentinel 2 “S2A” 2016 (Reflectancia en superficie; 10 m)		
C17	<i>Earth Explorer - Misión Sentinel</i> Sentinel 2 “S2A” 2017 (Reflectancia en superficie; 10 m)		
A05	Factores: R, K, LS y C05	Enfoque híbrido	t/ha·y Min=0 Max= 200
A14	Factores: R, K, LS y C14		
A16	Factores: R, K, LS y C16		t/ha·y Min=0 Max= 400
A17	Factores: R, K, LS y C17		

Nota. Fuente: elaboración propia

8.1. Factor R: Erosividad de la lluvia

La utilización del modelo RUSLE requiere del establecimiento de supuestos y simplificaciones que deben tenerse presentes durante la interpretación de los resultados, en especial cuando mediante la simulación se pretende cubrir la falta de información (Wijesekera

y Samarakoon, 2001; Van Remortel *et al.*, 2001 citado en Díaz, 2006).

Después de la experimentación con varios métodos de estimación del factor R para el centro de la Argentina, fue posible calcularlo utilizando datos meteorológicos como las precipitaciones medias anuales (PMA). Del cálculo de las ecuaciones propuestas en la bibliografía de referencia, se optó por adaptar el factor R con los valores presentados por Gaitán, *et al.* (2017) para la región del Chaco Serrano, cuyo rango se estableció entre 200 a 300 y 300 a 400 MJ·mm/ha·h·año (Tabla 12). En la Fig. 5 sobre la distribución espacial de la PMA, se observa un patrón general de disminución de sudeste a noroeste. El mapa de la estimación del factor R (Fig. 6) que sigue el mismo patrón para el periodo enero de 2005 a enero de 2014, muestra un valor mínimo de 195.1 y un máximo de 222.9 MJ·mm/ha·h·año.

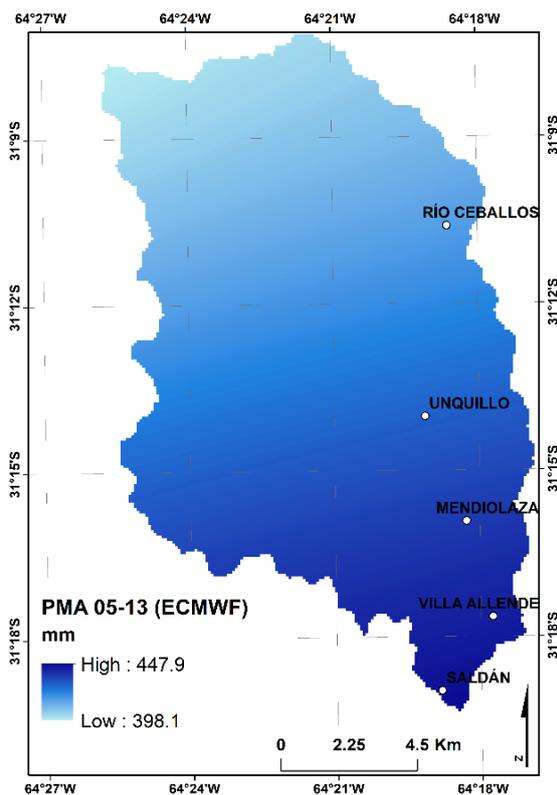


Figura 5: Mapa de PMA. 2005-2014
Nota. Fuente: Elaboración sobre la base de datos del ECMWF.

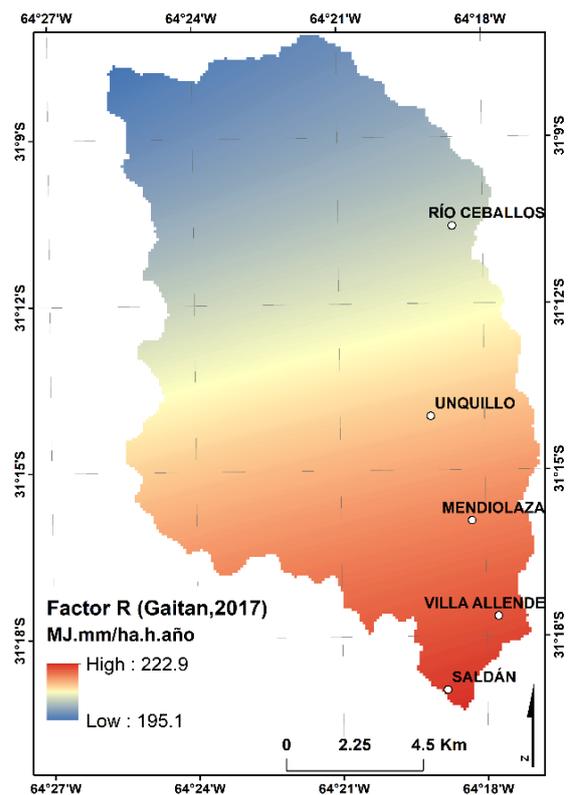


Figura 6: Mapa del Factor R. 2005-2014. Nota. Fuente: Elaboración sobre la base de datos del ECMWF.

A partir del año 2015, las estaciones climáticas se distribuyen alrededor de la cuenca y al menos seis se localizan dentro de la misma. La Fig. 7 realizada sobre la base de datos de PMA de las estaciones meteorológicas, presenta una distribución espacial dominada por un sector focal de muy bajos valores localizado al norte, a partir del cual comienzan a incrementarse hacia el suroeste, donde se localizan los valores más elevados. En todas las localidades analizadas, las lluvias anuales totalizan entre 638,5 y 715,8 mm, en el sector este de la cuenca. El mapa de la estimación del factor R (Fig. 8) según esta distribución muestra un valor mínimo de 281,2 y un máximo de 431,4 MJ·mm/ha·h·año. A través de la variable color en ambos mapas del Factor R, se representa la medida y gravedad en que los eventos de precipitación influyen en la erosión de la superficie.

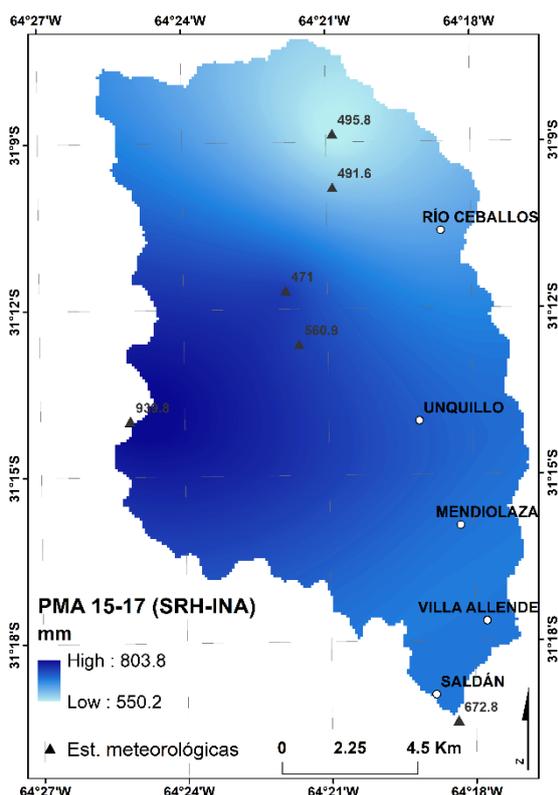


Figura 7: Mapa de PMA. 2015-2017. Fuente: datos de la SRH - MAAySP y INA - CIRSA

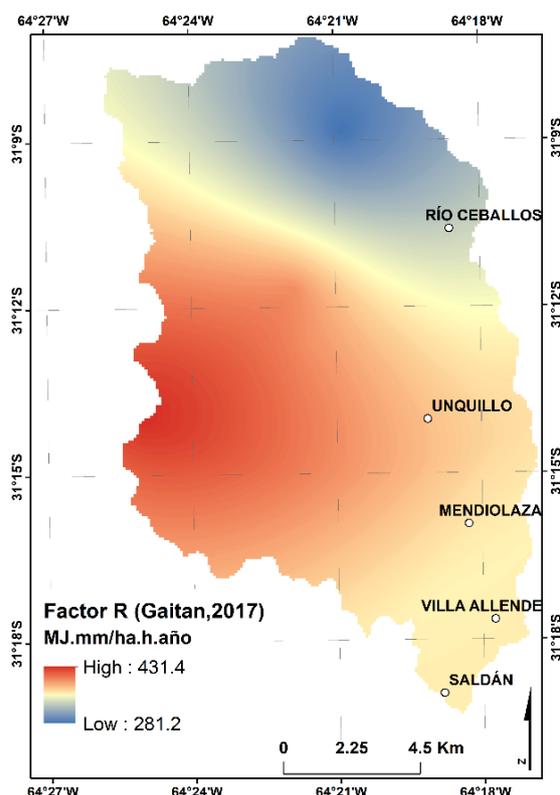


Figura 8: Mapa de Factor R. 2015-2017. Fuente: datos de la SRH - MAAySP y INA - CIRSA

Tabla 12: Valores de PMA y Factor R según Gaitán *et al.* (2017), para las localidades municipales emplazadas de norte a sur en el área este de la cuenca del arroyo Saldán

Localidades	Latitud sur	Longitud Oeste	PMA 2005-2014 (mm)	Factor R (MJ·mm/ha·h·año)	PMA 2015-2017 (mm)	Factor R (MJ·mm/ha·h·año)
Río Ceballos	31°10'36"	64°18'38"	416,2	205,2	638,5	333,4
Unquillo	31°14'02"	64°19'07"	429,8	212,8	715,8	378,4
Mendiolaza	31°15'55"	64°18'17"	438,1	217,4	693,4	365,1
Villa Allende	31°17'39"	64°17'45"	443,7	220,6	688,2	362,1
Saldán	31°18'58"	64°18'49"	446,6	222,2	688,9	362,3

Nota. Fuente: elaboración propia

La subestimación observada para la cartografía del primer corte temporal se repite en todas las localidades analizadas. Esto se atribuye, en mayor o menor medida, a que en el área son frecuentes las tormentas asociadas a procesos de carácter frontal, convectivo y orográfico (Barbeito, *et al.* 2016), fenómenos atmosféricos de escala local muy difíciles de modelar, que generan que los modelos de circulación general no sean capaces de pronosticarlas (Serio, Spescha y Murphy, 2006), en cantidad y localización, con la exactitud requerida.

Las diferencias existentes entre ambos cortes temporales, principalmente en torno a los valores de PMA, son producto del origen y método de adquisición de los datos de las fuentes consultadas. En lo concerniente a precipitaciones adquiridas por la fuente de datos de re-análisis ERA-INTERIM del ECMWF, no se hallaron validaciones del modelo para el área de la cuenca. La literatura científica argentina con este tipo de fuentes es exigua, aunque son populares en el ámbito internacional. Los estudios más próximos al área de estudio, fueron

realizados sobre la región pampeana (que alcanza el sur de Córdoba hasta el departamento de río Cuarto). Los mismos dan cuenta de estimaciones con un bajo grado de confiabilidad para el sector tratado. “Esto puede deberse a la naturaleza de los datos de precipitación de los re-análisis, ya que no son generados por modelos de interpolación a partir de datos observados, sino que surgen de los pronósticos generados con 24 horas de anticipación” (Kallberg *et al.*, 2004 citado en Serio, Spescha y Murphy, 2006). A esto se suma:

La precipitación, es un fenómeno irregular cuya distribución espacial y en el tiempo obedece a un número importante de factores climáticos, tales como distancia al mar, relieve (altitud y exposición), movimientos de las masas de aire. El comportamiento de cada uno de estos factores es muy heterogéneo, por lo que su influencia no siempre se produce de la misma manera, lo que dificulta la generación de modelos numéricos o estadísticos que permitan cartografiar en formato digital información pluviométrica para un país tan extenso como la Argentina. (Cravero, Bianchi, Elena y Bianchi, 2017, p.4)

Sin embargo, estos productos conllevan una gran variedad de beneficios en términos de continuidad espacial y temporal, además de generar estimaciones en tiempo casi real. La implementación de este tipo de fuentes que proporcionan datos históricos, con elevada resolución y que cubren enteramente o en buena parte el territorio argentino, posibilitó la valoración de la erosión del suelo basada en RUSLE para las áreas donde se carece de datos pluviográficos. La naturaleza remota del área de estudio presenta una situación donde las estaciones climáticas que cuentan con datos oficiales para el primer corte temporal se encuentran alejadas. Razón por la cual el acceso a datos modélicos desde el ECMWF, sirvió como alternativa, permitiendo analizar el comportamiento espacial de las precipitaciones anuales medias climatológicas, el cual presenta semejanzas entre las cartografías de ambos cortes temporales.

Respecto de la medición de la precipitación mediante estaciones meteorológicas *in situ*, a partir de las cuales se confeccionaron las cartografías del segundo corte temporal, aunque posee grandes limitaciones en términos de cobertura geográfica y uniformidad temporal (dado que las series de tiempo de las estaciones instaladas suelen presentar datos faltantes) aun así siguen siendo la forma más directa para la medición de la precipitación (Urea y Ochoa, 2016) y su aplicación resulta respaldatoria para datos modélicos.

Estos productos, reflejan diferencias significativas que responden a características como la precisión de la estimación, la resolución temporal, el periodo de registro, la resolución y extensión espacial y la metodología empleada en la estimación de la información. “Todas estas características determinan los límites dentro de los cuales los datos pueden ser usados: la precisión requerida está en función de la aplicación” (Ebert, Janowiak y Kidd, 2007; Fontalvo García, Santos Gómez y Giraldo Osorio, 2015; Hessels, 2015; Hou *et al.*, 2014; Serrat-Capdevila *et al.*, 2014; Tapiador *et al.*, 2012 citado en Urrea y Ochoa, 2016)

8.4. Factor K: Erodabilidad del suelo

Considerando la escala de la capa vectorial sobre los tipos de suelo (1:500.000), el área de la cuenca del arroyo Saldán se divide en cuatro sectores desarrollados longitudinalmente, lo cual se explica por la orientación de las sierras (Fig. 9), pues las variaciones edafológicas se distinguen respecto del sector de la ladera donde se ubican.

Según la bibliografía consultada sobre los tipos de suelo (Jarsún, *et al.* 2006) en el área se identificó un predominio del perfil 113 (*Ustorthent lítico paralítico*) en tres de los cuatro sectores en los que se divide, pertenecientes a las unidades cartográficas: EPLi-7 que presenta una fisiografía propia de Sierras Chicas y pastizales de altura, en la que predomina en un 50% respecto de otros perfiles de la unidad; EPLi-9 correspondiente a sectores de ladera occidental

de falla, en la que aparece también en un 50%; y Epli-17 (fisiografía propia del sector oriental) con proporciones menores (40%). La predominancia de este tipo de suelo implica horizontes de poca profundidad, con textura esquelética franco-arenosa, pero con raíces abundantes. Este es un tipo de suelo muy fuertemente inclinado (>10%), propio de laderas escarpadas excesivamente drenadas, con bajo contenido de materia orgánica, lo que genera un suelo de alta susceptibilidad a la erosión.

En segundo lugar, correspondiente a la unidad Epli-7, aparece el perfil 41 (*Hapludol lítico paráltico*) desarrollado en un 30%, incipientemente sobre roca granítica, con características semejantes a las del anterior perfil a excepción que este es moderadamente bien provisto de materia orgánica. En el sector sureste de la cuenca predominan el perfil 64 (*Hapludol típico*) en un 40%, correspondiente a la unidad MNtc-29 (pedemonte oriental muy ondulado), caracterizado por pendiente medias y bajas, bien drenados, desarrollados sobre material limoso con bajo contenido de materia orgánica. Sobre áreas pedemontanas los materiales originarios son de texturas muy variadas, desde esqueléticas-gruesas en las partes apicales de los abanicos y en los cerrillos, hasta franco-limosas y arcillo-limosas en el loess y derrames finos. La capa freática es profunda y no afecta al perfil de los suelos, pero los procesos de erosión hídrica son intensos.

El factor K calculado a partir del cual se estimó el carácter cohesivo y la resistencia del suelo a desprenderse y ser transportado durante un evento de lluvia, derivó en dos valores representativos (Fig. 10). La semejanza entre los perfiles 113 y 41 dio como resultados valores muy cercanos alrededor de 0,017 t·h/MJ·mm en tres de los cuatro sectores en los que se divide el área. Mientras que el sector sudeste se diferencia por un valor de 0,039 t·h/MJ·mm (Tabla 13).

Tabla 13: Resultados del cálculo del factor K

Unidad Cartográfica	Perfil Edafológico	Arena %	Limo y arcilla %	Materia orgánica%	Arena pura %	K usle	K*0.1317
		F csand	F cl-si	F org	F hisand		
Epli-9 y Epli-17	113	0,20	0,88	0,75	0,98	0,13	0,017
Epli-7	41	0,20	0,86	0,75	0,99	0,13	0,017
Mntc-29	64	0,41	0,94	0,76	0,99	0,29	0,039

Nota. Fuente: elaboración a partir de las ecuaciones de Desmet y Govers, 1996

En la ecuación del factor K (Ec. 3), los subfactores reducen o incrementan el valor de K y con este la erosión del suelo según las concentraciones de arena, limo, arcilla y materia orgánica de cada unidad cartográfica. De este modo, los subfactores f_{csand} y f_{hisand} disminuyeron el valor de K en los suelos de las unidades Epli-7, Epli-9 y Epli-17, por el contenido de arena extremadamente alto (textura esquelética franco arenosa); el subfactor f_{cl-si} proporciono valores de erosión del suelo más altos para la unidad Mntc-29 porque esta posee mayor concentración de arcilla y limo. El subfactor f_{orgc} redujo los valores de K para las cuatro unidades cartográficas por igual, dadas las similitudes en el contenido de carbono orgánico (Wawer, *et al.* 2005).

La representación a través de la variable color en el mapa del Factor K, permite observar la mayor vulnerabilidad del suelo ante los eventos de precipitación, localizada hacia el sector sudeste del área de la cuenca. Este factor, da cuenta de una característica útil de analizar para identificar los suelos que necesitan mayor protección al ser más erodables (en color rojo), ya sea manteniéndolos cubiertos o con prácticas que propicien el aumento del contenido de materia orgánica (Gaitán, *et al.* 2017, p.19).

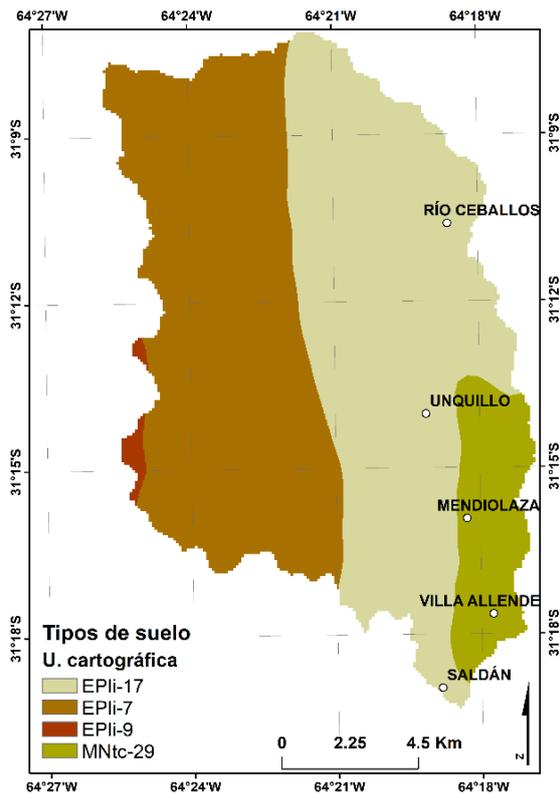


Figura 9: Mapa de tipos de suelo. Fuente: elaboración sobre la base de datos proporcionados por el INTA, 2017

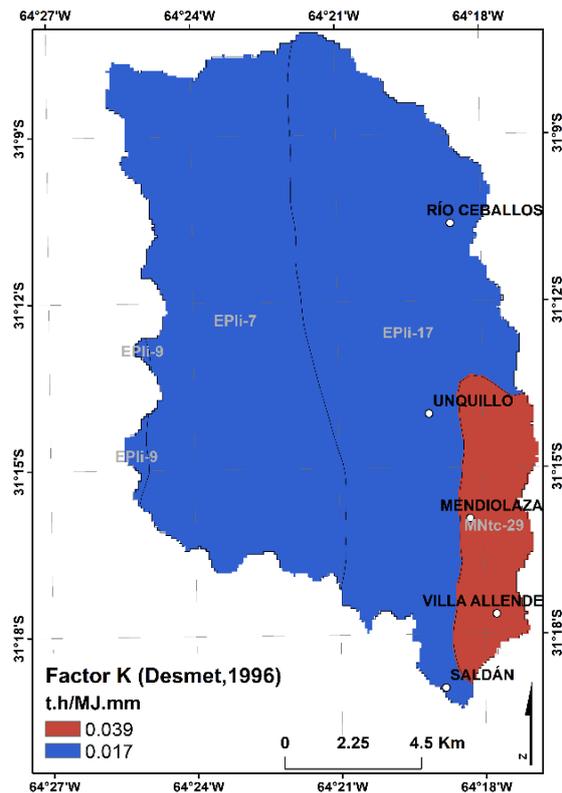


Figura 10: Mapa del Factor K. Fuente: elaboración sobre la base de datos proporcionados por el INTA, 2017

8.3. Factor LS: Topografía del terreno

Del procesamiento del factor LS realizado mayormente en un entorno SIG, se obtuvieron las características hidrológicas estudiadas. La Fig. 11 corresponde al modelo digital de elevación (DEM ASTER) como archivo raster de entrada para el procesamiento de las capas restantes. Este presenta para el área de la cuenca del arroyo Saldán, valores de altitud superiores a 458 msnm, alcanzando una altura máxima de 1.329 msnm hacia el sector noroeste. Las pendientes empinadas (alrededor de los 50 grados), se localizan en el sector centro y sudoeste de la cuenca, mientras que el sector sudeste correspondiente al área de expansión de la mancha urbana que es el de menor inclinación de la pendiente (Fig. 12). En relación a la pendiente, en esta figura puede identificarse los tipos de relieves accidentado a fuertes coincidentes con el color amarillo (pendiente entre 12 y 35° de inclinación), y los de pendiente muy fuerte a escarpada (>35°) en color rojo (Barbeito, *et al.* 2016).

El peso acumulado de todos los píxeles que fluyen hacia cada píxel con pendiente descendente, habiendo definido previamente la dirección del flujo según el descenso más empinado, permite observar en la Fig. 13 las áreas de flujo concentrado correspondiente a la red de canales en color blanco, entre los que se destaca el río Ceballos sobre el sector este y el río Saldán tributario en el sector sur. Los píxeles con una acumulación de flujo igual a cero son alturas topográficas locales.

A partir de los factores o subfactores L y S se determinó el efecto de la longitud y el grado de la pendiente en la proporción de pérdida de suelo, en relación con aquella que se produce en una longitud y grado de pendiente estándar 22,13 metros y 9 % respectivamente.

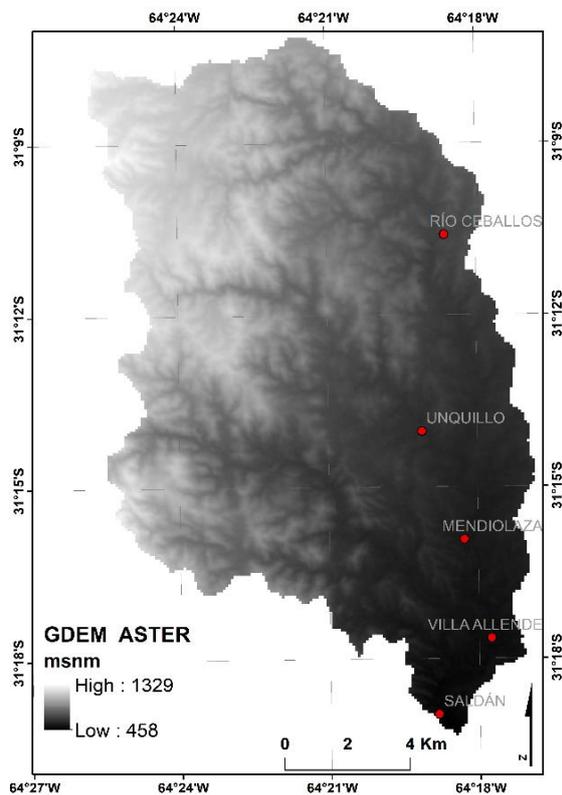


Figura 11: Mapa de las alturas del terreno. Fuente: elaboración sobre datos GDEM - ASTER.

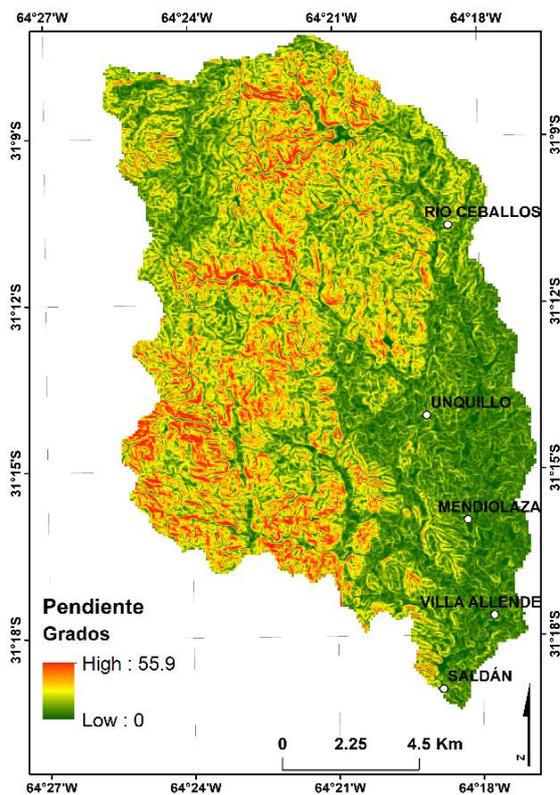


Figura 12: Mapa de pendientes. Fuente: elaboración sobre datos GDEM - ASTER

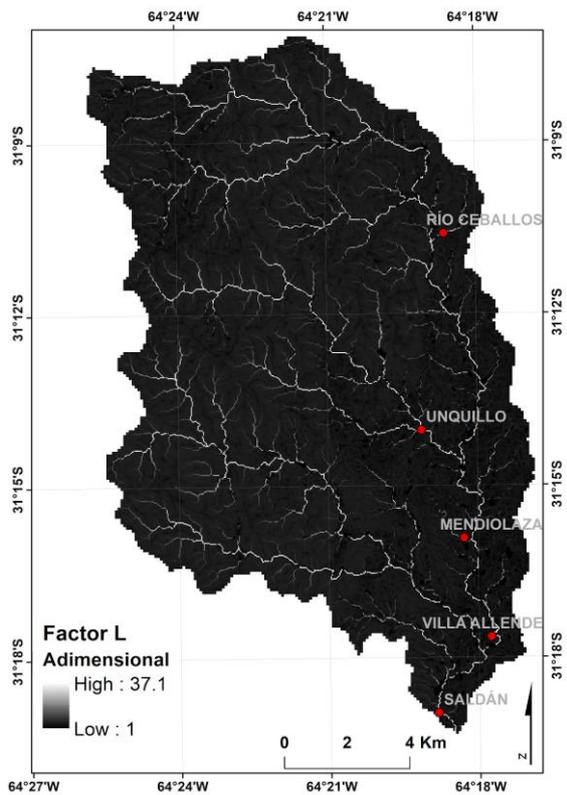


Figura 13: Longitud de la pendiente. En unidades adimensionales. Fuente: GDEM - ASTER.

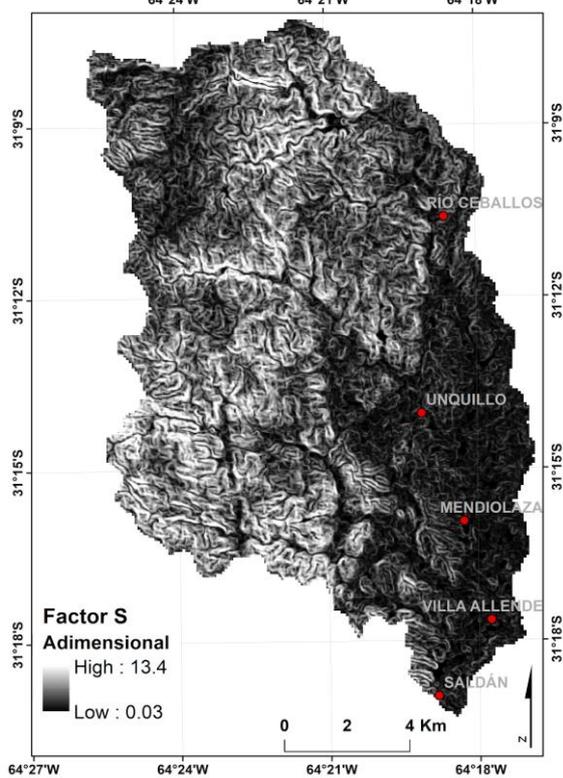


Figura 14: Inclinación de la pendiente según el grado. En unidades adimensionales. Fuente: elaboración sobre de datos GDEM - ASTER.

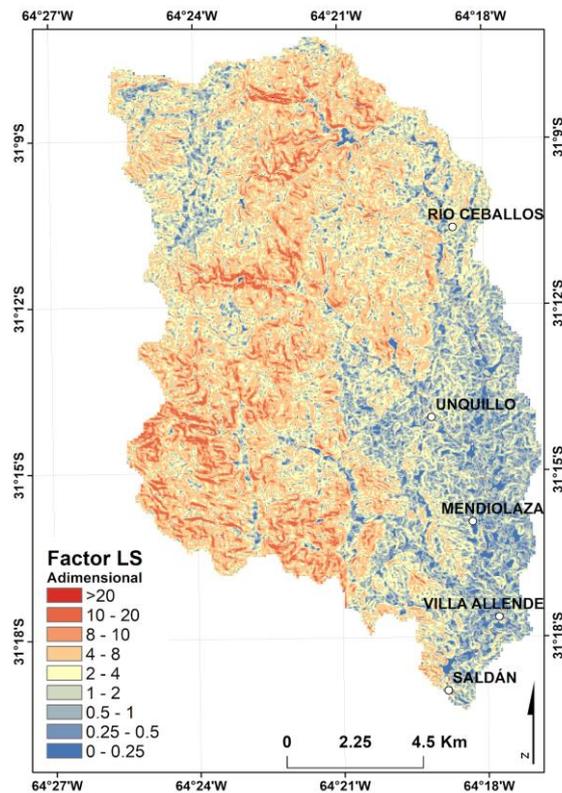


Figura 15: Conjugación de factores. En unidades adimensionales. Fuente: elaboración sobre de datos GDEM - ASTER.

Los mapas resultantes muestran valores adimensionales de entre 1 y 37.1 para el Factor L y entre 0.03 y 13.4 para el factor S (Fig. 13 y 14). El mapa LS (Fig. 15) muestra un rango de valores de entre 0 y 138.1, directamente proporcional al efecto que ocasiona la combinación de los estos factores sobre la tasa de erosión del suelo, los cuales fueron agrupados según los intervalos propuestos en Gaitán, *et al.* 2017, (p.23). Su composición arroja un resultado coincidente con las variaciones en la inclinación de la pendiente y los sectores de acumulación del flujo, cuyos valores bajos se concentran en las zonas más planas, localizadas mayormente hacia el este del área de la cuenca, en el extremo noroeste y en los sectores pedemontanos; mientras que los valores elevados se encuentran en los sectores montañosos del centro y sudoeste.

8.4. Factor C: Cobertura del terreno

8.4.1. Identificación y definición de las clases de cobertura vegetal⁷

De la interpretación de las imágenes satelitales, sustentada en los sistemas de globo virtual y en la bibliografía de referencia con la que se describió las condiciones geográficas del área, se logró diferenciar cuatro clases de cobertura vegetal denominadas de primer orden, por ser consideradas generales, representativas y contrastantes de acuerdo con la contribución de cada una en el proceso erosión del suelo. De las clases de primer orden se derivaron las de segundo orden o subclases referidas a ciertas especificaciones y definidas en función de la

⁷ Teniendo en cuenta la complejidad procedimental que se requiere para la identificación en terreno de cada una de las clases y a fin de evitar confusiones ligadas a especificaciones no corroboradas en campo, las consideraciones finales se plantearan en torno a las clases de primer orden, según lo explicitado en el marco de este trabajo; especialmente cuando se trata de la cobertura arbustiva, que se diferencian en la clase Matorral Serrano Denso y Matorral Serrano Ralo.

configuración local de la cobertura. A su vez, se agrega una clase que corresponde a la asociación de coberturas diferentes pero que influyen de igual manera sobre la erosión. Cabe aclarar que los parámetros a partir de los cuales se diferencian las clases son estimativos, y se evaluaron conforme a las características de la vegetación y a su aspecto aéreo.

Entre las clases de primer y segundo orden se distinguen: (Apéndice 5)

- Cobertura forestal
 - Bosque denso (BD): Predominio de formación arbórea con especies nativas o exóticas de alturas cercanas a los 6 metros, presencia de arbustos, maleza alta y frecuente afloramientos rocosos debajo del dosel. Cobertura aérea superior al 80% y cubierta del suelo superior al 75%. Localizada comúnmente sobre la falda oriental de las sierras entre los 500 y 1.000 msnm y en sectores de quebradas o ribereños. Distribución concentrada de forma areal y lineal.
- Cobertura arbustiva
 - Matorral serrano denso (MSD): Formación predominantemente arbustiva de altura media de 3 metros, con presencia de diversas especies, maleza alta y afloramientos rocosos. Cobertura aérea del dosel alrededor del 75% y cubierta superficial del 80% estimativamente, compuesta por pasto o material en descomposición. Localizada en zona pedemontana y próxima a la cobertura arbórea. Distribución concentrada areal.
 - Matorral serrano ralo (MSR): Predominio de formación arbustiva alrededor de los 3 metros en praderas con mosaicos de pastizales matojos y pedregosos. Cobertura aérea del dosel inferior al 50% y cubierta del suelo inferior al 20%, compuesta por pasto. Localizada en zonas de transición arbórea-herbácea. Distribución dispersa de forma areal.
- Cobertura herbácea
 - Pastizal mixto (PM): Predominancia herbácea de diversas alturas, con hojas delgadas y gruesas, desarrollo radicular, mezclados con céspedes hidromórficos, material en descomposición y pavimentos de roca. Cobertura aérea superior al 50% y superficial de entre 40% y 60% según la presencia de material en descomposición. Localizada en alturas superiores a los 1.000 msnm. o en la parte inferior de las concavidades que se inundan en la temporada de lluvias. Distribución concentrada de forma areal y lineal.
 - Pastizal ralo (PR): Mosaicos de suelo con profundidad alrededor de los 50 cm, donde la vegetación baja es difícilmente identificable de acuerdo a la resolución espacial de trabajo. Cobertura aérea menor al 25% y superficial de entre 20% y 30%, según la presencia de material en descomposición. Localizados mayormente en sectores de sierra superiores a los 1.000 msnm, de escasa vegetación, sectores de pastoreo, cultivo o deforestados/desmontados.
- Construcción y roca expuesta: Sectores de asentamiento urbano-rural, vías de acceso, canteras de extracción de mineral, afloramiento de roca o pavimentos de roca, con pequeños parches cubiertos de vegetación arbórea, arbustiva o herbácea. Localizada en sectores pedemontanos o en praderas pedregosas erosionadas.

8.4.2. Ejecución del clasificador y pruebas de confiabilidad

En el proceso de clasificación, las muestras (regiones de interés) tanto de entrenamiento como de validación tomadas a partir de diferentes combinaciones de bandas, arrojaron valores del coeficiente de separabilidad superiores considerados aceptables según el método de distancias de firmas de Jeffries Matus y la Divergencia Transformada, para todas las imágenes

de las que se obtuvieron las muestras (Apéndice 6 y 7). Las muestras de la imagen L5 (2005) dio un mínimo de 1.82 y 1.99 respectivamente; mientras que para la imagen L8 (2014) estos son 1.89 y 1.98 respectivamente. Asimismo, las muestras capturadas de las imágenes Sentinel 2A de 2016 y 2017, dieron como resultados un coeficiente mínimo de 1.87 y 1.83 respectivamente. El resto de las conjugaciones de clases presentan valores superiores a estos, razón por la cual se asume una separabilidad aceptable entre las muestras (Apéndice 8). Una vez ejecutada la clasificación Máxima Verosimilitud, se obtuvieron los mapas de cobertura del terreno, tanto para el estado inicial como para el final de cada corte temporal.

La comparación entre los resultados obtenidos de la clasificación y la naturaleza “real” del píxel para evaluar la precisión global (PrG), se realizó mediante la matriz de confusión implementando el grupo de muestras de validación (Apéndice 8). En la matriz de error (tabla 14 y 15), se ubican las clases de referencia (muestras de validación) en las columnas y la clasificación resultante de las muestras de entrenamiento en las filas. La diagonal de la matriz, que expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (Segura y Trincado, 2003), da cuenta que las clases de menor acuerdo corresponden a la cobertura arbustiva y al pastizal ralo, para las 4 clasificaciones realizadas. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Para las 4 clasificaciones, se obtuvo valores semejantes de precisión, superiores al 96%. La clasificación produjo un coeficiente Kappa general superior al 0.95 para todas las imágenes, esto indica que los píxeles que componen a los sitios de entrenamiento se clasificaron alrededor de un 95% mejor de lo que se esperaría de una asignación aleatoria.

Tabla 14: Matriz de error para la clasificación del 2005 (superior) y del 2014 (inferior). Valores expresados en porcentajes

Datos clasificados	Clases de referencias (muestras de validación)						Total, fila	Exactitud del usuario	Error de comisión
	BD	MSD	MSR	PM	PR	CR			
BD	100	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	13,5	100	0,8
MSD	0,0	94,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,8	94,0	0,0
MSR	0,0	5,1	96,5	0,0	2,1	0,0	9,1	96,5	14,9
PM	0,0	0,0	2,8	100	0,0	0,0	13,5	100	2,1
PR	0,0	0,0	0,7	0,0	94,8	0,2	21,1	94,9	0,3
CR	0,0	0,3	0,0	0,0	3,1	99,8	26,0	99,8	2,8
Total, columnas	100	100	100	100	100	100	100		
Exactitud del productor (%)	99,2	100	85,1	97,9	99,7	97,2			
Error de omisión (%)	0,0	5,9	3,5	0,0	5,1	0,2			
PrG (%) = 97,5						Kappa= 0,97			
Datos clasificados	Clases de referencias (muestras de validación)						Total, fila	Exactitud del usuario	Error de comisión
	BD	MSD	MSR	PM	PR	CR			
BD	98,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,2	100	0,0
MSD	0,0	98,1	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	100	0,0
MSR	0,0	0,3	92,9	0,0	0,8	0,0	7,7	97,1	2,9
PM	1,3	1,3	0,0	100	0,2	0,0	13,7	96,7	3,3
PR	0,0	0,0	7,4	0,0	90,6	0,0	20,7	97,3	2,7
CR	0,0	0,3	0,0	0,0	8,4	100	27,2	92,9	7,0
Total, columnas	100	100	100	100	100	100	100		
Exactitud del productor (%)	98,7	98,1	92,9	100	90,6	100			
Error de omisión (%)	1,3	1,9	7,1	0,0	9,4	0,0			
PrG (%) = 96,8						Kappa= 0,96			

Nota. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Landsat 5 y 8.

Tabla 15: Matriz de error para la clasificación del 2016 (superior) y del 2017 (inferior). Valores expresados en porcentajes

Datos clasificados	Clases de referencias (muestras de validación)						Total, fila	Exactitud del usuario	Error de comisión
	BD	MSD	MSR	PM	PR	CR			
BD	99,4	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	55,7	99,7	0,3
MSD	0,0	98,3	0,7	0,0	0,0	0,0	9,5	99,4	0,7
MSR	0,1	0,1	88,9	0,0	2,1	0,1	5,1	98,6	1,5
PM	0,3	0,0	4,2	99,2	0,0	0,1	11,5	96,2	3,8
PR	0,0	0,0	4,4	0,0	98,8	0,7	6,4	94,7	5,3
CR	0,2	0,3	1,9	0,8	1,0	99,1	11,9	97,1	2,9
Total, columnas	100	100	100	100	100	100	100		
Exactitud del productor (%)	99,4	98,3	88,9	99,2	98,7	99,1			
Error de omisión (%)	0,6	1,7	11,1	0,9	1,2	0,9			
PrG (%) = 98,6						Kappa= 0,98			
Datos clasificados	Clases de referencias (muestras de validación)						Total, fila	Exactitud del usuario	Error de comisión
	BD	MSD	MSR	PM	PR	CR			
BD	98,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	55,1	99,9	0,1
MSD	0,1	92,8	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	99,3	0,7
MSR	0,1	4,6	92,8	0,3	2,1	0,3	5,8	90,4	9,6
PM	0,8	0,1	3,3	99,1	0,0	0,0	11,6	94,6	5,4
PR	0,0	0,0	2,8	0,0	98,6	1,0	6,3	95,5	4,5
CR	0,5	1,8	0,9	0,6	1,4	98,6	12,7	94,6	5,4
Total, columnas	100	100	100	100	100	100	100		
Exactitud del productor (%)	98,6	92,8	92,8	99,1	98,6	98,6			
Error de omisión (%)	1,4	7,2	7,2	0,9	1,4	1,4			
PrG (%) = 97,7						K= 0,96			

Nota. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Sentinel 2A.

Los valores marginales en la matriz suponen errores de asignación. Los residuales en columnas, que indican la probabilidad de que un píxel de referencia sea correctamente clasificado, presentan el mayor error por omisión (exclusión) en la cobertura arbustiva para las 4 clasificaciones. La medida del error de omisión (Jensen, 1996 citado en Speranza y Zerda, 2005) da cuenta de los píxeles que en el terreno corresponden a una cobertura determinada y en el mapa no son asignados a esa clase. Los residuales en filas, que muestra la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa verdaderamente represente esa categoría en el terreno (Story y Congalton, 1986 citado en Speranza y Zerda, 2005), varían en todas las imágenes. La clasificación del año 2005 y la del 2017 presentan el mayor valor de error por comisión (inclusión) en la clase arbustiva, el año 2014 en la clase RC y el año 2016 en la clase PR. Se puede observar que la cobertura arbustiva presenta altos valores tanto en los errores de comisión (inclusión) como en los de omisión (exclusión).

Es posible que estos resultados sean relativos, por cuanto las muestras de validación no fueron tomadas en campo; pero cuando se tiene en consideración los objetivos de este estudio son aceptables, pues se busca probar las factibilidades en la ejecución *ex situ* del modelo.

8.4.3. Interpretación de los resultados

En lo concerniente a los resultados obtenidos, las clasificaciones de la cobertura del terreno realizadas para los cuatro años muestran algunas semejanzas con la clasificación propuesta por Gavier Pizarro y Bucher (2004), a excepción de determinadas clases no

identificadas a la resolución espacial trabajada, como ser la cobertura compuesta por bosque exótico. En la clasificación muestran las variaciones en la superficie ocupadas por las distintas coberturas del suelo durante el periodo 1970 - 1997 en amplios sectores abarcados por el área de la cuenca del arroyo Saldán.

Todos los mapas de cobertura resultantes manifiestan una división del área de la cuenca en tres sectores longitudinales diferenciados. Se distingue el desarrollo de la mancha urbana (clase CR) hacia el este y sobre el piedemonte; en el centro el predominio de la cobertura arbórea-arbustiva (clase BD, MSD y MSR), mientras que en la franja oeste es mayormente notorio el pastizal (PM y PR).

En la imagen del año 2005 (Fig. 16) se observa en los bordes de la mancha urbana la predominancia de la clase arbórea-arbustiva (BD y MSD) de gran extensión y distribuida de forma areal. Si bien, la clase MSR aparece en sectores pedemontanos distribuida de forma lineal, su mayor manifestación sigue un patrón de transición entre el MSD, el PM y el PR. Esta última ocupa mayormente el sector oeste del área de la cuenca, que coincide con las alturas superiores a los 1.000 msnm al igual que la clase PM, en la cual también se incluyó el césped hidromórfico que aparece visible en la parte inferior de las concavidades que se inundan en la temporada de lluvias.

La imagen del año 2014 (Fig. 16) manifiesta un cambio notorio en la distribución espacial de la cobertura arbustiva, tanto densa como rala. El MSR se desplazó concentrándose en el sector sudoeste del área de la cuenca, mientras que se redujo la mancha del MSD. Esto puede deberse en parte al desplazamiento de la clase BD sobre el MSD. Se observa también la expansión considerable de la clase PM hacia el sudeste, y la intensificación de las clases PR hacia el noroeste y CR en el este con tendencias hacia la parte central del área de la cuenca. Del análisis de las variaciones edafológicas se distinguen, con excepciones en las Pampas de Altura, en algunos valles y laderas bajas, que los suelos de las sierras están afectados por afloramientos de roca y rocas en superficie.

Como los contrastes entre la cobertura vegetal del 2016 y 2017 (Fig. 17) son el resultado de las variaciones acaecidas durante un año, resulta difícil aceptar una pérdida del suelo de tal magnitud cuando no se reconoce alguna causa natural o antrópica sobresaliente en ese periodo. No obstante, es innegable la expiación del pastizal mixto en el sector noroeste y la intensificación de la mancha urbana principalmente en el sector entre Unquillo y Mendiolaza.

8.4.4. Detección de cambios

Al evaluar los cambios entre ambas clasificaciones mediante la herramienta *Change Detection Statistics* de ENVI 4.8, pudieron obtenerse estimaciones parciales respecto de las transformaciones ocurridas sobre el terreno durante los cortes temporales 2005-2014 y 2016-2017. Se observa que las dinámicas de cambio para ambos cortes temporales, dan cuenta de una redistribución espacial significativa de las clases, más aún si se considera el transcurso de un año entre el estado inicial y el estado final del segundo corte temporal. Al respecto, previa interpretación de los resultados, es necesario subrayar que esto puede deberse mayormente a errores procedimentales asociados a la definición de cada una de las coberturas, a la especificidad con la que se trabajó para la diferenciación y a la clasificación, que a los cambios reales.

Para el periodo 2005-2014 (Tabla 16), las cifras que representan el área de cambio expresada en hectáreas muestran que la clase más afectada es la arbustiva. Del total del área clasificada como MSR en el estado inicial (7.710,7 ha), en el estado final sufrió una reducción del 41%, cuya transformación derivó mayormente en PM (28,5%). De igual manera, la clase MSD que contaba con 6.410,9 ha en el estado inicial, en el final obtuvo sólo 4.710,9 ha. El 19% de esta clase pasó a ser PM.

El área de BD también se redujo a favor del PM con un aporte del 20% sin embargo, el primer aporte elevado (26%) que redujo la clase BD benefició a sectores del MSD con un factor C semejante. Constituye otro aporte positivo, el área clasificada como MSR que derivó en MSD en el estado final (387,8 ha), siendo el MSR y el BD las únicas clases que aportan a esta significativamente.

El área clasificada como pastizal PM manifestó un crecimiento mayor al doble del estado inicial, pasando de 2.339,6 ha a 6.618,9 ha en el estado final. Si bien esto podría ser favorable considerando que las clases como MSR y PR que derivaron a PM con aportes elevados tienen un factor C superior, existe un impacto negativo en los sectores donde afectó a las clases BD y MSD, cuyos valores de cambio antes mencionados también son elevados.

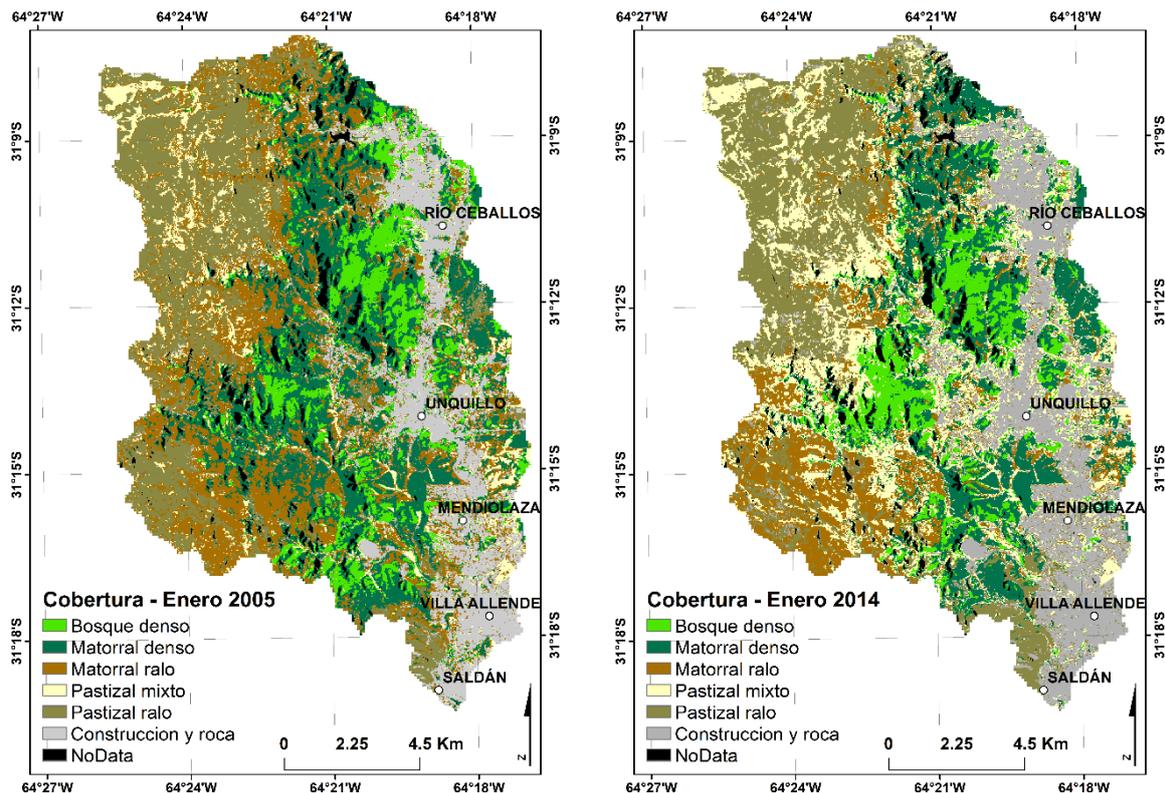


Figura 16: Cobertura del terreno 2005 y 2014 del área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014. Fuente: elaboración sobre la base de imágenes satelitales Landsat 5 y 8. Resolución espacial 30 m

Los sectores clasificados como PR manifiestan un crecimiento bajo (3%) y mientras que se considera moderados para la clase CR (20%) en comparación con los cambios tanto negativos como positivos producidos en el resto de las clases. Sin embargo, son notables los cambios de ambas clases en detrimento del MSD, MSR y PM. Aunque estas últimas poseen un factor C superior al de la clase CR (siendo esta poco influyente en el proceso de erosión del suelo), las cifras dan cuenta del avance de la mancha urbana sobre el piedemonte y de la reducción de la vegetación en los bordes. Cabe destacar que la clase PR también presenta una dinámica de intercambio significativa respecto de las clases PM y MSR, ya que generó un aporte positivo del 13% equivalente a 933.7 ha a favor de la primera y del 11% equivalente a 798.6 ha a favor de la segunda.

Para el segundo corte temporal (Fig. 17), la cobertura correspondiente a enero de 2016 (estado inicial), permite visualizar en el sector sudoeste un retroceso del matorral (MSD y MSR), que se profundiza para el año 2017 (estado final). Al cabo de un año, podría decirse que

el MSD se redujo notablemente en el sector centro-este, entre las localidades de Unquillo y Mendiolaza. En sectores hacia al sur, cercano al Villa Allende y en el centro-oeste también se ve afectado el BD. A excepción de este caso (en el que la clase de reemplazo del BD es el MSD), en el resto la clase de reemplazo es el pastizal ralo.

Tabla 16: Detección de cambio 2005 - 2014. Valores expresados en hectáreas

		Estado inicial (2005)							
		BD	MSD	MSR	PM	PR	CR	Máscara	Clase total
Estado final (2014)	BD	1.232,5	774,6	43,4	20,3	0,8	4,9	0,0	2.076,4
	MSD	677,4	3.419,2	387,8	34,5	134,7	55,4	0,0	4.710,9
	MSR	48,9	271,3	2.966,5	270,8	798,6	208,4	0,0	4.564,4
	PM	530,8	1.198,3	2.194,2	1.271,3	933,7	490,8	0,0	6.618,9
	PR	19,3	437,5	1.433,1	325,7	5.194,1	339,2	0,0	7.748,8
	CR	143,2	310,1	685,7	415,2	391,9	3.340,3	0,0	5.286,3
	Máscara	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.191,8	1.191,8
	Clase total	2.652	6.410,9	7.710,7	2.339,6	7.453,7	4.438,8	1.191,8	
	Cambio	1.419,6	2.991,7	4.744,2	1.068,4	2.259,6	1.098,5	0,0	
	Diferencia	-575,6	-1.699,9	-3.146,3	4.279,3	295,1	847,4	0,0	

Nota. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Landsat 5 y 8. En verde las cifras que implican un incremento de las clases con valores de C menor.

Por el contrario, el norte de la cuenca no presenta modificaciones observables en la cobertura arbórea-arbustiva, pero si en el pastizal que aumenta considerablemente. Esta clase, es imperceptible en otros sectores, debido a que en el proceso de clasificación la identificación de la vegetación arbustiva incluye formaciones herbáceas dispersas.

Al evaluar los cambios (Tabla 17) ocurridos entre el año 2016 (estado inicial) y el 2017 (estado final), las cifras que representan el área de cambio expresada en hectáreas dan cuenta que las clases de mayor cambio son el BD y la de PR. El BD sufrió un cambio negativo del 39%, de contar con más de 4.000 ha en el estado inicial, al cabo de un año se redujo alrededor de 2.500 ha, que fueron reemplazadas en su mayoría por el MSD con el 25%. Mientras que la clase PR, creció de 7.000 ha a más de 8.700 ha, implica un incremento de 25%.

La clase MSR, aunque presenta la mayor tasa de cambio, sufrió reducciones considerables y en su mayoría a causa de la expansión de la clase PR que avanzó sobre casi 2.000 ha (29%), seguido por la clase CR (9%). Esta última se vio favorecida mayormente por las clases correspondiente al matorral (MSD y MSR) que aportaron cerca de 1.200 ha, posibilitando un crecimiento de 5.744 ha en el estado inicial, a 6.333 ha en el estado final. A diferencia de los casos observados en el primer corte temporal, el PM no presenta cambios contrastantes. Se observa un cambio positivo en detrimento de la clase PR de 546 ha, que se hacen visibles en el sector noroeste de la cuenca antes mencionado.

En términos generales, se observa que los mayores cambios detectados se produjeron de clases cuyo factor C es más elevado hacia clases de menor factor. Gran parte del BD derivó en MSD, el cual derivó en MSR y este a su vez en la clase PR. Mientras que el PM derivó en MSR. Esta dinámica se interpreta por las cifras resaltadas en color rojo intenso (Tabla 17). Este tipo de cambio preeminente, específicamente los que refieren al crecimiento de la clase BD (de 4.133,5 ha a 2.529,1 ha) y PR, advierten atender posibles errores de clasificación.

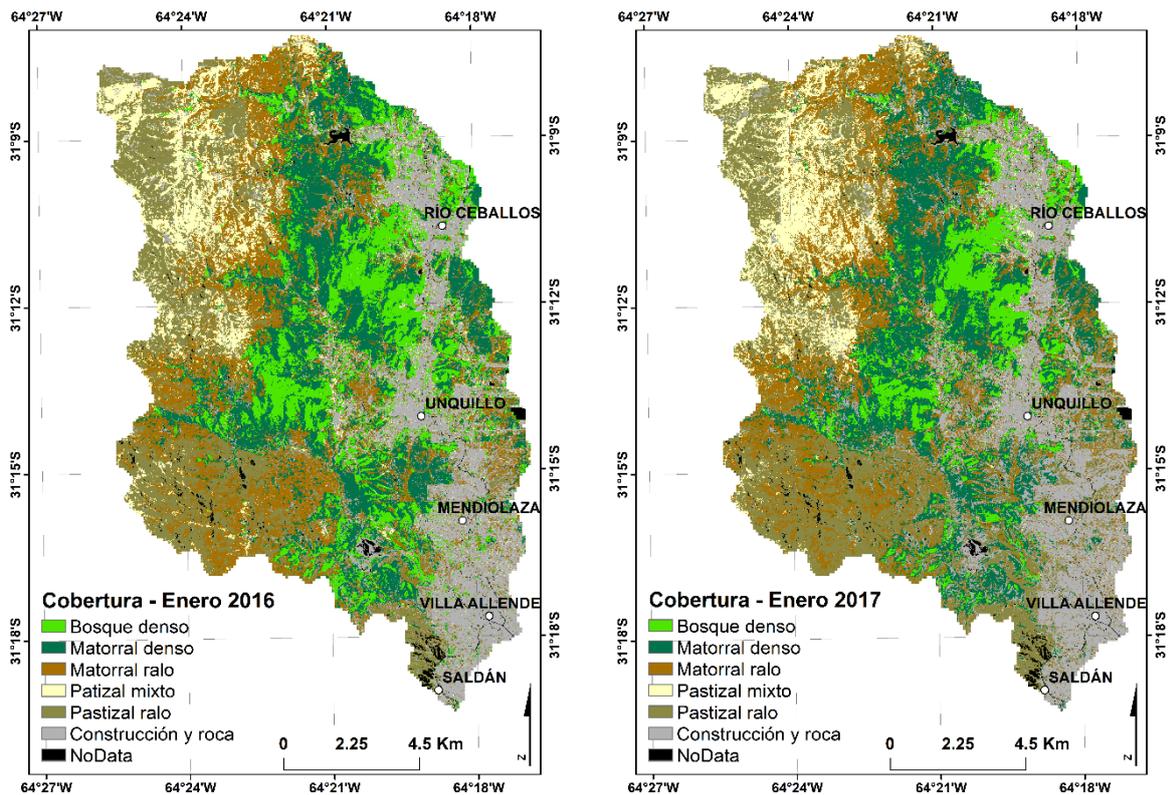


Figura 17: Cobertura del terreno 2016 y 2017 del área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016 Derecha: enero/2017. Fuente: elaboración sobre la base de imágenes satelitales Sentinel 2A. Resolución espacial 10 m.

Tabla 17: Detección de cambio 2016 – 2017. Valores expresados en hectáreas.

		Estado inicial (2016)							
		BD	MSD	MSR	PM	PR	CR	Máscara	Clase total
Estado final (2017)	BD	2.164,8	301,7	25,1	15,5	0,1	21,8	0,0	2.529,1
	MSD	1.006,4	3.737,6	365,1	15,6	12,4	158,9	0,0	5.296,1
	MSR	387,2	608,8	3.361,2	495,9	615,8	451,5	0,0	5.920,5
	PM	166,5	16,3	359,7	1.472,1	546,6	1725	0,0	2.733,6
	PR	31,7	121,4	1.949,9	326,5	5.449,9	917,1	0,0	8.796,5
	CR	376,8	599,9	573,2	365,1	395,8	4.022,2	0,0	6.333,1
	Máscara	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	574,6	574,6
Clase total		4.133,5	5.385,6	6.634,1	2.690,8	7.020,7	5.743,9	0,0	
Cambio		1.968,7	1.648,1	3.272,9	1.218,7	1.570,7	1.721,8	0,0	
Diferencia		-1.604,5	-89,6	-713,5	42,8	1.775,8	589,1	0,0	

Nota. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Sentinel 2A. En verde las cifras que implican un incremento de las clases con valores de C menor y en rojo las que no, producto del incremento de las clases con valores de C alto.

8.4.5. Asignación del factor C

El factor C que considera la influencia debida al tipo de vegetación existente en el terreno y a la disposición de los residuos que produce sobre el suelo (Wischmeier y Smith, 1978 citado en González del Tánago, 1991), fue determinado para cada clase según las tabulaciones presentadas por autores que tienen en cuenta el porcentaje de cobertura de las copas o parte aérea y los de la vegetación en contacto con el suelo o parte superficial, tratándose mayormente de un tipo de vegetación permanente (González del Tánago, 1991). Tabla 18

La asignación de los valores del factor C a cada una de las clases, posibilitó la elaboración de los mapas del factor C. La variable color da cuenta de la gravedad del grado de protección del suelo de cada una de las clases frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando la energía de las gotas de lluvia que llegan a la superficie del suelo y la velocidad de la escorrentía.

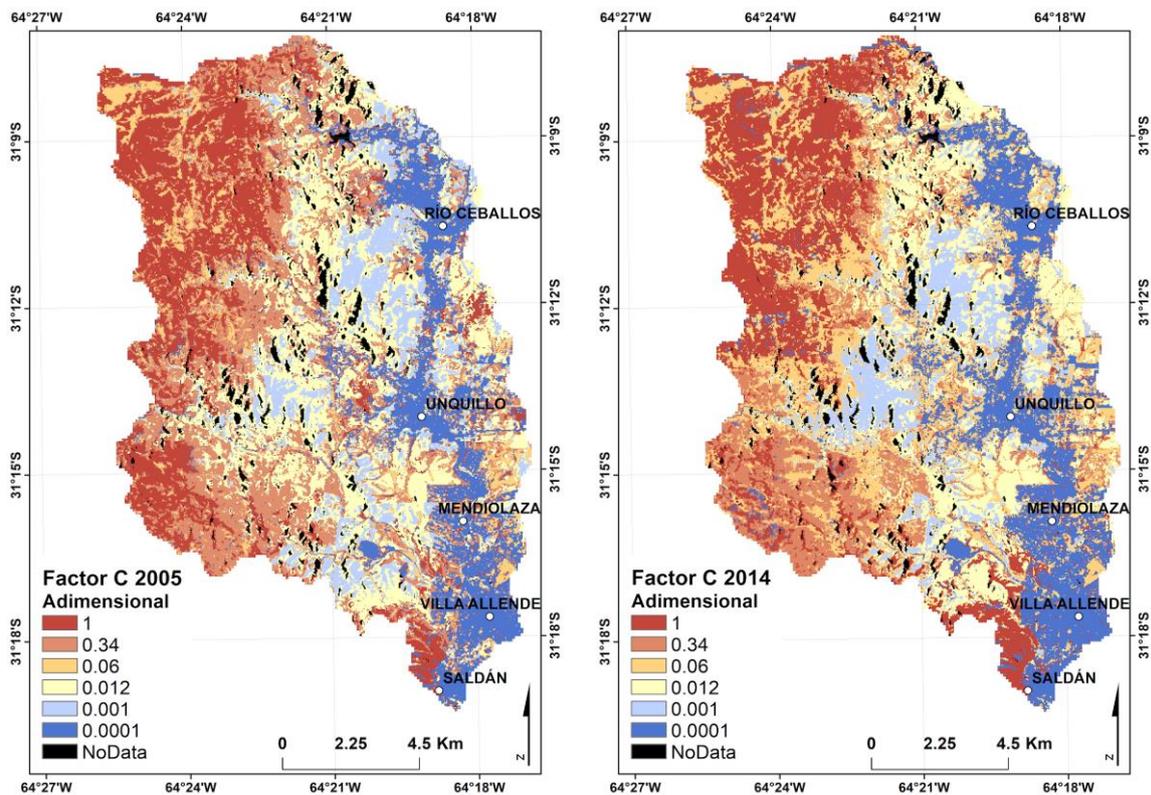


Figura 18: Factor C 2005 y 2014. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014. Fuente: elaboración a partir de Wischmeier y Smith, 1978 citado en González del Tánago, 1991.

En los mapas (Fig. 18 y 19) se observa los valores más elevados ubicados en el sector noroeste y otros sectores correspondiente a la clase PR, con un gradiente de disminución hacia el este, donde aparece la mancha urbana con los valores más bajos, puesto que el cemento y la roca expuesta se consideran superficies difícilmente erosionables. Es contrastante la presencia de sectores puntuales con valores del factor C elevado, como en la zona central y sur. En negro aparecen los sectores enmascarados por tratarse de cuerpos de agua y sombra; y en blanco se puntualizó la localización de las ciudades municipales del área de la cuenca del arroyo Saldán.

Tabla 18: Asignación del factor C según las clases definidas en el área de la cuenca del arroyo Saldán.

Clase de primer orden	Rango factor C	Clase de segundo orden	Factor C	Fuente
Cobertura forestal	0,0001 a 0,009	Bosque denso mixto	0,001	Díaz, 2006; Mancilla Escobar, 2008.
Cobertura arbustiva	0,003 a 0,0078	Matorral serrano denso	0,012	López Santos, <i>et al.</i> 2012; Bueno Hurtado, <i>et al.</i> 2016; Mancilla Escobar, 2008.
	0,08 a 0,4	Matorral serrano ralo	0,34	Bewket y Teferi, 2009
Cobertura herbácea	0,035 a 0,076	Pastizal denso mixto	0,07	López Santos, <i>et al.</i> 2012, Bueno Hurtado, <i>et al.</i> 2016; Mancilla Escobar, 2008.
	0,2 a 0,45	Pastizal ralo	1	López Santos, <i>et al.</i> 2012; Bueno Hurtado, <i>et al.</i> 2016.
Construcción y roca expuesta	-	Construcción y roca expuesta	0.0001	-
NoData	0	Cuerpos de agua, nubes y sombras.	0	Anaya, (2007)

Nota. Fuente: elaboración propia.

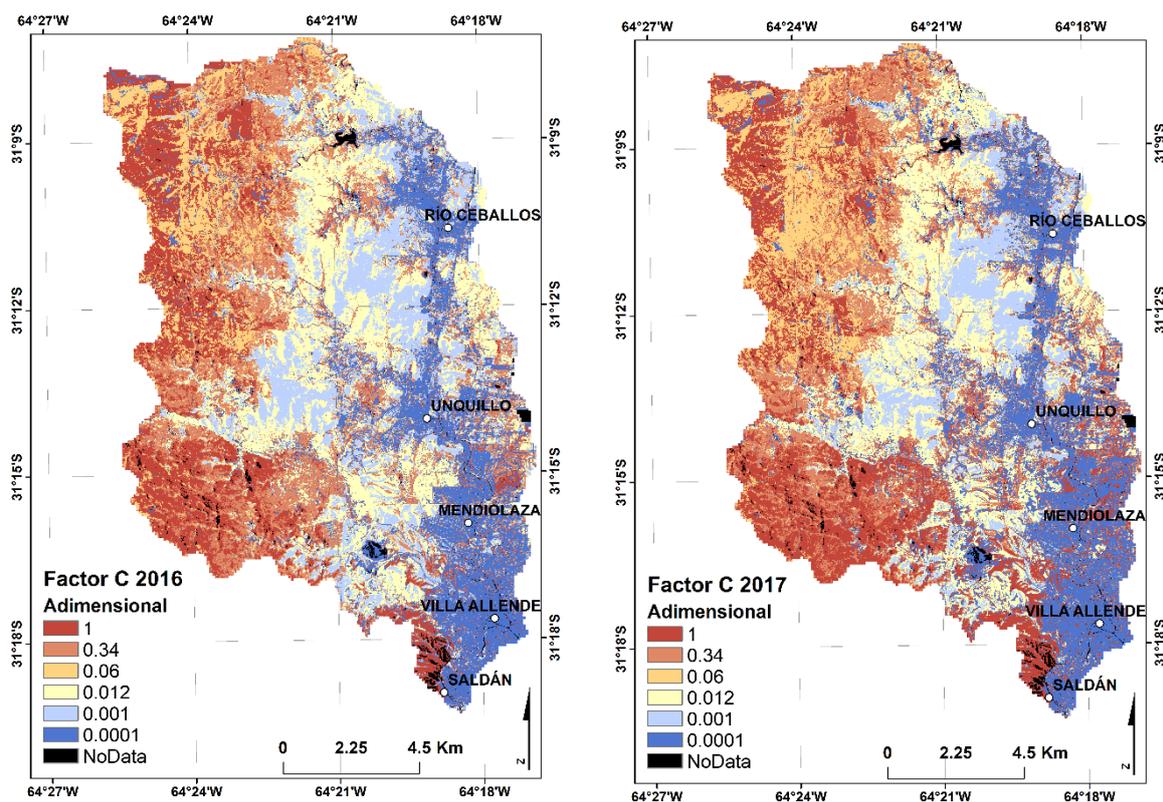


Figura 19: Factor C 2016 y 2017. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016. Derecha: enero/2017. Fuente: elaboración a partir de Wischmeier y Smith, 1978 citado en González del Tánago, 1991

8.5. Factor A: Pérdida del suelo por unidad de área y tiempo

La pérdida del suelo por hectárea se calculó para los años 2005, 2014, 2016 y 2017. Para describir la magnitud del fenómeno en los mapas resultantes (Fig. 20 y 21) los valores del factor A fueron agrupados en intervalos de acuerdo con la bibliografía de referencia (Gaitán, *et al.* 2017, p.26). Respecto de los datos obtenidos, se considera que la adaptación del factor A se ve comprometida por valores extremos que ensanchan el rango a cifras superiores a los 200 t/ha·año, pero de muy baja frecuencia.

La distribución de los datos (Apéndice 9) evidencia la concentración hacia valores bajos, que se atribuye al peso de los datos correspondientes a los sectores urbanos y a los sectores de vegetación densa en el área. Sin embargo, si se consideran los valores de la media estimada en torno a las 10 t/ha·año para todos los casos, se encuentran dentro del rango en el que se ubica aproximadamente el sector de Sierras Chicas (5 - 10 t/ha·año). El rango abarca el 15% del territorio provincial según lo establecido en la cartografía a menor escala por la bibliografía de referencia (Apéndice 10).

Al analizar los cambios producidos, la compensación entre los factores del modelo dificulta diferenciar la tasa de erosión entre los sectores clasificados como CR y los sectores provistos de vegetación, que pertenecen al mismo intervalo del factor A. Esto es, sectores con mayor factor C y mayor inclinación de la pendiente (factor LS) correspondiente a las clases de vegetación de altura en comparación a las de CR, presentan un factor A semejante dado que se compensa por la presencia de suelos más resistentes cuyo factor K es menor.

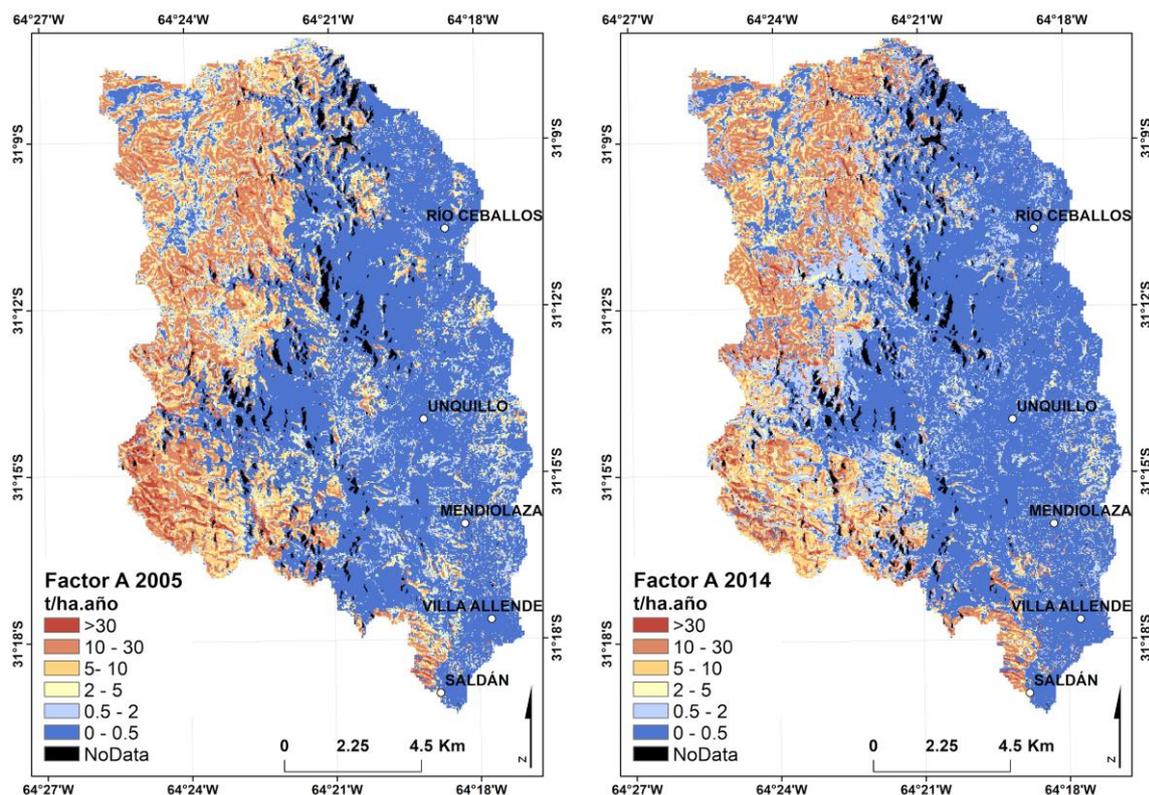


Figura 20: Factor A 2005 y 2014. Pérdida de suelo expresada en toneladas por hectárea por año. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2005. Derecha: enero/2014. Fuente: elaboración a partir de enfoque híbrido

El cálculo de la superficie abarcada por cada intervalo (Tabla 19), da cuenta del predominio de los sectores con valores bajos y una distribución de entre 2.000 y 3.000 ha para el resto de los intervalos. A su vez, posibilita hablar de una reducción del área que se erosiona por encima de las 5 t/ha·año, es decir que alrededor de 1.200 ha han reducido la tasa de erosión por debajo de las 2 t/ha·año entre 2005 y 2014.

Tabla 19: Cálculo de la superficie por cada intervalo de erosión del suelo para el año 2005 y 2014. Área de la cuenca del arroyo Saldán.

Rango de magnitud factor A (t/ha·año)	Superficie (ha) 2005	Superficie (ha) 2014	Área de cambio=estado final-estado inicial
>30	332,4	272,4	-60
11 a 30	2.987,2	2.805,1	-182,1
5 a 10	2.471,3	1.983,1	-488,2
2 a 5	1.944,6	1.444,1	-500,1
0.5 a 2	1.623,8	2.784,8	11,1
0 a 0.5	11.015,2	11.079,7	64,5
NoData	615	615	0

Fuente: elaboración en entorno SIG.

Al igual que los mapas del primer corte temporal, en el segundo no se distinguen diferencias contrastantes entre ambos (Fig. 21). Sin embargo, el cálculo de la superficie manifiesta una inversión en el comportamiento de las diferencias entre el estado inicial y el estado final (Tabla 20). Pues, al cabo de un año las cifras dan cuenta de un incremento de más de 600 ha que se erosionan por encima de las 2 t/ha·año.

Tabla 20: Cálculo de la superficie por cada intervalo de erosión del suelo para el año 2016 y 2017. Área de la cuenca del arroyo Saldán.

Rango de magnitud factor A (t/ha·año)	Superficie (ha) 2016	Superficie (ha) 2017	Área de cambio=estado final-estado inicial
>30	1.347,9	1.453,7	105,8
11 a 30	2.933,2	3.104,4	171,2
5 a 10	1.734,7	1.754,4	19,7
2 a 5	1.267,8	1.366,3	98,5
0.5 a 2	1.856,6	2.094,1	237,5
0 a 0.5	11.655,8	11.018,3	-637,5
NoData	228,4	228,4	0

Fuente: elaboración en entorno SIG.

Las diferencias entre ambos cortes temporales que se manifiestan en un comportamiento inverso -mientras que en el primero hubo un incremento de los valores bajos de erosión del suelo (tabla 19) y en el segundo un incremento de los valores elevados (tabla 20)- puede atribuirse a las diferencias existentes en el factor erosividad de la lluvia (R), dados que los valores de PMA para el primer corte temporal son menores respecto de los obtenidos mediante las estaciones meteorológicas.

De los intervalos establecidos según la bibliografía de referencia (Gaitán, *et al.* 2017), se corresponde la siguiente escala de valor: se considera una erosión nula a ligera los valores menores a 10 t/ha·año; erosión moderada donde se presentan valores de entre 10 y 50 t/ha·año; y alta cuando es superior a 50 t/ha·año.

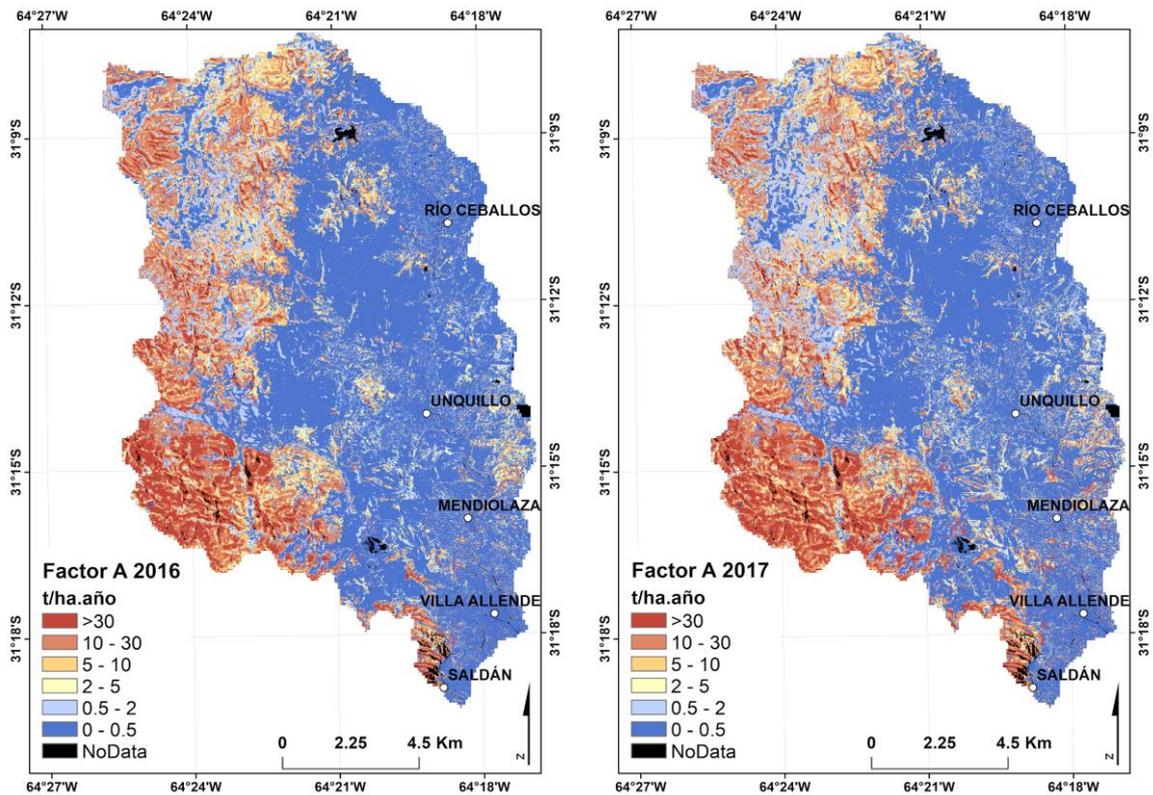


Figura 21: Factor A 2016 y 2017. Perdida de suelo expresada en toneladas por hectárea por año. Área de la cuenca del arroyo Saldán. Izquierda: enero/2016. Derecha: enero/2017. Fuente: elaboración a partir de enfoque híbrido

9. Consideraciones finales

En el área de estudio, los cambios en la cobertura vegetal ocurridos en los distintos paisajes están relacionados principalmente con la disminución y pérdida de los ecosistemas de bosque y matorral. Los resultados presentados, salvando los errores discutidos, muestran que efectivamente este territorio ha experimentado un proceso de deforestación en el que resalta la tasa de decremento de la cobertura arbustiva. Este comportamiento se asocia a la expansión urbana y a espacios destinados a la práctica de actividades relacionadas con el sector pecuario en terrenos con vocación forestal. Para los cuatro casos, el sector este aparenta una reducción de valores elevados de erosión del suelo, lo cual no es producto solamente de un incremento de la vegetación sino de la intensificación de la mancha urbana. Mientras que la reducción de estos mismos hacia el sector oeste se atribuye a la expansión de la clase PM en detrimento del resto de las clases de cobertura del terreno. Los sectores de incremento de la erosión se manifiestan de forma puntual/localizada. Entre estos, se hace notorio el aumento de la erosión en el sector sudeste del área de la cuenca, próximo a las localidades de Saldán y Villa Allende.

Por otra parte, si se analiza la tolerancia⁸ de pérdida de suelo que depende de su génesis y profundidad (Cisneros *et al.*, 2012 citado en Gaitán, *et al.* 2017), aproximadamente 4.000 ha para el primer corte temporal y 6.000 ha para el segundo (ubicadas en el sector sudoeste de la cuenca) exceden los límites tolerables⁹, los cuales fluctúan entre 4 a 20 t/ha·año (Kirby y Morgan, 1994 citado en Gaitán, *et al.* 2017). Aunque existen otros autores que proponen rangos distintos, todos rondan las 10 t/ha·año.

⁸ Tasa máxima de erosión que permite mantener un alto nivel de productividad. Las tasas de tolerancia mayores corresponden a suelos profundos de zonas húmedas y las tolerancias más bajas a suelos someros de zonas áridas.

⁹ Cuando la tasa de erosión está por encima de la tasa de formación del mismo suelo.

Capítulo 4

10. Conclusiones

Es evidente que el uso de técnicas de percepción remota, puede tener aplicaciones que permitan realizar estudios indirectos para comprender diversos fenómenos que ocurren en el espacio geográfico. Tal es el caso de este trabajo, en el que se evaluó la distribución de la tasa de erosión del suelo según los cambios en la cobertura vegetal aplicando el modelo RUSLE (ecuación universal de pérdida de suelo revisada) para el periodo 2005-2017 en el área de la cuenca del arroyo Saldán. Ante esta situación, fue necesario poner en prácticas diversas técnicas de recolección y análisis de datos basadas en metodologías combinadas para la adaptación de los factores del modelo a las características locales.

Al evaluar la distribución espacial de los cambios en la tasa de erosión del suelo por medio del modelo RUSLE, no se distinguen grandes alteraciones a la escala geográfica trabajada para ambos cortes temporales (2005-2014 y 2016-2017). Con una notable variación temporal del factor C (cobertura del terreno) no evidenciada en los mapas del factor A (tasa de erosión del suelo), se infiere que los grandes cambios detectados en la cobertura del terreno se manifiestan débilmente en la tasa de erosión del suelo. No obstante, esto no se refiere a la influencia que tiene el factor aisladamente sobre el proceso, sino al carácter compensatorio entre los factores, cuyo peso dependerá de la relación holística que se mantenga.

La conformación de cada factor involucrado en el modelo RUSLE y su relación directamente proporcional, luego de considerar a las precipitaciones como el principal agente activo (González del Tánago, 1991), facilitó la comprensión de la influencia de cada uno de ellos sobre la erosión del suelo en el área de la cuenca del arroyo Saldán. Por ejemplo, los valores más elevados del factor A, localizados hacia el sector oeste y coincidentes con altitudes elevadas y pendientes abruptas, dan cuenta del peso del factor LS (Longitud y grado de inclinación de la pendiente) por encima del resto y de cómo este otorga mayor significado a los cambios de cobertura en dicho sector.

Encarar el estudio temporo-espacial desde un modelo que proporciona el valor promedio de un periodo representativo de años, ante determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos, permitió distinguir los sectores mayormente afectados, vulnerables y aquellos donde el proceso de erosión posee mayor dinamismo.

10.1. Acerca de los resultados obtenidos para el área de la cuenca

El área de la cuenca del arroyo Saldán se divide en dos sectores longitudinales definidos por los valores extremos y contrastantes. Las áreas extensivas en el oeste y las puntuales sobre el piedemonte que se visualizan por una pequeña atenuación en la tasa, son las que tienen niveles de erosión alto y, en consecuencia, mayor vulnerabilidad debido a elevadas pendientes y mayor erosión de la lluvia. Sin embargo, se observan diversos sectores que, aunque poseen menor nivel de erosión presentan mayor dinamismo, esto producto de las alteraciones producidas en la cobertura vegetal entre un estado y otro.

A fin de analizar en qué medida los cambios de la cobertura vegetal contribuyen en el proceso de erosión del suelo, sin quitar relevancia a los sectores más afectados por este, se centró la atención en aquellos sitios donde se observa cierto dinamismo entre un estado y otro de cada corte temporal, pues son los que se consideran susceptibles a los cambios del factor C. Pudiendo a través de estos a afirmar la hipótesis de partida.

Los cuatro mapas del factor A, a escalas geográficas mayores, muestran tres sectores puntuales, cuyo interés se acrecienta si se reconoce su susceptibilidad a ser alterados de modo directo por prácticas antrópicas:

1. El extremo sudeste alrededor de los 31°18' Sur y 64°19' Oeste: sector que manifiesta un incremento de la tasa de erosión superior a las 5 t/ha·año, donde el área afectada se expande por el contorno sur y tiende hacia los límites de la mancha urbana de las localidades de Saldán y Villa Allende.
2. El sector sudoeste alrededor de los 31°15' Sur y 64°22' Oeste: presenta un incremento de la tasa de erosión de entre 0,5 a 2 t/ha·año durante el primer corte temporal (2005-2014) y se acentúa en torno a las 10 t/ha·año en el segundo corte temporal (2016-2017).
3. Alrededores del dique La Quebrada (31°9' Sur y 64°21' Oeste): sectores que han disminuido el nivel de erosión del suelo, pero a causa de la expansión de la mancha urbana, cuyo factor C es inferior al de la cobertura vegetal.

En términos generales, es posible observar como el matorral va ganando terreno sobre otras oberturas vegetales. La mayor parte de la cuenca presenta inestabilidad en los sectores cubiertos por formaciones arbustivas, constituyendo el área donde el uso y manejo de los suelos deben decidirse por una planificación cuidadosa, ya que los procesos de erosión son dinámicos. La clase arbórea, en menor medida, se ve afectada principalmente en el sector central del área de la cuenca (entre los 31°13' S y 31°14' S; 64°23' O y 64°24' O), correspondiente a la Reserva Hídrica y Recreativa Natural Los Quebrachitos. Este resultado requiere especial atención, ya que esta cobertura vegetal suele presentarse en áreas de sucesión ecológica provocadas por prácticas antrópicas. Aunque por la diferencia en la resolución espacial entre ambos cortes temporales, no es conveniente establecer comparaciones puntuales de forma continua desde 2005 a 2017, es posible visualizar dos grandes rasgos: a) el incremento de la mancha urbana y b) la reducción de la vegetación.

Los cambios detectados para ambos cortes temporales presentan concordancias con las tendencias predichas hasta 2020 por bibliografía de referencia. En esta se plantea, según la tasa de deforestación observada durante el periodo de estudio, que la cubierta boscosa sigue la tendencia de una función exponencial negativa, por cuanto a medida que la cantidad de bosque sea menor y se ubique en zonas inaccesibles, la tasa de deforestación debería disminuir (Gavier Pizarro y Bucher, 2004). Esto se observa en la imagen de enero de 2017, en la que fragmentos de bosque denso quedan relegados a zonas con mayor pendiente.

Hay un aspecto difícil de visualizar en la escala trabajada, la situación de la cobertura vegetal requiere mayor atención en los sectores pedemontanos y contornos urbanos. Con esto, no sólo está en riesgo la conservación de la superficie actual, sino también los corredores biológicos que permiten la conectividad entre parcelas forestales existentes. Los estudios sobre sectores urbanos, a partir de los cuales se sostienen que el proceso de urbanización se ajusta a una función exponencial demuestran que, si se extrapola esta función al año 2020, el área urbana alcanzaría alrededor de 6.000 ha (Gavier Pizarro y Bucher, 2004, p.20). Esta estimación es consistente con el área ya loteada y autorizada en 2003, de las cuales 3.330 ha se ubican en la Sierra y con el área de construcción y roca expuesta detectada para enero de 2017, que supera las 6.000 ha., salvando el área correspondiente a canteras y otra roca expuesta.

En este contexto, se infiere que, si se reduce la cobertura vegetal densa en sectores de pendientes abruptas, sumado a la predominancia de suelos con baja estabilidad en sus agregados, el escaso desarrollo del drenaje y la creciente ocupación y uso del suelo sin planificación, se forman condiciones que propician la exposición de las poblaciones pedemontanas ante las consecuencias de la erosión hídrica.

En el informe sobre “Riesgos en Sierras Chicas ante los cambios de uso del suelo” publicado por Barchuk (2015), se documentó sobre el impacto de la inundación sucedida el 15 de febrero de 2015 en las localidades de Sierras Chicas (Rio Ceballos y zona del dique La Quebrada, Mendiolaza, Unquillo y Villa Allende). Los estudios modélicos dan cuenta de cómo la acción fluvial turbulenta, el traslado de grandes cantidades de suelo, roca y material vegetal leñoso contribuyó a la destrucción de puentes, vados, barandas y casas construidas en las riberas. En el mismo, se destaca que los mayores daños producidos se debieron a la alta proximidad del hábitat humano y de la infraestructura vial inmediata a las orillas del río y arroyos.

Los efectos de la deforestación sobre el régimen hidrológico son poco conocidos, no es sorprendente que las inundaciones recientes hayan estado relacionadas con el grado de deterioro de la cubierta vegetal (Barchuk, 2015).

De acuerdo con las observaciones realizadas pueden reafirmarse estos enunciados, pues en el área de la cuenca del arroyo Saldán la principal causa de reducción de la vegetación se asocia a la expansión paulatina de la mancha urbana, situación notable en los mapas de la cobertura del terreno. Según diversas fuentes en los últimos años las localidades de Unquillo, Mendiolaza, Saldán y Villa Allende, pasaron por un proceso de expansión y crecimiento exponencial. Si bien esto genera una disminución en la tasa de erosión del área abarcada por la zona urbana, hay un impacto negativo dado por el avance de sus fronteras sobre la cobertura vegetal nativa, con el agravante que el proceso se está desarrollando a través de las riberas. Esto, disminuye la brecha entre el área altamente erosionable y las poblaciones urbanas.

En este mismo sentido, se sostiene que sería necesario evaluar a mayor nivel de detalle la dinámica actual del proceso erosivo en estas áreas, para dar recomendaciones de uso y manejo tendientes a la conservación de estas. Se deberían adoptar medidas de conservación especialmente porque la mayor parte del área de la cuenca del arroyo Saldán, forma parte de reservas naturales consideradas de alto valor, que coinciden con sectores de mayor erosión y dinamismo debido a los cambios en la cobertura vegetal. Las cuales deben ser tratadas con detenimiento en futuros análisis, de modo de establecer con más claridad la evolución de los cambios, sus causas, los impactos humanos y las tendencias de deterioro ambiental provocado por la erosión del suelo.

10.2. Limitaciones y beneficios en la implementación del modelo RUSLE

En el desarrollo del trabajo y principalmente en la implementación del modelo RUSLE para la estimación de la pérdida anual de suelos a escala de cuenca, se destaca una serie de limitaciones. En primer lugar, a causa de la baja disponibilidad de datos históricos y actuales a escalas de cuenca hidrográfica que se ajusten a la resolución espacial implementada y posibiliten estudios temporales de mayor extensión. Dichas limitaciones deben compensarse con el procesamiento y análisis riguroso de todos los factores para zonas de sierras, con especial enfoque sobre las precipitaciones medias anuales (PMA) y la cobertura del terreno.

Aunque, la comparación de los datos de PMA proporcionados por el ERA-Interim del ECMWF con los obtenidos de las estaciones meteorológicas del INA-CIRSA para años hidrológicos posteriores, dista de ser una validación óptima de la fuente (sobre todo considerando la complicada topografía de la zona), se subraya la subestimación de los valores proporcionados por la primera. Según la bibliografía de referencia, “esto puede deberse a la naturaleza de los datos de precipitación de reanálisis, ya que no son generados por modelos de interpolación a partir de datos observados, sino que surgen de los pronósticos generados con 24 horas de anticipación” (Kallberg *et al.*, 2004 citado en Serio, Spescha y Murphy, 2006).

Sin embargo, la implementación de este tipo de fuentes que proporcionan datos históricos, con elevada resolución y que cubren enteramente o en buena parte el territorio

argentino, posibilitó la valoración de la erosión del suelo basada en RUSLE para las zonas de sierras donde se carece de datos pluviográficos. La naturaleza remota del área de estudio presenta una situación donde las estaciones climáticas que cuentan con datos oficiales para el primer corte temporal se encuentran alejadas. Razón por la cual el acceso a datos modélicos desde el ECMWF, sirvió como alternativa, permitiendo analizar el comportamiento espacial de las PMA, que presenta semejanzas entre las cartografiás de ambos cortes temporales.

En lo concerniente al procesamiento de las imágenes satelitales para la concreción del mapa del factor C, a partir de las clasificaciones realizadas por el algoritmo de máxima verosimilitud, se observa que es posible generar cartografiás temáticas, cuya precisión dependerá en gran parte del cuidado que el usuario ponga a la hora de tomar las muestras y generar la información. La evaluación de la fiabilidad mediante un índice Kappa es importante en este tipo de estudios, ya que permite aceptar o rechazar la clasificación, pero no deben ignorarse en el proceso los errores por comisión y omisión que arroja la matriz de confusión, y la posibilidad de corroborar en el terreno las clases identificadas; más aún cuando se pretende establecer valores específicos ligados al grado de caracterización de cada una.

La clasificación supervisada convencional sobre las imágenes Landsat se vio comprometida por problemas para definir unidades discretas discernible por el satélite y otros asociados a áreas complejas/heterogéneas donde se presentaban parches más pequeños que el tamaño de píxel. Teniendo en cuenta la complejidad procedimental que se requiere para la identificación en terreno de cada una de las clases y a fin de superar las complicaciones y mejorar la definición de cobertura vegetal, el agrupamiento de clases se realizó en un nivel jerárquico superior y si bien fueron identificadas arbitrariamente, se tuvo en cuenta un análisis de la asociación entre el brillo detectado por el satélite y los diversos componentes de cobertura percibidos. En general, el procedimiento no es sencillo y la obtención de resultados aceptables implica tiempo y repeticiones (Cingolani, *et al.* 2004).

El modelo, también presenta limitaciones asociadas a la cuantificación de la sedimentación que ocurre dentro del sistema de cuenca. Esto afecta a la estimación del volumen de suelo removido porque la coexistencia de procesos de sedimentación estaría sobrestimándolo. Razón por la cual, los resultados alcanzados a escala de cuenca son orientativos y obligan a un tratamiento más cualitativo que cuantitativo (Van Remortel *et al.*, 2001; Wijesekera y Samarakoon, 2001 citado en Díaz, 2006).

En cuanto a la universalización de las mediciones, la extrapolación de tolerancias aplicadas en otras regiones no resulta una práctica efectiva dada la gran variabilidad de las condiciones físicas, biológicas y antrópicas posibles (Pahari *et al.*, 1996 citado en Díaz, 2006).

Para la proposición de los mecanismos de aplicación del modelo RUSLE a partir de una metodología idónea que posibilite obtener una mejor estimación de la pérdida del suelo y superar las limitaciones respecto de los procesos de sedimentación no cuantificados, es necesario trabajar con modelos hídricos complementarios que reafirmen los resultados y contribuyan a su interpretación. No obstante, los resultados obtenidos y sustentados en un enfoque híbrido, presentan coherencia y correspondencia directa entre los cuatro factores tratados y la tasa de pérdida de suelo, de acuerdo con la realidad actual del área de la cuenca del arroyo Saldán.

Según los resultados obtenidos, la información proporcionada por el modelo RUSLE puede resultar valiosa para la planificación y gestión de los diferentes usos del suelo. Contiene información que posibilita prever el riesgo de degradación del suelo y elaborar indicaciones que evalúen su estado actual y su evolución en función a las actividades que se desarrollan en el sector. Pues, sería conveniente evaluar a tiempo las repercusiones del manejo de las áreas forestales en los procesos erosivos del suelo, para evitar consecuencias en las poblaciones expuestas. Así mismo:

La predicción de la tasa de erosión, bajo condiciones específicas de manejo en regiones naturales, es de importancia para programar medidas de manejo. Existen numerosos métodos y experiencias para predicción de erosión hídrica, desarrollados a partir de mediciones en áreas agrícolas, pero son muy escasas las realizadas para su validación en áreas silvestres. (Vich y Mariani, 2010)

Considerando la utilidad de su análisis para encarar problemáticas actuales que afectan el área, la aplicación de este modelo basado en proporcionar un medio para evaluar y comparar la erosión del suelo en zonas de sierras, ofrece una visión amplia, pudiendo aislar y describir sectores vulnerables a estos procesos y proporcionar un sistema de monitoreo y control de modo constante.

Finalmente, aunque el procedimiento permitió demostrar las ventajas de la teledetección no sólo como herramienta, sino también como metodología de trabajo *ex situ* para este tipo de estudios, se deja abierta la posibilidad de continuar con una serie de análisis referentes a: a) la validación de los datos de las precipitaciones medias anuales, mediante el contraste de los datos de reanálisis con los datos de las estaciones meteorológicas para los años que se superponen; b) la corroboración en campo de la de las muestras de cobertura del terreno para un mejor ajuste del factor C en cuanto a la presencia de residuos en descomposición, porcentaje de suelo cubierto, de cobertura aérea de la copa y altura de los ejemplares; y c) la parametrización del riesgo desde los contornos demográficos considerando la vulnerabilidad de los sectores de contacto entre la mancha urbana y los sitios donde la tasa erosión del suelo es elevada. Esto último en pos de proporcionar mayor información sobre los efectos de la situación que acontece sobre las poblaciones expuestas.

Bibliografía

- Abril, *et al.* (2003). Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba. Agencia Córdoba D.A.C.yT. - Dirección de Ambiente. Córdoba – Argentina. Recuperado de: <http://www.igualdadycalidadcba.gov.ar/SIPEC-CBA/publicaciones/proyarboles/RegionesNaturalesdeCordoba.pdf>
- Agost, L. (2015). Cambio de la cobertura arbórea de la provincia de Córdoba: análisis a nivel departamental y de localidad (periodo 2000-2012). *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2(2), 111-123.
- Anaya, Á. A., y Colón, E. J. (2007) Erosión de suelo y mapa de riesgo para la cuenca del río Grande de Añasco, Puerto Rico. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez. Recuperado de: http://gers.uprm.edu/geol6225/pdfs/anaya_colon_2007.pdf
- Angelsen, A., y Kaimowitz, D. (Eds.). (2001). *Agricultural technologies and tropical deforestation*. (CAB Intl, Wallingford, UK)
- Antonini, C., Arenas, F., Azcarate, P., Bono, A., Fernandez, R., Kloster, N. Quiroga, A., Romano, N. y Saks, M. (2008) *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. EEA INTA, Anguil. Ed. talleres gráficos de la E.E.A. INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas". Argentina.
- Arán, D. S., Iván, F., y Huais, P. Y. (2015). Valoración económica de la población de Río Ceballos sobre el bosque nativo de la Reserva Hídrica Natural del Parque La Quebrada. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2(1), 131-138.
- Arévalo, F., Ortíz, E., Baéz, M. (2017) Monitoreo Mensual del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra, Incendios y Variación de la Cubierta de Aguas en el Gran Chaco Americano. Revisión Editorial: Alberto Yanosky. Informe mensual: Asociación Guayra Paraguay. Comité Holandés de la UICN, World Resource Institute y la Global Forest Watch y la Fundación AVINA. Recuperado de: <http://guyra.org.py/informe-deforestacion-2017/#>
- Ariza, A. (2013). Productos LDCM-Landsat 8. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica. Instituto Geográfico Agustín Codazzi Bogotá. Colombia, 46, 7p.
- Arrigo, N. M. (2000) Perfil del Suelo. In Conti, M. E. (*coord.*) Principios de la Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. 2da. Edición. ISBN 95-43-9315-2. pp. 107-430. Buenos Aires. Argentina.
- Barbeito, O. *et al.* (2016) Estudio Geomorfológico de la Amenaza Por Inundaciones Repentinas En La Cuenca Del Arroyo Saldán. Convenio del Instituto Nacional del Agua y la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba. INA -CIRSA. Argentina
- Barrios, A. G., y Quiñónez, E. (2000). Evaluacion de la erosion utilizando el modelo (R) USLE, con apoyo de SIG. Aplicacion en una microcuenca de los andes Venezolanos. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Merida, Venezuela.
- Belmonte, F., Delgado, M. J., y López, F. (1999). Interacciones entre el suelo y la vegetación a lo largo de un transecto en un ecosistema semiárido (El Ardal, Murcia). *Cuaternario y Geomorfología*, 13(3), 17-29.
- Belmonte, S., y Núñez, V. (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. GeoFocus. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (6), 15-27.
- Berasategui, L. Cosentino, D. y Arrigo, N. M. (2000) Clasificación de Suelos. In Conti, M. E. (*coord.*) Principios de la Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía.

- 2da. Edición. ISBN 95-43-9315-2. pp. 107-430. Buenos Aires. Argentina.
- Bewket, W., y Teferi, E. (2009). Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level: case study in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Land Degradation y Development*, 20(6), 609-622.
- Britos, A.H. and A.H. Barchuk. (2008), Land use and land cover changes in two Arid Chaco sites, northwest of Córdoba Province, Argentina. *Agriscientia XXV (2)*: 97-110. Cátedra de Ecología Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC, CC 509, 5000 Córdoba, Argentina.
- Bueno-Hurtado, P., Velásquez-Valle, M. A., López-Santos, A., Sánchez-Cohen, I., y González-Barrios, J. L. (2016). Implementation of a model to estimate water erosion with distributed parameters applied to watersheds. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 15(1), 47-54.
- Cabido, M., Zak, M. R., Cingolani, A., Cáceres, D., y Díaz, S. (2005). Cambios en la cobertura de la vegetación del centro de Argentina. ¿Factores directos o causas subyacentes? La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas, Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, 271-300.
- Cabrol, D. A., y Cáceres, D. M. (2016). Las disputas por los bienes comunes y su impacto en la apropiación de servicios ecosistémicos. La Ley de Protección de Bosques Nativos, en la Provincia de Córdoba, Argentina. *Ecología austral*, 27(1-bis), 134-145. ISSN en línea: 0327-5477; impresa 1667-782X (español); 1667-7838 (inglés). Recuperado de: http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/download/273/205.
- Camacho Sanabria, J. M., Pérez, J., Isabel, J., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., y Sánchez López, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y bosques*, 21(1), 93-112.
- Chinchilla, M., Alvarado, A., y Mata, R. (2011). Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirris, Talamanca, Costa Rica. *Agromonía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 35(1), 33-57.
- Cingolani, A. M., Renison, D., Zak, M. R., y Cabido, M. R. (2004). Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote sensing of environment*, 92(1), 84-97.
- Cléricali, C., y García Préchac, F. (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de la Plata. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 5(1), 92-103.
- Corrales Andino, R. E., y Ochoa López, V. L. (2017). Teledetección y SIG, Herramientas de Gestión en la adaptación al Cambio Climático, Cuenca Alta del río Goascorán, Honduras. *Ciencias Espaciales*, 10(1), 177-197. Recuperado de: <https://lamjol.info/index.php/CE/article/download/5820/5532>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110-124. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816216302624>
- Cravero, S. A. C, Bianchi, C. L., Elena, H. J. y Bianchi, A. R. Clima de la Argentina. Mapas digitales mensuales de precipitación y precipitación menos evapotranspiración potencial. Agenda del Atlas Climático digital de la República Argentina. INTA. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/clima_de_arg_cravero_bianchi_elena_bianchi_100517.pdf.
- Dasso, C. M., Piovano, E. L., Pasquini, A. I., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Guerra, L., y Campodónico, V. A. (2014). *Recursos hídricos superficiales*. In Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. RD Martino, AB Guerreschi, Ed, pp. 1209-1231. Asociación Geológica Argentina Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Karina_Lecomte/publication/264935177_Recursos_Hidricos_Superficiales/links/549499100cf29b9448210025/Recursos-Hidricos-Superficiales.pdf.
- Del Castillo, J. Á., y Cardona, G. A. A. (2013). Pérdida de la cobertura vegetal y de oxígeno en la

- media Montana del tropico andino, caso Cuenca Urbana San Luis (Manizales). *Luna Azul*, (37), 30-49. ISSN 1909-2474
- De Castro Panizza, A., y Fonseca, F. P. (2011). Técnicas de interpretação visual de imagens. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, (30), 30-43.
- Delgado, M. I. (2018). La pérdida de suelo como resultado de las interacciones entre los atributos del paisaje natural y las actividades humanas en Ventania, Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 074-080. Recuperado de:
http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/viewFile/608/284
- Desmet, P. J. J., y Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of soil and water conservation*, 51(5), 427-433. Recuperado de: <http://www.jswnonline.org/content/51/5/427.short>
- Diaz Viera, M. A., y González, R. C. (2002). Geostatística aplicada. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba: México DF, Mexico, 31-57. Recuperado de:
<http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>
- Diaz, B. G. (2006). Modelización de la erosión hídrica potencial en cuencas de montaña. In VI Jornadas Nacionales de Geografía Física. Unidad Académica Río Gallegos (UNPA). Recuperado de:
http://www.sitsantacruz.gob.ar/info_geografica/archivos/0103/eventos/Erosion_DIAZ2006.pdf
- Du, H., Dou, S., Deng, X., Xue, X., y Wang, T. (2016). Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China. *Ecological indicators*, 67, 117-131. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16300632>
- Ambiente – Foro Ambiental Córdoba. El Foro Ambiental asegura que los desmontes no se detienen (2013, junio, lunes 17). *La Voz*. Agencia Télam. Recuperado de:
<https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/ambiente/foro-ambiental-asegura-que-desmontes-no-se-detienen>
- FAO. (1994) Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial. Proyecto GCP/RLA/107/JPN. *Apoyo para una Agricultura Sostenible Mediante Conservación y Rehabilitación de Tierras en América Latina*. ISBN 92-854-3001-5. Santiago, Chile. Recuperado de:
<http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S0b.htm>
- FAO – FRA (2005) Actualización de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales año 2005. Términos y Definiciones (versión definitiva). Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. *Documento de trabajo 83/S*. Roma, Italia <http://www.fao.org/3/a-ap862s.pdf>
- Formica, S. M., Sacchi, G. A., Campodonico, V. A., Pasquini, A. I. y Cioccale, M. A. (2015) Modelado de la calidad del agua en ríos de montaña con impacto antropico. Caso de estudio: Sierra Chica de Córdoba, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 31 (4) pp. 327-341. Córdoba, Argentina. Recuperado de:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992015000400001yscript=sci_arttextylng=en
- Foro Ambiental Córdoba. Informe sobre la necesidad de un manejo integrado de las cuencas de Sierras Chicas. Recuperado de:
<https://www.ucc.edu.ar/portallucc/archivos/File/Bioetica/2014/kopta-presentacion-Foro-Ambiental-Cordoba-2014.pdf>
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., Carfagno, P., y Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. In Ed. INTA. *Colección: Investigación, desarrollo e innovación*. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/profile/Juan_Gaitán/publication/321794938_Estimacion_de_la_perdida_de_suelo_por_erosion_hidrica_en_la_Republica_Argentina/links/5a31f8320f7e9b2a28d3841c/Estimacion-de-la-perdida-de-suelo-por-erosion-hidrica-en-la-Republica-Argentina.pdf

- García Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Recuperado de: http://www3.uah.es/dep_ecologia_pcastro/Master/2008T2perturbac/Garcia_Fayos_Ecobosquemed_2004.pdf
- Gavier Pizarro, G. I., Kufner, M. B., Giraud, L., Sironi, M., Altrichter, M., y Tamburini, D. (2003). Comunidades herpetológicas de la reserva de La Quebrada, Río Ceballos, Córdoba (Argentina). *Cuadernos de Herpetología*, 17. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/6382/all-0001.pdf?sequence=1>
- Gavier Pizarro, G. I., y Bucher, E. H. (2004). Deforestación de las Sierras Chicas de Córdoba (Argentina) en el periodo 1970-1997(Vol. 101, pp. 1-27). Córdoba: Academia nacional de ciencias. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Enrique_Bucher2/publication/236634788_Deforestacion_de_las_Sierras_Chicas_de_Cordoba_Argentina_en_el_period_1970-1997/Deforestation_in_the_Sierras_Chicas_mountains_Cordoba_Argentina_1970-1987/links/004635189ad16add21000000.pdf
- Gavier Pizarro, G. I., Kummerle, T., Hoyos, L. E., Stewart, S. I., Huebner, C. D., Keuler, N. S., y Radeloff, V. C. (2012). Monitoring the invasion of an exotic tree (*Ligustrum lucidum*) from 1983 to 2006 with Landsat TM/ETM+ satellite data and Support Vector Machines in Córdoba, Argentina. *Remote Sensing of Environment*, 122, 134-145. Recuperado de: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1157ycontext=usdafsfacpub>
- Giménez, A. M. (2017) Biodiversidad. In: Giménez, A. M. y J. G. Moglia (Ed) Los Bosques actuales del Chaco semiárido argentino. Ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva p.231-248. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina. [en línea] [fecha de consulta: 7 de septiembre de 2017] p.231-248. Disponible en: <<http://fcf.unse.edu.ar/archivos/publicaciones/libro-ecoanatomia/ecoanatomia-p3-03-cisneros-Prosopis-alba-alternativa-sustentable-para-zonas-aridas-y-semiaridas.pdf>> ISBN digital: 978-987-4078-13-1
- Giufre de López Camelo, L. (2000) Meteorización. Clasificación de Suelos. In Conti, M. E. (coord.) Principios de la Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. 2da. Edición. ISBN 95-43-9315-2. pp. 107-430. Buenos Aires. Argentina.
- Gómez, M. J. (2014) Registro de Imágenes de Teledetección Espacial. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba Argentina.
- González del Tánago, M. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología*, 5, 133-150. Recuperado de: https://www.miteco.gob.es/ca/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_05_02_tcm34-100846.pdf
- González Esquivá, J. M., Hernández-Hernández, J. L., García-Mateos, G., Ruiz-Canales, A., y Molina-Martínez, J. M. (2016). Estudio y comparación de técnicas de segmentación por color para la estimación de la fracción de cobertura vegetal. In II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola, Almería. Recuperado de: <http://www2.ual.es/SNIH16/web/Web/2-11.pdf>
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., y Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, 29(2), 189-217. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1191/0309133305pp443ra>
- Hoyos, L. E., Cingolani, A. M., Zak, M. R., Vaieretti, M. V., Gorla, D. E., & Cabido, M. R. (2013). Deforestation and precipitation patterns in the arid C haco forests of central A rgentina. *Applied Vegetation Science*, 16(2), 260-271. Recuperado de: http://www.academia.edu/download/42807713/Deforestation_and_Precipitation_Patterns20160218-8194-1rvw7iy.pdf

- Jarsún, B.; Gorgas, J. A.; Zamora, E.; Bosnero, H.; Lovera, E.; Ravelo, A. y Tassile, J. L. (2006). Recursos Naturales de la Provincia e Cordoba – Los Suelos -Nivel de Reconocimiento 1:500.000. Agencia de Cordoba Ambiente – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi. Cordoba.
- Jenson, S. K. y J. O. Domingue. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.
- Juni, J. A., y Urbano, C. A. (2014). Técnicas para investigar. Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación. Ed. Brujas. Argentina
- Kopta, F. (1999) *Problemática ambiental con especial referencia a la Provincia de Córdoba – Capítulo 2*. Fundación Ambiente, Cultura y Desarrollo – ACUDE. Edición auspiciada por UNESCO y financiada por la Embajada Real de los Países Bajos. ISBN: 987-9202-12-0. Córdoba, Argentina. Recuperado de:
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=LIBROS.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=006488>
- Leguía Aliaga, J. D., Villegas Quino, H., y Aliaga Lordemann, J. (2011). Deforestación en Bolivia: una aproximación espacial. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, (15), 7-44. Recuperado de:
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2074-47062011000100001yscript=sci_arttext
- López-Santos, A., Sánchez Cohen, I., Esquivel Arriaga, G., y González Barrios, J. L. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad de los suelos del estado de durango, México en el contexto del cambio climático. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 16(3), 117-127. Recuperado de:
<http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/download/679/566>
- Maggi, A. E. (2002) Una propuesta para predecir el factor de erosividad R para el centro y norte de la Argentina. A proposition to predict the erosivity factor R in north and centre of Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=bibunfa.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=021000>
- Mancilla Escobar, G. (2008). Apuntes docentes: Uso y conservación de suelos: Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal. Recuperado de:
http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf?sequence=1
- Mas, J. F., Velázquez, A., y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1). Recuperado de: <http://www.revista.inecc.gob.mx/article/view/18/26>.
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., y Meyer, L. D. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. Recuperado de: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30576>
- Mcmahon. T. A. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 4 (2), pp.439-473. Australia.
- Millward, A. A., y Mersey, J. E. (1999). Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38(2), 109-129. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816299000673>.
- Montenegro, et al. (2004) Informe sobre deforestación en Argentina. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. República Argentina Ministerio de Salud y Ambiente. Argentina. Recuperado de:
<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/INFDEFORenARGENT2004.pdf>
- Montes Galbán, E. J., Insaurralde, J. A., y Cuadra, D. E. (2017). Evolución y escenarios futuros de la deforestación en el suroeste de la provincia del Chaco, Argentina. Ed. Universidad Nacional

- del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Humanas. Centro de Investigaciones Geográficas. *Estudios Socioterritoriales* 22; 12-2017; 121-131. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11336/73401>
- Norder, S. J., Seijmonsbergen, A. C., Rughooputh, S. D., van Loon, E. E., Tatayah, V., Kamminga, A. T., y Rijdsdijk, K. F. (2017). Assessing temporal couplings in social–ecological island systems: historical deforestation and soil loss on Mauritius (Indian Ocean). *Ecology and Society*, 22(1). Recuperado de: <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss1/art29/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2015). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo? Roma. Recuperado de: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/>.
- Palma, M. (2000) Estructura. In Conti, M. E. (coord.) Principios de la Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. 2da. Edición. ISBN 95-43-9315-2. pp. 107-430. Buenos Aires. Argentina.
- Palmer, Robert G. (1980) Introducción a la ciencia del suelo. Manual de laboratorio. Meacutexico.
- Peel, M. C. Finlayson, B. L. McMahon. T. A. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 4 (2), pp.439-473. Australia.
- Pérez González, M. E. y García Rodríguez, M. P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (61). Recuperado de: <http://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/1545/1465>
- Pla Senti, I. (2015) Problemas de degradación del suelo en el mundo: causas y consecuencias. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Recuperado de: <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-Problemas-de-Degradacion.pdf>.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., y Céleri, R. (2015). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Pablo_Quichimbo2/publication/285632863_Efectos_sobre_las_propiedades_fisicas_y_quimicas_de_los_suelos_por_el_cambio_de_la_cobertura_vegetal_y_uso_del_suelo_Paramo_de_Quimsacocha_al_sur_del_Ecuador/links/59524781aca272a343db35d8/Efectos-sobre-las-propiedades-fisicas-y-quimicas-de-los-suelos-por-el-cambio-de-la-cobertura-vegetal-y-uso-del-suelo-Paramo-de-Quimsacocha-al-sur-del-Ecuador.pdf
- Pascale, C. (2000) Factores Formadores del Suelo. In Conti, M. E. (coord.) Principios de la Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. 2da. Edición. ISBN 95-43-9315-2. pp. 107-430. Buenos Aires. Argentina.
- Ramírez, L. (2010). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Juramento-Salta. Tesina de Grado. Universidad Nacional de Salta. Argentina. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UNSA.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=002794>
- Recalde, L. (coord.) (2014) Agenda de Desarrollo Económico Regional para las Sierras Chicas con orientación al Turismo. Documento de prediagnóstico. Diplomatura en Desarrollo Territorial. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., y Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33. Recuperado de: <http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/775.pdf>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., y Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703). Washington, DC: United States Department of Agriculture. Recuperado de: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT10827029/PDF>

- Rodríguez Osses, M. A. (2013). Respuesta en los caudales y el transporte de sedimentos a eventos de precipitación durante invierno, en dos microcuencas cubiertas con bosque siempreverde del predio Llancahue, Región de los Ríos. Valdivia, Chile. Chile. Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/fifr696r/doc/fifr696r.pdf>
- Rojas, A. E., y A. Conde. (1985). Estimación del factor "R" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo*, 3, 85-94.
- Rojas, A. E. e Ibarra, J. (2003) La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. Población y desarrollo N° 25. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Asunción. Ruta 2 Mcal. Estigarribia km 11. C.P. 1463. San Lorenzo, Paraguay. Recuperado de <http://revistascientificas.una.py/index.php/RE/article/view/839>.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J. y Hill, M. (2004) Propiedades Físicas del Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Departamento Suelos y Agua. Montevideo, Uruguay. Recuperado de: http://www.academia.edu/download/44190787/propiedades_fisicas_del_suelo.pdf
- Sánchez Oliveira, P. T., Bicca Rodríguez, D. B., Sobrinho, T. A., Panachuki, E., y Wendland, E. (2013). Use of SRTM data to calculate the (R) USLE topographic factor. *Acta Scientiarum. Technology*, 35(3), 507-513. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303228846016.pdf>
- Schietecatte, W., Cornelis, W. M., Acosta, M. L., Leal, Z., Lauwers, N., Almoza, y Gabriels, D. (2008). Influence of landuse on soil erosion risk in the Cuyaguaje watershed (Cuba). *Catena*, 74(1), 1-12. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816207001993>
- Segura, R., y Trincado, G. (2003). Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. *Bosque (Valdivia)*, 24(2), 43-52. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-92002003000200005yscript=sci_arttext
- Serio, L., Spescha, L., y Murphy, G. *Validación de las precipitaciones decadas en la región pampeana estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF*. International Workshop of Crop Monitoring and Forecasting in South America. Montevideo. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/284030469>
- Sheppard, S. R., y Cizek, P. (2009). The ethics of Google Earth: Crossing thresholds from spatial data to landscape visualisation. *Journal of environmental management*, 90(6), 2102-2117.
- Souphihalath, T., Hayashi, K., Ooba, M., y Kobayashi, W. (2017). Spatial assessment of land cover change and ecosystem services from a case study in Savannakhet province, Laos. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 8(1), 93-103. Recuperado de: <http://iserd.net/ijerd81/Volume8-1-14.pdf>
- Speranza, F. C., y Zerda, H. R. (2005, November). *Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales*. In Actas VIII. Congreso Argentino de Ingeniería Rural (CADIR). Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Zerda/publication/228346891_Clasificacion_digital_de_coberturas_vegetales_a_partir_de_datos_satelitales_multiespectrales/links/562a7d7008ae04c2aeb1a8bf/Clasificacion-digital-de-coberturas-vegetales-a-partir-de-datos-satelitales-multiespectrales.pdf
- Strahler, A. N., y Strahler, A. H. (1989). *Geografía Física*. Ed. Omega. Barcelona.
- Tanyaş, H., Kolat, Ç., y Süzen, M. L. (2015). A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam. *Journal of hydrology*, 528, 584-598.
- Urrea, V., Ochoa, A., y Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014. Medellín, Colombia. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/310844678_Validacion_de_la_base_de_datos_de_p

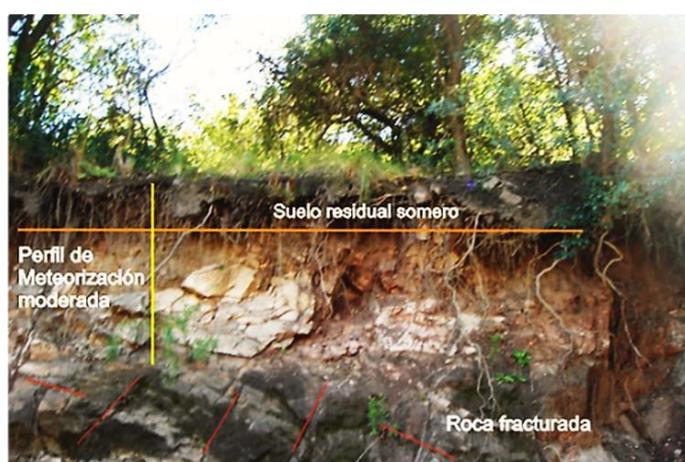
recipitacion_CHIRPS_para_Colombia_a_escal_a_diaria_mensual_y_anual_en_el_perodo_1981-2014

- Vich, A. I., y Mariani, A. (2010). Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado del centro-oeste de Argentina. *Multequina*, (19). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/428/42818826004.pdf>
- Wawer, R., Nowocień, E., y Podolski, B. (2005). Real and Calculated K USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(5). Recuperado de: <http://www.pjoes.com/Real-and-Calculated-K-USLE-Erodibility-Factor-for-Selected-Polish-Soils,87804,0,2.html>
- Williams, J.R. (1995). *Chapter 25: The EPIC model*. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, pp. 909-1000.
- Wischmeier, W. H. (1975). Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas. *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, 1, 18-124.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. Washington D.C., USDA. (Agriculture Handbook no. 537)
- WWF-Fondo Mundial para la Naturaleza (2015) *Informe Bosques Vivos: Capítulo 5 Salvar los Bosques en Peligro*. Recuperado de: http://awsassets.panda.org/downloads/lfr_chapter_5_executive_summary_spanish.pdf. (15/09/2018)
- Zanter, K. (2017). Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition. United States Geological Survey.
- Zupan, E. (2018) Córdoba Forestal: Información Técnica. Dirección de Producción Forestal del MAGyP. Córdoba. Recuperado de: <http://cordobaforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>

Apéndice

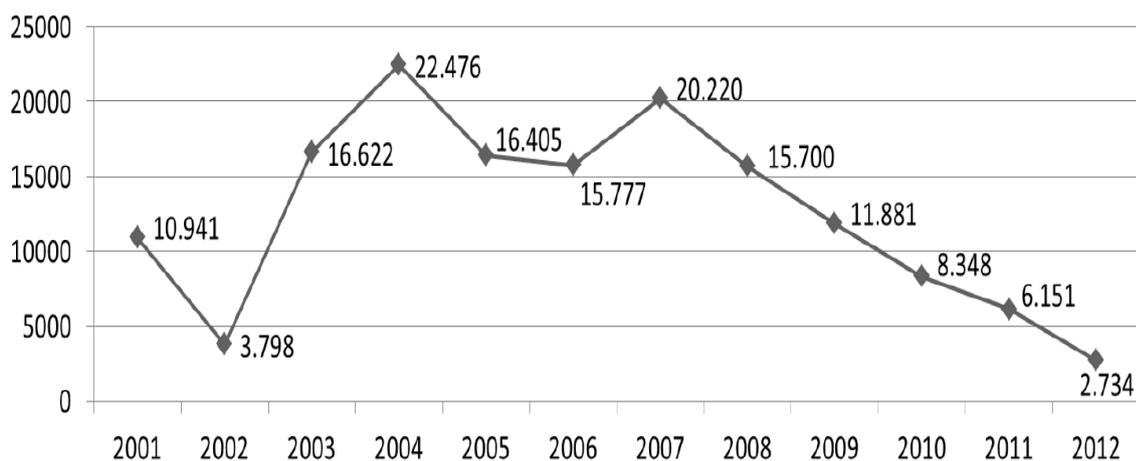
Apéndice 1: Perfil de meteorización (1 metro aprox.) con formación de suelo residual

Suelo residual generado a partir de la meteorización mecánica y química del basamento cristalino. Sectores donde la cubierta de material residual es de escaso espesor (aunque con abundante arcilla que favorece el desarrollo de cobertura vegetal) y las partículas finas son lavadas por efecto de la escorrentía. Quedan expuestos los componentes más gruesos y se produce un aumento de la pedregosidad del suelo disminuyendo la infiltración, lo que incrementa la acción de la erosión y del escurrimiento superficial (Barbeito, *et al.* 2016.).



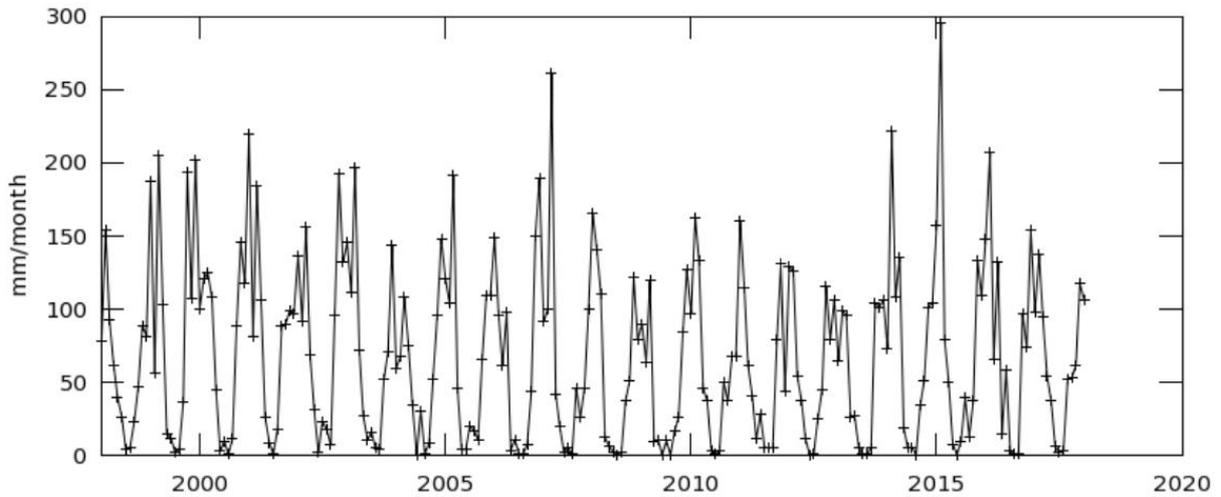
Fuente: Barbeito, *et al.* 2016.

Apéndice 2: Cantidad de hectáreas de bosque perdidas por año en la provincia de Córdoba



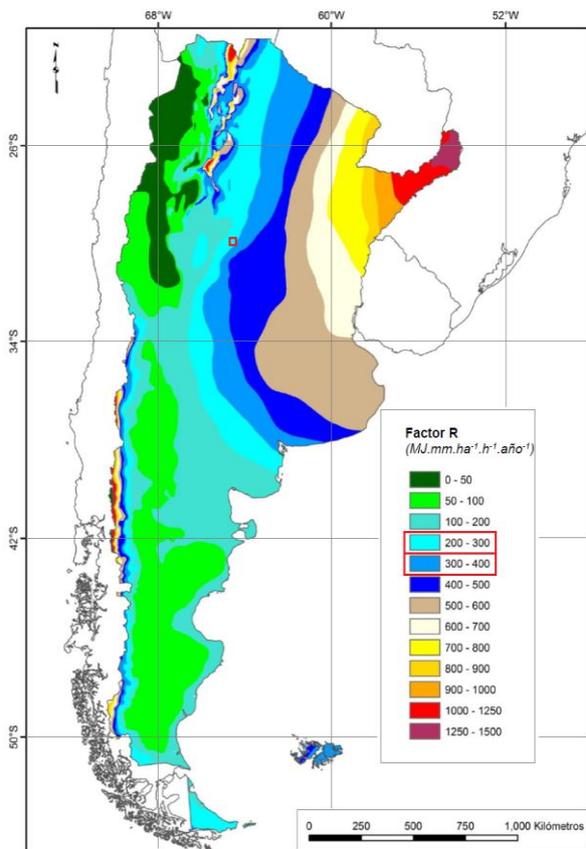
Nota: (densidades de canopia de 1 a 100%). Fuente: Extraído de Agost (2015), elaborado sobre la base de datos del proyecto Cambios del Bosque a Nivel Global 2013 (Agost, 2015. p 115 citado en Hansen *et al.* 2013).

Apéndice 3: Serie de tiempo de la tasa de precipitaciones medias mensuales periodo 1998 – 2018.



Nota: grafica descargada del servidor NASA Giovanni. Datos en mm/mensuales proporcionados por la misión satelital TRMM (producto TRMM_3B43 v7). Corresponde al cuadrante 32°7` S y 65°7`O; 30°1` y 63°1`, con una resolución espacial de 0.25 grados.

Apéndice 4: Estimación del factor R para todo el territorio argentino.



Nota. Extraída del artículo “Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina”. Fuente: Gaitán, *et al.*, 2017.

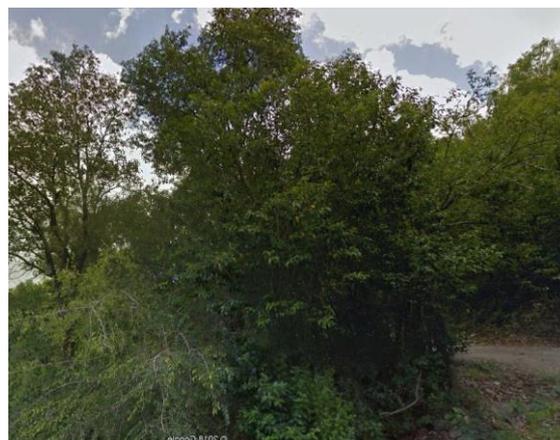
Se observa la estimación del factor R calculado para todo el territorio argentino por la bibliografía de referencia (Gaitán, *et al.*, 2017) en la que se localizó aproximadamente el cuadrante del área de estudio.

Apéndice 5: Ilustración de las clases de cobertura del terreno

A continuación se observa una serie de fotografías ilustrativas a nivel del suelo adquiridas del servidor *Google Street View* (prestación de *Google Maps* y de *Google Earth*), que corresponden a las clases definidas en el apartado 15.4 acerca del factor C. En el mismo, se definen las clases de cobertura del terreno de segundo orden según la predominancia de la formación vegetal, la altura del estrato y la cobertura aérea y superficial.



Bosque denso (31°12' 11``S – 64°19' 11``O)



Bosque denso (31°12' 11``S – 64°19' 16``O)



Bosque denso (31°12' 11``S – 64°19' 11``O)



Bosque denso (31°13' 10``S – 64°19' 17``O)



Matorral serrano denso (31°09' 04``S - 64°24' 43``O)



Matorral serrano denso (31°09' 09``S - 64°20' 44``O)



Matorral serrano ralo (31°13'49``S - 64°19'44``O)



Matorral serrano ralo (31°07'20``S - 64°21'14``O)



Pastizal mixto (31°07'45``S - 64°25'08``O)



Pastizal mixto (31°13'49``S - 64°24'59``O)



Pastizal mixto (31°07'17``S - 64°21'21``O)



Pastizal mixto (31°31'48``S - 64°23'58``O)



Pastizal ralo (31°13'59``S - 64°25'00``O)



Pastizal ralo (31°07'25``S - 64°22'15``O)



Pastizal ralo (31°07'47``S - 64°24'49``O)



Pastizal ralo (31°07'35``S - 64°25'31``O)

La clase auxiliar disgregada en clase construcción y clase de roca expuesta, se muestra a través de imágenes satelitales de alta resolución, cuyas capturas fueron extraídas del servidor *Google Earth*, y tomadas a una altura superior a los 950 metros. La muestra capturada de la clase construcción (situada a los 31°14'08``S y 64°19'26``O), corresponde a un sector de la mancha urbana de la localidad de Unquillo, visualizada en tres años para contrastar las diferencias durante el periodo 2005 – 2017. Se observa la intensificación de la mancha urbana.

La clase roca expuesta cuya muestra se sitúa a los 31°16'27`` S y 64°20'13``O, corresponde a la cantera de extracción y trituración de roca granítica de montaña El Gran Ombú S.A. en la localidad de Villa Allende, que abarca aproximadamente un área de 41 hectáreas. También visualizada en los tres años para mostrar su evolución.



Parte de la mancha urbana (año 2005)



Área de explotación año 2005



Parte de la mancha urbana (año 2014)



Área de explotación año 2014



Parte de la mancha urbana (año 2017)



Área de explotación año 2017

Apéndice 6: Coeficientes de separabilidad según Jeffries Matus. Mínimos entre pares de clases.

ROI Separability Report	
File	
Pair Separation (least to most):	
MRS [Coral]	493 points and PM [Yellow] 558 points - 1.81890551
BM [Green2]	723 points and MDS [Sea Green] 689 points - 1.82665541
MDS [Sea Green]	689 points and MRS [Coral] 493 points - 1.93056538
MRS [Coral]	493 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.95020371
MRS [Coral]	493 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.95546075
SVA [Orange4]	860 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.95891957
PM [Yellow]	558 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.97476700
MDS [Sea Green]	689 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.98388667
BM [Green2]	723 points and PM [Yellow] 558 points - 1.98662741
MDS [Sea Green]	689 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.98743627
PM [Yellow]	558 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.98856019
MDS [Sea Green]	689 points and PM [Yellow] 558 points - 1.99417102
BM [Green2]	723 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.99889488
BM [Green2]	723 points and MRS [Coral] 493 points - 1.99929673
BM [Green2]	723 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.99988567

ROI Separability Report	
File	
Pair Separation (least to most):	
MRS [Coral]	493 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.89497068
BM [Green2]	723 points and PM [Yellow] 558 points - 1.95817179
MRS [Coral]	493 points and PM [Yellow] 558 points - 1.96920986
SVA [Orange4]	860 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.97043178
BM [Green2]	723 points and MDS [Sea Green] 689 points - 1.97164038
MRS [Coral]	493 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.98778848
PM [Yellow]	558 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.99184825
MDS [Sea Green]	689 points and MRS [Coral] 493 points - 1.99553980
PM [Yellow]	558 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.99586118
MDS [Sea Green]	689 points and PM [Yellow] 558 points - 1.99806986
MDS [Sea Green]	689 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.99807831
MDS [Sea Green]	689 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.99915284
BM [Green2]	723 points and CR [Purple2] 1087 points - 1.99995376
BM [Green2]	723 points and MRS [Coral] 493 points - 1.99996463
BM [Green2]	723 points and SVA [Orange4] 860 points - 1.99999980

Nota: Superior L5 (2005), inferior L8 (2014). Fuente: elaboración mediante ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Landsat 5 y 8.

Pair Separability Report	
File	
Pair Separation (least to most):	
BM [Green2]	4403 points and PM [Yellow] 961 points - 1.87210901
BM [Green2]	4403 points and MSD [Sea Green] 1140 points - 1.89382540
MSD [Sea Green]	1140 points and MSR [Coral] 452 points - 1.90244602
SVA [Orange4]	974 points and CR [Purple2] 962 points - 1.91372352
MSR [Coral]	452 points and PM [Yellow] 961 points - 1.94446846
BM [Green2]	4403 points and MSR [Coral] 452 points - 1.96597597
MSR [Coral]	452 points and CR [Purple2] 962 points - 1.96736156
PM [Yellow]	961 points and CR [Purple2] 962 points - 1.97676465
MSR [Coral]	452 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.98113839
MSD [Sea Green]	1140 points and CR [Purple2] 962 points - 1.98788002
BM [Green2]	4403 points and CR [Purple2] 962 points - 1.99255257
PM [Yellow]	961 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99880030
MSD [Sea Green]	1140 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99992382
MSD [Sea Green]	1140 points and PM [Yellow] 961 points - 1.99992614
BM [Green2]	4403 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99998212

```

Pair Separation (least to most):
MSR [Coral] 452 points and PM [Yellow] 961 points - 1.83254728
SVA [Orange4] 974 points and CR [Purple2] 962 points - 1.83823421
MSD [Sea Green] 1140 points and MSR [Coral] 452 points - 1.87935457
BM [Green2] 4403 points and MSD [Sea Green] 1140 points - 1.93231505
MSR [Coral] 452 points and CR [Purple2] 962 points - 1.96936440
BM [Green2] 4403 points and PM [Yellow] 961 points - 1.97008392
MSR [Coral] 452 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.98183815
MSD [Sea Green] 1140 points and CR [Purple2] 962 points - 1.98656628
PM [Yellow] 961 points and CR [Purple2] 962 points - 1.98967390
PM [Yellow] 961 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99540176
BM [Green2] 4403 points and MSR [Coral] 452 points - 1.99814656
BM [Green2] 4403 points and CR [Purple2] 962 points - 1.99829953
MSD [Sea Green] 1140 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99993681
MSD [Sea Green] 1140 points and PM [Yellow] 961 points - 1.99994586
BM [Green2] 4403 points and SVA [Orange4] 974 points - 1.99999311

```

Nota. Superior S2A (2016), inferior S2A (2017). Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre imágenes Sentinel 2A.

Apéndice 7: Coeficiente de separabilidad por clase. Según Jeffries Matus y Divergencia Transformada

Se observa en las siguientes figuras, los valores de separabilidad arrojados para todas las clases por el programa ENVI 4.8.

ROI Separability Report

File

Input File: L5_msk
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

BM [Green2] 723 points:	
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.82665541 1.91947363)
MRS [Coral] 493 points:	(1.99929673 1.9999641)
PM [Yellow] 558 points:	(1.98662741 1.99988126)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.99988567 2.00000000)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.99889488 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.82665541 1.91947363)
MRS [Coral] 493 points:	(1.93056538 1.97490872)
PM [Yellow] 558 points:	(1.99417102 1.99896972)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.98743627 1.99962317)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.98388667 2.00000000)
MRS [Coral] 493 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99929673 1.9999641)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.93056538 1.97490872)
PM [Yellow] 558 points:	(1.81890551 1.98682789)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.95546075 1.97821483)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.95020371 2.00000000)
PM [Yellow] 558 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.98662741 1.99988126)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.99417102 1.99896972)
MRS [Coral] 493 points:	(1.81890551 1.98682789)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.98856019 1.99929808)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.97476700 2.00000000)
SVA [Orange4] 860 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99988567 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.98743627 1.99962317)
MRS [Coral] 493 points:	(1.95546075 1.97821483)
PM [Yellow] 558 points:	(1.98856019 1.99929808)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.95891957 1.99988897)
CR [Purple2] 1087 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99889488 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.98388667 2.00000000)
MRS [Coral] 493 points:	(1.95020371 2.00000000)
PM [Yellow] 558 points:	(1.97476700 2.00000000)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.95891957 1.99988897)

ROI Separability Report

File

Input File: L8_msk
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

BM [Green2] 723 points:	
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.97164038 1.99529173)
MRS [Coral] 493 points:	(1.99996463 2.00000000)
PM [Yellow] 558 points:	(1.95817179 1.99999976)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.99999980 2.00000000)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.99995376 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.97164038 1.99529173)
MRS [Coral] 493 points:	(1.99553980 1.99999959)
PM [Yellow] 558 points:	(1.99806986 1.99996627)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.99807831 2.00000000)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.99915284 2.00000000)
MRS [Coral] 493 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99996463 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.99553980 1.99999959)
PM [Yellow] 558 points:	(1.96320986 1.99939233)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.89497068 1.97617171)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.98778848 2.00000000)
PM [Yellow] 558 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.95817179 1.99999976)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.99806986 1.99996627)
MRS [Coral] 493 points:	(1.96320986 1.99939233)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.99184825 1.99989797)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.99586118 2.00000000)
SVA [Orange4] 860 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99999980 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.99807831 2.00000000)
MRS [Coral] 493 points:	(1.89497068 1.97617171)
PM [Yellow] 558 points:	(1.99184825 1.99989797)
CR [Purple2] 1087 points:	(1.97043178 1.99999987)
CR [Purple2] 1087 points:	
BM [Green2] 723 points:	(1.99995376 2.00000000)
MDS [Sea Green] 689 points:	(1.99915284 2.00000000)
MRS [Coral] 493 points:	(1.98778848 2.00000000)
PM [Yellow] 558 points:	(1.99586118 2.00000000)
SVA [Orange4] 860 points:	(1.97043178 1.99999987)

Nota: Coeficiente de separabilidad de las ROI según Jeffries Matus y la Divergencia Transformada. Izquierda imagen L5 (2005), derecha imagen L8 (2014). Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Landsat 5 y 8.

ROI Separability Report

File

Input File: S2A2016_msk
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

BM [Green2] 4403 points:
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.89382540 1.98252022)
MSR [Coral] 452 points: (1.96597597 1.99125422)
PM [Yellow] 961 points: (1.87210901 1.96789312)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99992322 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.99255257 2.00000000)

MSD [Sea Green] 1140 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.89382540 1.98252022)
MSR [Coral] 452 points: (1.90244602 1.96083388)
PM [Yellow] 961 points: (1.99992614 1.99999911)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99992322 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.98788002 2.00000000)

MSR [Coral] 452 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.96597597 1.99125422)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.90244602 1.96083388)
PM [Yellow] 961 points: (1.94446846 1.98777160)
SVA [Orange4] 974 points: (1.98113839 1.99860679)
CR [Purple2] 962 points: (1.96736156 2.00000000)

PM [Yellow] 961 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.87210901 1.96789312)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.99992614 1.99999911)
MSR [Coral] 452 points: (1.94446846 1.98777160)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99880030 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.97676465 2.00000000)

SVA [Orange4] 974 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.99992322 2.00000000)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.99992322 2.00000000)
MSR [Coral] 452 points: (1.98113839 1.99860679)
PM [Yellow] 961 points: (1.99880030 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.91372352 2.00000000)

CR [Purple2] 962 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.99255257 2.00000000)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.98788002 2.00000000)
MSR [Coral] 452 points: (1.96736156 2.00000000)
PM [Yellow] 961 points: (1.97676465 2.00000000)
SVA [Orange4] 974 points: (1.91372352 2.00000000)

ROI Separability Report

File

Input File: S2A2017_msk
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

BM [Green2] 4403 points:
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.93231505 1.99950960)
MSR [Coral] 452 points: (1.99814656 1.99999797)
PM [Yellow] 961 points: (1.97008392 1.99989333)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99993311 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.99829953 2.00000000)

MSD [Sea Green] 1140 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.93231505 1.99950960)
MSR [Coral] 452 points: (1.87935457 1.95259218)
PM [Yellow] 961 points: (1.99994586 1.99999601)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99993311 2.00000000)
CR [Purple2] 962 points: (1.98656628 2.00000000)

MSR [Coral] 452 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.99814656 1.99999797)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.87935457 1.95259218)
PM [Yellow] 961 points: (1.83254728 1.96766669)
SVA [Orange4] 974 points: (1.98183815 1.99671919)
CR [Purple2] 962 points: (1.96936440 2.00000000)

PM [Yellow] 961 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.97008392 1.99989333)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.99994586 1.99999601)
MSR [Coral] 452 points: (1.83254728 1.96766669)
SVA [Orange4] 974 points: (1.99540176 1.99999921)
CR [Purple2] 962 points: (1.98967390 2.00000000)

SVA [Orange4] 974 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.99993311 2.00000000)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.99993311 2.00000000)
MSR [Coral] 452 points: (1.98183815 1.99671919)
PM [Yellow] 961 points: (1.99540176 1.99999921)
CR [Purple2] 962 points: (1.83823421 1.99999944)

CR [Purple2] 962 points:
BM [Green2] 4403 points: (1.99829953 2.00000000)
MSD [Sea Green] 1140 points: (1.98656628 2.00000000)
MSR [Coral] 452 points: (1.96936440 2.00000000)
PM [Yellow] 961 points: (1.98967390 2.00000000)
SVA [Orange4] 974 points: (1.83823421 1.99999944)

Nota: Coeficiente de separabilidad de las ROI según Jeffries Matus y la Divergencia Transformada. Izquierda imagen S2A (2016), derecha imagen S2A (2017). Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Sentinel 2A.

Apéndice 8: Precisión global y coeficiente Kappa. Matriz de confusión. Valores en porcentaje

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\2. RUSLE\Factor \L1T05\Nuevo\L5_clas

Overall Accuracy = (1731/1776) 97.4662%
Kappa Coefficient = 0.9699

Class	Ground Truth (Percent)		V_EM	V_MDS	V_MRS	V_PM	V_SVA
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EM [Green2] 4	100.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MDS [Sea Gree	0.00	94.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MRS [Coral] 3	0.00	5.05	96.48	0.00	0.00	0.00	0.00
PM [Yellow] 3	0.00	0.00	2.82	100.00	0.00	0.00	0.00
SVA [Orange4]	0.00	0.00	0.70	0.00	94.92	0.00	0.00
CR [Thistle]	0.00	0.32	0.00	0.00	3.05	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
Unclassified	V_CR	Total
EM [Green2] 4	0.00	13.51
MDS [Sea Gree	0.00	16.78
MRS [Coral] 3	0.00	9.07
PM [Yellow] 3	0.22	13.51
SVA [Orange4]	0.00	21.11
CR [Thistle]	99.78	26.01
Total	100.00	100.00

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\2. RUSLE\Factor \L1C08\Nuevo\L8_clas

Overall Accuracy = (1720/1776) 96.8468%
Kappa Coefficient = 0.9612

Class	Ground Truth (Percent)		V_EM	V_MDS	V_MRS	V_PM	V_SVA
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EM [Green2] 4	98.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MDS [Sea Gree	0.00	98.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MRS [Coral] 3	0.00	0.32	92.96	0.00	0.00	0.00	0.76
PM [Yellow] 3	1.26	1.26	0.00	100.00	0.00	0.25	0.00
SVA [Orange4]	0.00	0.00	7.04	0.00	90.61	0.00	0.00
CR [Thistle]	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	8.38
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
Unclassified	V_CR	Total
EM [Green2] 4	0.00	13.23
MDS [Sea Gree	0.00	17.51
MRS [Coral] 3	0.00	7.66
PM [Yellow] 3	0.00	13.68
SVA [Orange4]	0.00	20.66
CR [Thistle]	100.00	27.25
Total	100.00	100.00

Nota. Izquierda: L5 2005. Derecha: L8 2014. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Landsat 5 y 8.

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\2. RUSLE\Factor \SENTINEL 2\Ing\S2A_2016\S2A_corAt\ENVI\S2A2016_clas

Overall Accuracy = (7970/8083) 98.6020%
Kappa Coefficient = 0.9784

Class	Ground Truth (Percent)		V_MSR	V_PM	V_SVA
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EM [Green2] 4	99.40	1.55	0.00	0.00	0.00
MSD [Sea Gree	0.04	98.32	0.66	0.00	0.00
MSR [Coral] 4	0.07	0.13	88.86	0.00	0.20
PM [Yellow] 1	0.33	0.00	4.15	99.22	0.00
SVA [Orange4]	0.00	0.00	4.37	0.00	98.78
CR [Thistle]	0.15	0.00	1.97	0.78	1.02
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
Unclassified	V_CR	Total
EM [Green2] 4	0.00	55.68
MSD [Sea Gree	0.00	9.50
MSR [Coral] 4	0.11	5.11
PM [Yellow] 1	0.11	11.46
SVA [Orange4]	0.74	6.35
CR [Thistle]	99.05	11.90
Total	100.00	100.00

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\2. RUSLE\Factor \SENTINEL 2\Ing\S2A_2017\S2A2017_corAt\ENVI\S2A2017_clas

Overall Accuracy = (7901/8083) 97.7484%
Kappa Coefficient = 0.9653

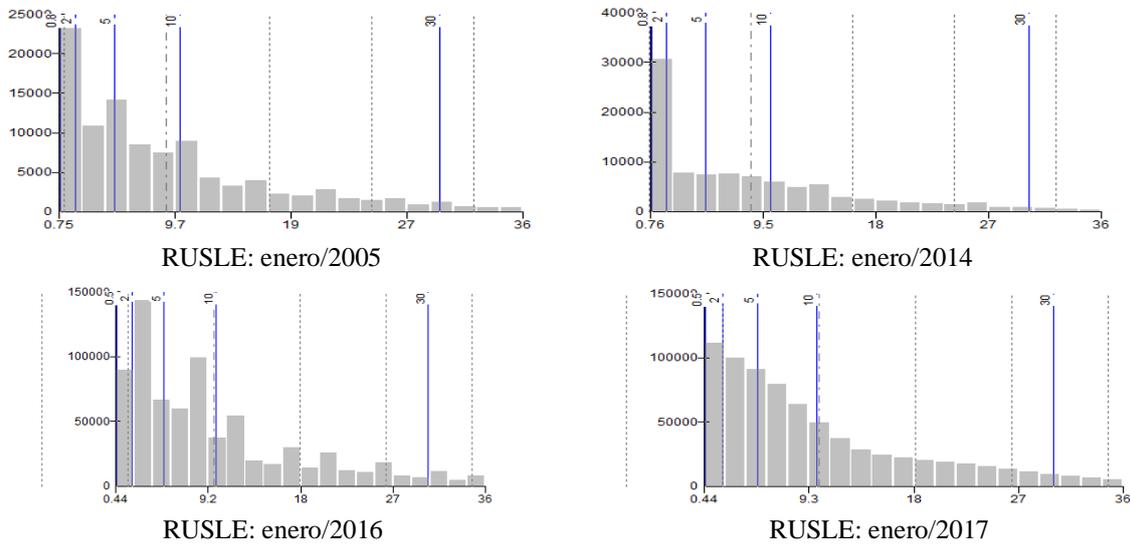
Class	Ground Truth (Percent)		V_MSR	V_PM	V_SVA
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EM [Green2] 4	98.56	0.64	0.00	0.00	0.00
MSD [Sea Gree	0.09	92.78	0.22	0.00	0.00
MSR [Coral] 4	0.07	0.44	92.79	0.33	0.00
PM [Yellow] 1	0.78	0.13	3.28	99.11	0.00
SVA [Orange4]	0.00	0.00	2.84	0.00	98.58
CR [Thistle]	0.51	1.80	0.87	0.56	1.42
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
Unclassified	V_CR	Total
EM [Green2] 4	0.00	55.13
MSD [Sea Gree	0.00	8.97
MSR [Coral] 4	0.32	5.81
PM [Yellow] 1	0.00	11.64
SVA [Orange4]	1.06	6.28
CR [Thistle]	98.62	12.16
Total	100.00	100.00

Nota. Izquierda: S2A 2016. Derecha: S2A 2017. Fuente: elaboración mediante programa ENVI 4.8 sobre la base de imágenes Sentinel 2A

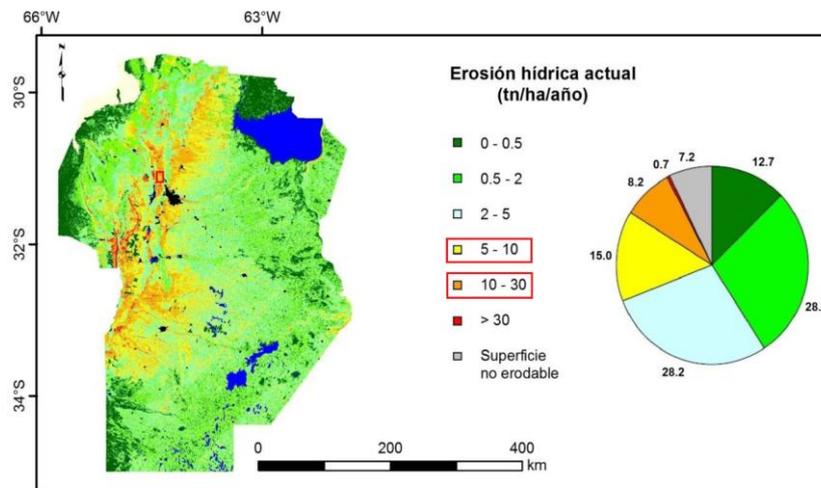
Apéndice 9: Histograma de rango acotado de la distribución de datos de Factor A en el área de la cuenca

Se muestra la distribución de los datos por medio del histograma de rango acotado para cada mapa del factor A (tasa de erosión de suelo), los cuales evidencian la concentración hacia valores bajos, que se atribuye al peso de los datos correspondientes a los sectores urbanos y de vegetación de gran extensión en el área.



Apéndice 10: Erosión hídrica actual de la provincia de Córdoba. Localización del cuadrante del área de la cuenca del arroyo Saldán

Se muestra la localización aproximada de la cuenca en la provincia de Córdoba, Sector cuyos los valores del factor A, son coincidentes con las medias arrojadas para los 4 mapas.



Fuente: Gaitán, *et al.* 2017

