

Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ciencias Agrarias

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Mendoza, Argentina



TESIS DE GRADO

**Evaluación del riesgo de erosión hídrica, su distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior (Mendoza)**



Tesista: D'Amario Fernández María Julieta

Director: Mastrantonio Leandro

2016

## RESUMEN

El suelo es un recurso natural valioso que realiza funciones ecosistémicas esenciales, y proporciona bienes y servicios ambientales. La erosión hídrica del mismo constituye uno de los fenómenos más importantes de degradación física; en la actualidad se estiman que existen aproximadamente 60 millones de hectáreas erosionadas en Argentina.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el riesgo de erosión hídrica y su distribución espacial, y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior (Mendoza), con el fin de proponer pautas de manejo. Para ello se aplicó el modelo RUSLE (Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo), a partir del cual se obtuvo que la mayor pérdida real de suelo es de 110 Mg/ha.año y en caso de suelo desnudo la pérdida máxima corresponde a 350 Mg/ha.año. Las zonas de la cuenca donde se registra la mayor erosión hídrica corresponden a aquellas que presentan elevada pendiente. Un 4,6% de la cuenca presenta erosión muy alta y un 28,2% erosión alta.

A partir del cálculo de la función ecosistémica de control de la erosión, se acepta la hipótesis de que la cobertura vegetal afecta de forma diferenciada al proceso erosivo. Los mayores valores del control de la erosión corresponden a sitios de la cuenca de estudio donde la vegetación ejerce un papel fundamental en dicho proceso, y es allí donde deben llevarse a cabo diferentes pautas manejo de para prevenir y/o mitigar la erosión hídrica.

**Palabras claves:** erosión hídrica, cobertura vegetal, función ecosistémica

## AGRADECIMIENTOS

*Quisiera agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera me acompañaron a lo largo de este camino y fueron testigos de mi esfuerzo constante, compartiendo conmigo buenos y malos momentos.*

*A mi familia por apoyarme día a día y enseñarme que todo se puede lograr con esfuerzo y dedicación.*

*A mi novio por su paciencia, amor y compañía.*

*A mis compañeros, amigos y futuros colegas con los que compartí largos días de cursado y muchas horas de estudio, sin ellos este gran logro hubiera sido más difícil.*

*A mis amigas de la vida por su cariño y permanentes palabras de aliento.*

*Finalmente, agradecer a mi director Leandro, quien con su humildad y gran profesionalismo aceptó guiarme en la realización de este trabajo. Gracias por su apoyo incondicional, confianza en mí, motivación y comprensión.*

*A todos ellos mi mayor agradecimiento.*

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. HIPÓTESIS Y FUNDAMENTOS</b> .....	2
<b>3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>4. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	4
<b>4.1 Erosión hídrica del suelo</b> .....	4
4.1.1 Erosión en Argentina y Mendoza .....	4
4.1.2 Comienzos de los estudios de la erosión hídrica.....	5
4.1.3 Factores que intervienen en el proceso.....	6
4.1.4 Tipos de erosión hídrica .....	7
4.1.5 Efectos de la erosión hídrica .....	9
4.1.6 Modelos matemáticos para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica.....	9
4.1.7 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) .....	10
<b>4.2 Servicios ecosistémicos</b> .....	13
4.2.1 Control de la erosión .....	17
4.2.2 Importancia de la cobertura vegetal en los procesos erosivos.....	17
<b>5. ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TUNUYÁN SUPERIOR</b> .....	19
5.1 Localización.....	19
5.2 Geomorfología.....	20
5.3 Clima .....	20
5.4 Hidrología.....	21
5.5 Suelos.....	22
5.6 Flora y Vegetación .....	23
5.7 Aspectos Socio-Económicos .....	24
<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	24
6.1 Factor de erosividad de la lluvia (R).....	25
6.2 Factor de erodabilidad (K).....	27
6.3 Factor topográfico (LS) .....	28
6.4 Factor de de cobertura (C).....	28
6.5 Factor de prácticas mecánicas de control de erosión (P).....	29
6.6 Índices morfométricos.....	29
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	30
7.1 Factor de erosividad de la lluvia (R).....	30

<b>7.2 Factor de erodabilidad (K)</b> .....	31
<b>7.3 Factor topográfico (LS)</b> .....	38
<b>7.4 Factor de cobertura (C)</b> .....	39
<b>7.5 Pérdida de suelo real</b> .....	41
<b>7.6 Pérdida de suelo máxima</b> .....	48
<b>7.7 Control de la erosión</b> .....	50
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	53
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	55

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la población es de 7.000 millones de habitantes y en 2050 se estima que la misma alcanzará los 9.000 millones. Este aumento de la población y la mayor demanda de alimentos ponen en riesgo la conservación de los recursos naturales, y el uso inadecuado de los mismos produce su degradación. Para aumentar la producción de alimentos se debe aumentar la productividad de las tierras actualmente bajo cultivo e incorporar nuevas tierras, muchas de ellas de cierta fragilidad, con bosques o en tierras de laderas (Michelena, 2011).

El suelo es un recurso natural valioso que realiza funciones ecosistémicas esenciales, y proporciona bienes y servicios ambientales tales como alimento, fibra y producción de combustibles, secuestro de carbono, regulación del agua y provisión de hábitat a seres vivos (Swinton et al., 2007 en De Vente et al., 2013). Se encuentra sometido a una creciente presión medioambiental, provocada principalmente por la actividad humana ligada a usos agrícolas, forestales o mineros, los que no siempre aplican las adecuadas medidas de conservación. Asimismo, las actividades industriales, relacionadas con el movimiento de suelos y la ocupación de espacios naturales con un gran impacto debido a la contaminación, y el turismo, debido a una mayor producción de residuos, representan otra dimensión negativa del problema; además, la urbanización creciente involucra cambios notables en el uso del suelo. Todas estas actividades están dañando la capacidad del suelo para continuar prestando plenamente la amplia gama de funciones mencionadas anteriormente (Pizarro et al., 2009).

Son numerosas las consecuencias de un mal manejo del suelo que repercuten directamente en el mismo, degradándolo; entre éstas se destacan la erosión, la compactación, la salinidad, el encostramiento y la disminución de fertilidad (Pando Moreno, 2003). La degradación del suelo se define como “un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir (cuantitativamente o cualitativamente) bienes o servicios” (FAO/PNUMA, 1980 en Ramírez, 2010).

La erosión es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos, como el viento o el agua, o por la fricción continua de otros cuerpos (Troeh et al., 1991 en Cisneros et al., 2012). La erosión de los suelos es un proceso natural, sin embargo, debido al uso intensivo de las tierras agrícolas y al manejo inadecuado, la dinámica del paisaje ha cambiado; y como consecuencia de tales actividades, la erosión de los suelos se está acelerando (FAO, 1990 en Yapur, 2010).

Entre los factores que afectan la erosión del suelo en cuencas montañosas, los factores cobertura y longitud de la pendiente son los más importantes. En dichas cuencas, la remoción de la vegetación puede incrementar en gran medida la escorrentía y la erosión del suelo, dando lugar a inundaciones

y deslizamientos (Varis & Vakkilainen, 2001; Sidle et al., 2004 en Zhou et al., 2008). Cabe resaltar que la cobertura vegetal aporta servicios ecosistémicos (SE, aspectos del ecosistema utilizados activa o pasivamente para producir bienestar humano) de regulación y de soporte, ya que participa en la regulación de los gases (secuestro de carbono), en la regulación de procesos climáticos locales y globales (influencia sobre la temperatura, las precipitaciones, el viento y la humedad), en la regulación del ciclo hidrológico y en el control de la erosión (Rótolo & Francis, 2008).

Los servicios ecosistémicos son cruciales en el desarrollo económico y el bienestar social (Costanza et al., 1997); no obstante, han sido ignorados a lo largo de los años y consecuentemente degradados. Aunque gran parte de la población se ve afectada por la degradación de los ecosistemas, este problema no es incluido plenamente en los procesos de planificación. Para el desarrollo de medidas efectivas, los encargados de tomar las decisiones deberían entender cómo funcionan los ecosistemas, cómo se benefician los seres humanos de los servicios que proveen los ecosistemas, cómo impactan las actividades humanas en el estado de los servicios ecosistémicos y cómo estas actividades podrían ser controladas más efectivamente a través de intervenciones políticas (Kumar et al., 2013).

Con el presente trabajo se busca conocer el riesgo de erosión hídrica y el efecto de la vegetación en el proceso erosivo en la cuenca de río Tunuyán Superior, ubicada en la provincia de Mendoza. Se evaluará la función ecosistémica (FE) del control de la erosión por parte de la cobertura vegetal, es decir la capacidad de la vegetación para mantener el suelo en su lugar.

## **2. HIPÓTESIS Y FUNDAMENTOS**

En este trabajo se plantea la hipótesis de que la cobertura vegetal afecta de forma diferenciada al proceso erosivo según la distribución espacial de los factores intervinientes.

La erosión hídrica constituye uno de los fenómenos más importantes de degradación física del suelo; en la actualidad se estiman que existen aproximadamente 60 millones de hectáreas erosionadas en Argentina. Estos procesos de degradación afectan a gran parte de las tierras agrícolas del país (Región Pampeana), a las regiones áridas y semiáridas, y a las regiones montañosas y serranas ubicadas en la región noroeste de Argentina donde se presentan fenómenos torrenciales y movimientos en masa que afectan la infraestructura vial, ferroviaria y edilicia (Michelena, 2011).

La erosión del suelo y la producción de sedimentos se encuentran entre los procesos geomorfológicos de mayor riesgo potencial debido a su gran extensión superficial, y se reconocen como una cuestión clave para la conservación del ambiente en el siglo XXI. Se estima que al año 2003 una sexta parte del suelo mundial se encuentra afectada por la erosión hídrica, siendo ésta

consecuencia directa de las acciones humanas, tales como la deforestación, la remoción de la cubierta vegetal, el sobrepastoreo, la gestión inapropiada de tierras agrícolas y sobreexplotación de la vegetación natural (Walling et al., 2003 en Alatorre et al., 2003). El conocimiento de la posible tasa de erosión en un sitio es fundamental para realizar un manejo sustentable del suelo, aplicando las medidas de conservación más adecuadas.

La presencia de cobertura vegetal reduce la erosión del suelo ya que protege al mismo del impacto de las gotas de lluvia, incrementa su grado de infiltración, reduce la velocidad de escorrentía y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Baver, 1956 en De Asis & Omasa, 2007).

El descenso producido en los servicios ecosistémicos (SE) y la observación de que estos descensos están relacionados con la expansión de la agricultura y el aumento del uso de fertilizantes y pesticidas, dan lugar a la búsqueda efectiva de formas para monitorear cambios en los sistemas ecológicos y sus impactos en los SE (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 en Dale & Polasky, 2007).

En la década del 90 del siglo pasado se aplicaron políticas neoliberales en Argentina y los sectores frutícola, vitivinícola y agroindustrial iniciaron una fuerte reestructuración, orientada a la producción frutas y de vinos finos para el mercado externo. El Valle de Uco, área de estudio del presente trabajo, se vio afectado por este proceso de internacionalización del capital, lo que trajo aparejado consecuencias territoriales, sociales y ambientales (Furlani de Civit et al., 2001). Debido a esto, en los últimos años la expansión del área cultivada irrigada ha sido considerable. Si bien los efectos asumen en el Valle de Uco características espectaculares por sus dimensiones y tecnología, el balance de las consecuencias en el ambiente local plantea muchos interrogantes debido a la degradación del medio natural (Furlani de Civit et al., 2004).

### **3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS**

Evaluar el riesgo de erosión hídrica y su distribución espacial, y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior, provincia de Mendoza, con el fin de proponer pautas de manejo.

Los objetivos específicos consisten en:

- Evaluar la variabilidad espacial del riesgo de erosión hídrica en la cuenca.
- Evaluar la importancia de la vegetación como función ecosistémica en el riesgo de erosión.



## 4. MARCO CONCEPTUAL

### 4.1. Erosión hídrica del suelo

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depósito de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales:

- *Energía cinética de la gota de lluvia.* La energía de la lluvia se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los terrones y agregados, generando así una salpicadura (erosión por salpicadura) que desprende partículas que luego son arrastradas pendiente abajo.
- *Escorrentía en movimiento.* La escorrentía produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Este agente causa los fenómenos erosivos más visibles, un ejemplo es la formación de cárcavas.
- *Gravedad.* La sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está mojado y en ambientes de grandes pendientes. Los movimientos en masa, deslizamientos de laderas, erosión lateral de meandros de ríos, avalanchas de nieve son ejemplos de la acción de la gravedad en procesos erosivos (Troeh et al., 1991 en Cisneros et al., 2012).

La erosión hídrica es un proceso complejo, multicausal, dinámico, de tipo episódico y sujeto a un conjunto de causas que ocurren en el ámbito de una cuenca hidrográfica. La complejidad de la misma deriva de que puede ser estudiada a diferentes escalas de tiempo y espacio. En la escala temporal el proceso se da por eventos, con un grado de probabilidad determinado por el comportamiento del factor climático y la ocurrencia de tormentas de alta energía, coincidentes con momentos de alta susceptibilidad del suelo y del relieve a la ocurrencia del fenómeno. En la escala espacial la erosión puede ser considerada a escala de lote o parcela, en la cual se pueden analizar las formas más elementales de erosión: salpicadura, mantiforme o laminar, y en surcos. A escala de cuenca pueden visualizarse otros procesos erosivos como cárcavas y erosión de márgenes de ríos y arroyos (Cisneros et al., 2012).

#### 4.1.1. Erosión en Argentina y Mendoza

El uso inadecuado de las tierras áridas en Argentina produjo y produce actualmente diversos impactos negativos sobre los recursos naturales. Según los datos del Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación (PAN, 1999), de los 276 millones de hectáreas que componen el territorio argentino, 60 millones de hectáreas están afectadas por distintos

procesos y grados de desertificación y degradación de suelos, en un proceso cuyo avance se estima en 650.000 hectáreas por año.

El 40% de nuestro país está afectado por distintos niveles de degradación física, química o biológica. A nivel de suelos se pueden mencionar la erosión (hídrica y eólica), compactación, sellado y encostrado superficial, acidificación, salinización, pérdida de fertilidad (materia orgánica y nutrientes) e hidromorfismo del suelo causado por inundaciones y anegamientos.

La erosión hídrica y eólica constituye uno de los fenómenos de degradación más importante. El estudio realizado por la Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FECIC) en 1988, sobre el 80% de la superficie del país, determinó que existían 22 millones de hectáreas con erosión hídrica y 21 millones de hectáreas con erosión eólica. En base a esta información y la aportada de modo complementario por informantes calificados para el 20% restante, se estimaba que existían alrededor de 50 millones de hectáreas erosionadas para el citado año. En el año 2002 esta cifra alcanzó los 60 millones de hectáreas con erosión.

En la provincia de Mendoza los oasis irrigados abarcan 350.000 hectáreas, de las cuales el 60% presentan procesos de degradación de suelos en mayor o menor grado. En estos procesos el hombre tiene una participación activa en cuanto a los factores deteriorantes del suelo, tales como: labranza, remoción de suelo, mecanización, monocultivo, biocidas, sistematización del riego, fertilización, contaminación ambiental, etc. (DCSyLCD, 2002).

#### **4.1.2. Comienzos de los estudios de erosión hídrica**

La toma de conciencia sobre la erosión comenzó en Estados Unidos durante la década de los años 30 del siglo XX, tras un periodo de gran sequía que dejó cantidad de suelos desnudos en la región centro del país provocando el fenómeno conocido como “Dust Bowl” (grandes tormentas de arena provocadas por la erosión eólica del suelo). Este gran desastre fue el que impulsó la creación del U.S. Soil Conservation Service, institución dedicada a promover el desarrollo de formas de uso del suelo sostenibles y autorizada para aportar en la educación y asistencia técnica a agricultores, con el objetivo principal de asegurar que la erosión del suelo sería controlada para prevenir los impactos sobre los rendimientos y rentabilidad de la agricultura que se estaban produciendo (Almorox et al. 1994 en Dumas Salazar, 2012).

Los estudios sobre la erosión hídrica y los modelos para evaluar las pérdidas de suelo comienzan a principios del siglo XX (en el año 1915), con las investigaciones del Servicio Forestal de Estados Unidos (Forest Service de US). El departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) inicia un programa en 1933, creando 10 estaciones experimentales

de erosión de suelos y 40 proyectos para el control de la erosión en todo el país. Todos los datos recogidos en estas estaciones aportaron el conocimiento suficiente sobre los procesos erosivos, dando como resultado la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation, USLE) (Wischmeier and Smith, 1978 en Ramírez, 2010).

#### **4.1.3. Factores que intervienen en el proceso**

Existen cinco factores que intervienen en los procesos erosivos, los cuales se mencionan a continuación.

- *Precipitación.* El principal factor climático que influye en la erosión hídrica es la precipitación y su energía cinética.

Dentro de la caracterización de las lluvias es necesario conocer: cantidad y distribución, ya que la precipitación media y su distribución indican los períodos críticos en cuanto a la ocurrencia de tormentas erosivas; e intensidad, la cual define la energía cinética que desencadena los procesos de desprendimiento y escurrimiento (Cisneros et al., 2012).

En el proceso de erosión hídrica el arranque de material suele producirse por el impacto y salpicadura de las gotas de lluvia; además el transporte de partículas está dado por el flujo laminar que se crea en superficie (Dumas Salazar, 2012).

- *Topografía.* La inclinación y la longitud de la pendiente del terreno juegan un papel fundamental en el proceso de erosión hídrica; así a mayor inclinación y longitud de pendiente suele existir una mayor erosión (Dumas Salazar, 2012).
- *Suelo.* La erosionabilidad o erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento y transporte por los agentes de la erosión (Cisneros et al., 2012). La misma está determinada por la naturaleza de los materiales que forman el suelo, su textura, estructura y permeabilidad.
- *Vegetación.* La vegetación presente en el suelo actúa disminuyendo la erosión ya que protege y sujeta el suelo, y además atenúa la escorrentía favoreciendo la sedimentación de las partículas transportadas (Dumas Salazar, 2012).
- *Sistema de producción o uso del suelo.* Es un factor primordial condicionante de la erosión ya que modifica las condiciones naturales del suelo. La erosión dependerá en gran medida del manejo y del tipo de cultivo implantado (Dumas Salazar, 2012).

El aspecto más directo del uso y manejo de los suelos sobre la erosión se relaciona con el efecto de protección de la superficie del suelo por la vegetación o restos de ella.

Otros aspectos tienen relación con la presión de uso sobre ambientes naturales o seminaturales como las sierras, los pedemontes, las zonas boscosas y las riberas de los ríos y arroyos. La eliminación de la vegetación, el sobrepastoreo o la quema indiscriminada son factores que aceleran los procesos erosivos, e incrementan las tasas de sedimentación de tierras. La sobreexplotación de áridos (arena para la construcción), o la minería a cielo abierto en ambientes serranos, son otros de los factores que implican serios impactos ambientales negativos por el posible incremento en las tasas de erosión, en la degradación de cursos de agua y en la probable contaminación por fuente puntual (Cisneros et al., 2012).

#### **4.1.4. Tipos de erosión hídrica**

Se pueden distinguir cuatro tipos principales de erosión hídrica: erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión por surcos y erosión en cárcavas.

- *Erosión por salpicadura.* Se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo. Se producen pequeños cráteres de impacto, con liberación de partículas, siendo las arenas finas las más afectadas. Puede dar origen a una costra superficial que afectará negativamente en la velocidad inicial de infiltración. Se relaciona directamente con la intensidad y la energía cinética de la lluvia, e inversamente con la estabilidad de los agregados superficiales y la cobertura del suelo (Cisneros et al., 2012).
- *Erosión laminar.* Implica la remoción de una lámina o capa delgada y uniforme de la superficie del terreno que ha sido desprendida por el impacto de las gotas de lluvia y cobra importancia en suelos desnudos con pendientes largas y suaves. Afecta grandes áreas de manera poco perceptible, aunque la cantidad de suelo removido es importante. Da como resultado suelos de colores claros en las partes elevadas del terreno, debido a que desaparece la capa superior u orgánica, por lo que quedan expuestas las fracciones limosas y arcillosas más livianas que son arrastradas y en superficie se observan partículas arenosas y/o gravilla (Yapur, 2010).
- *Erosión por surcos.* Es un proceso en el cual el escurrimiento comienza a desagregar el suelo en la interfase suelo-agua y continúa con el transporte de estas partículas, formándose así pequeños canales de varios centímetros de profundidad. Conforme se incrementan los caudales, la altura del agua y su velocidad, se pasa de un flujo de tipo laminar a uno concentrado o turbulento, definido por la microtopografía del terreno.

Este tipo de escorrentía concentrada tiene una mayor capacidad de desprendimiento y de transporte que el flujo laminar, con lo cual las tasas de erosión por este mecanismo se incrementan. El mecanismo de erosión en surcos requiere la formación de una pequeña “cabecera” que produce una erosión retrocedente (en sentido contrario al flujo). La velocidad de avance del surco depende de la cohesividad del material de suelo, la altura del salto de agua en la cabecera del surco y el caudal y velocidad del flujo (Cisneros et al., 2012).

Las partículas desprendidas son transportadas por una combinación de suspensión, saltación y rodamiento. El potencial erosivo del flujo de agua depende de su velocidad, profundidad, turbulencia del flujo así como del tipo y cantidad del material siendo transportado. Este tipo de erosión incrementa rápidamente con la longitud y el grado de pendiente que causa un incremento de la velocidad y del volumen del flujo de escorrentía superficial. Si bien es más evidente que la erosión laminar, reviste menor gravedad, siendo más fácilmente subsanable mediante labranza (Yapur, 2010).

- *Erosión en cárcavas.* La erosión en cárcavas es un fenómeno que ocurre cuando existe una mayor concentración y volumen en el escurrimiento, y las irregularidades del terreno permiten la unión de varios surcos, formándose zanjas de gran tamaño conocidas como cárcavas (Yapur, 2010). Las cárcavas son la manifestación más visible del proceso erosivo; se desarrollan a partir de la acción del escurrimiento sobre la superficie, luego de que se alcanza un cierto caudal y velocidad de flujo. Morgan (1997) señala que al comparar estas depresiones con los cauces permanentes, relativamente llanos y cóncavos en su perfil, las cárcavas se caracterizan por tener cabeceras y saltos a lo largo de su curso. Además, poseen una mayor profundidad, menor anchura que los cauces estables y transportan más cantidad de sedimentos (Pizarro et al., 2009).

La tasa de erosión en cárcavas depende del potencial de generación de escurrimiento de la cuenca, del área de drenaje que recibe la cárcava, del material del suelo y subsuelo, de la forma que toma la sección y de la pendiente del terreno (Fangmeier et al., 2006 en Cisneros, 2012). La forma y profundidad que adoptan las cárcavas está determinada por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Para materiales poco cohesivos, la forma tiende a ser en “u”, mientras que para materiales más resistentes la forma típica es en “v”.

Este tipo de erosión es el más reconocido por los productores agropecuarios, ya que implica daños bastante visibles en sus tierras y en los caminos rurales que funcionan como vías de circulación de escurrimientos (Cisneros et al., 2012).

#### **4.1.5. Efectos de la erosión hídrica**

Durante el transcurso de cada tormenta de corta duración y gran intensidad, la erosión hídrica y los derrumbes laterales aportan importante volúmenes de bloques, cantos rodados, arena y material fino, los que, por arrastre o suspensión, invaden la planicie aluvial y se depositan según su granulometría, a medida que la corriente va perdiendo capacidad de transporte (CRA-INA, 2009). Las consecuencias de la erosión tienen lugar tanto en el sitio donde se produce la misma como fuera de él. Los impactos que se producen en el sitio de la erosión son la pérdida de suelo, la disminución del contenido de materia orgánica y la disminución de la estructura del mismo, lo que lleva a una reducción de la fertilidad y de la capacidad de retención del agua, y en última instancia a la reducción de la seguridad alimentaria y de la cobertura vegetal (Stocking, 2003 en De Vente et al., 2013). En el campo agrícola el fenómeno se traduce en el adelgazamiento de la capa arable; este efecto disminuye la productividad del suelo e influye en la economía del productor.

Los impactos producidos fuera del lugar de origen implican un mayor riesgo de inundaciones y la disminución de la vida útil de los embalses (Boardman et al., 2003 en De Vente et al., 2013). El fenómeno se traduce en transporte y deposición de sedimentos de partículas desprendidas. Este efecto provoca daños y perjuicios al colmatar diques, canales y aumentar los gastos de potabilización del agua (García et al., 2011).

#### **4.1.6. Modelos matemáticos para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica**

La utilización de modelos matemáticos se ha convertido en una herramienta útil para la predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. Estos modelos permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de los procesos de erosión, analizar su evolución temporal y simular los efectos de cambios en las variables climáticas y paisajísticas como por ejemplo en el uso del suelo (Alatorre et al., 2003).

Se han desarrollado modelos cualitativos y cuantitativos. Entre los primeros, se destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad de la lluvia, suelo, vegetación, topografía), con otros atributos de ajuste más subjetivos; los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y pueden tener una evaluación directa o indirecta. La evaluación directa se desarrolla

en terreno, por medición en parcelas de erosión o por la medición de variables, como por ejemplo sedimentos en el agua y utiliza simuladores de lluvia, cuyos datos son extrapolados a zonas homogéneas. Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos (Almorox et al., 1994 en Honorato et al., 2001). De los numerosos modelos existentes, el más utilizado ha sido la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) de Wischmeier & Smith, propuesta en 1978 (Echeverría et al., 2006).

A pesar de que son modelos empíricos que sólo permiten evaluar a largo plazo la erosión, el cálculo de sus factores puede ser mejorado y adaptado para permitir su aplicación en varias escalas espaciales y tamaños de región utilizando Sistemas de Información Geográfica (Warren et al., 1989 en Zhou et al., 2008). El uso de la tecnología SIG permite el modelado espacial cuantitativo de la erosión hídrica del suelo, de modo que las áreas con alto riesgo de erosión pueden ser identificadas para la implementación de medidas de conservación (Zhou et al., 2008).

La erodabilidad del suelo, la erosividad de las tormentas, la topografía (longitud e inclinación de la pendiente), la cobertura vegetal y el manejo del suelo son los factores tomados en cuenta en el modelo USLE (Echeverría et al., 2006). El mismo ha sido escogido para este trabajo debido a su amplia utilización internacional y su relativa simplicidad.

#### **4.1.7. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE)**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE en inglés o EUPS en español, es una ecuación empírica de tipo paramétrica multiplicativa desarrollada sobre una gran base de datos experimentales, como una metodología para la estimación de la erosión laminar en parcelas pequeñas. Estima las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un periodo representativo de años, que se producen en una parcela o superficie de terreno, debidas a la erosión superficial, laminar y entre surcos, ante unas determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos de suelo (González del Tánago, 1991).

Esta ecuación es el resultado del trabajo de numerosos investigadores, como Zingg (1940), que relacionó la erosión con la pendiente y la longitud de la ladera, Musgrave (1947), que incluyó un factor climático basado en la precipitación máxima, o Smith (1958), que consideró un nuevo factor según el tipo de cultivo. Luego, Wischmeiner y Smith (1962) recogieron estos datos y publicaron su modelo definitivo en el manual 534 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (González del Tánago, 1991).

Por lo general se prefiere su uso debido a su relativa simplicidad, robustez, y también porque representa una aproximación estandarizada para la evaluación del problema de erosión.

Una ventaja del modelo USLE es que puede ser aplicado sobre extensas áreas; incluso se ha aplicado a escala de continental, en los trabajos realizados por Van der Knijff et al. (2000) para Europa y por Lu et al. (2003) para Australia (Alcayaga et al., 2006).

Sin embargo este modelo presenta varias limitaciones. Los métodos para estimar los factores de la ecuación no se encuentran disponibles en muchos lugares fuera de los Estados Unidos; su aplicación en praderas es limitada; está basado sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes; es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado"), que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica; no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas; es una generalización extrema del problema real para el cálculo de la erosión; y por último, no incluye el cálculo de la deposición y acumulación de sedimentos (De Roo, 1993 en Yapur, 2010). Asimismo, este método sólo puede ser empleado a nivel estimativo, con fines exploratorios y comparativos (Orúe et al., 2007 en Ramírez, 2010).

La USLE fue desarrollada para:

- predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos;
- orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas;
- estimar la reducción de pérdida de suelos que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor; y
- determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado (Wischmeier & Smith, 1978).

En la actualidad se emplea prioritariamente el modelo RUSLE, una versión revisada del modelo original USLE.

La ecuación RUSLE, se utiliza sólo para calcular la pérdida de suelo por erosión laminar y erosión en surcos, no para erosión en cárcavas. Considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado de la interacción de tres factores naturales (clima, suelo y topografía) y del impacto de factores influenciados por el hombre directamente (uso y manejo de la tierra) (Renard et al., 1994).



La ecuación fue propuesta por Wischmeier, en base a un estudio de 10.000 parcelas experimentales de 22,13 m de longitud y 9% de pendiente. La ecuación expresa cuantitativamente la pérdida de suelo por erosión, como un valor anual medio a largo plazo (A). La expresión es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Donde:

- A es el promedio anual de pérdida de suelo (Mg/ha.año)
- R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año)
- K es el factor de erodabilidad del suelo (Mg.ha.h/MJ.mm.ha)
- L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional)
- S es el factor de grado de la pendiente (adimensional)
- C es el factor de cobertura vegetal (adimensional)
- P es el factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional).

En la tabla 1 se pueden observar las dimensiones y unidades de A y de los factores K y R, en el Sistema Métrico Internacional.

**Tabla 1: Dimensiones y unidades de los factores A, R y K en el Sistema Métrico Internacional**

FACTOR	DIMENSIÓN	UNIDADES
A	$\frac{\text{masa}}{\text{área tiempo}}$	$\frac{\text{Mg}}{\text{ha año}}$
R	$\frac{\text{long fuerza}}{\text{área tiempo}} \times \frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}}$  $\frac{\text{energía}}{\text{área tiempo}} \times \text{intensidad}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{ha año}} \times \frac{\text{mm}}{\text{h}}$
K	$\frac{\text{masa}}{\text{área}} \times \frac{\text{área tiempo}}{\text{long fuerza}} \times \frac{\text{tiempo}}{\text{long}}$	$\frac{\text{t métrica}}{\text{ha}} \times \frac{\text{ha año}}{\text{MJ}} \times \frac{\text{h}}{\text{mm}}$

Los términos R, K, L, S establecen la influencia de los factores físicos del lugar, poco modificables por el hombre. El producto de los mismos representa la pérdida de suelo que ocurriría en ese sitio si todo el año el suelo estuviese desnudo; por esta razón a este producto parcial se lo denomina erosión o pérdida de suelo máxima o potencial (*A máxima*).

El producto de R, K, L, S por los valores de C y P permite estimar la erosión o pérdida de suelo actual o real (*A real*). Estos valores dependen del porcentaje de cobertura natural y del manejo que el hombre realice del suelo. Para diferentes manejos corresponden diferentes valores de C y P (Ramírez, 2010).

#### **4.2. Servicios ecosistémicos**

Los servicios ecosistémicos (SE) se definen como los componentes y procesos de los ecosistemas que son consumidos, disfrutados o que conducen a aumentar el bienestar humano, tomando en cuenta la demanda de los beneficiarios, así como la dinámica de los ecosistemas (Boyd & Banzhaf, 2007).

Millenium Ecosystem Assesment (MEA, 2005) clasifica a los servicios ecosistémicos en tres categorías:

- *De provisión*, tal como la producción de materias primas, de agua y combustibles, utilizadas directamente por los seres humanos;
- *De regulación y soporte*, relacionado con procesos que afectan el clima, los ciclos hidrológicos, ciclos biogeoquímicos y la formación de suelos;
- *De servicios culturales*, referido a beneficios educativos, científicos, estéticos y artísticos.

La creación de este término sugiere una alternativa para mostrar que la conservación de los ecosistemas no es sólo una aspiración ética de la sociedad, sino también una necesidad estrechamente ligada a la satisfacción de las necesidades básicas de la vida humana. Uno de los atractivos del concepto es su relación directa con el funcionamiento y la integridad estructural de los ecosistemas. Se incluyen en el beneficio que brindan los SE a los distintos actores o sectores de la sociedad, así como las complejas interacciones tanto positivas como negativas entre servicios y entre actores o sectores de la sociedad. Estos contienen los siguientes beneficios (MEA, 2003):

- Los bienes o recursos naturales como el agua o los alimentos.
- Los procesos ecosistémicos que regulan las condiciones en los que los humanos habitan, como la regulación del clima o de la erosión.
- La contribución de los ecosistemas a experiencias que benefician directa o indirectamente a las sociedades, como el sentido de pertenencia o la recreación.

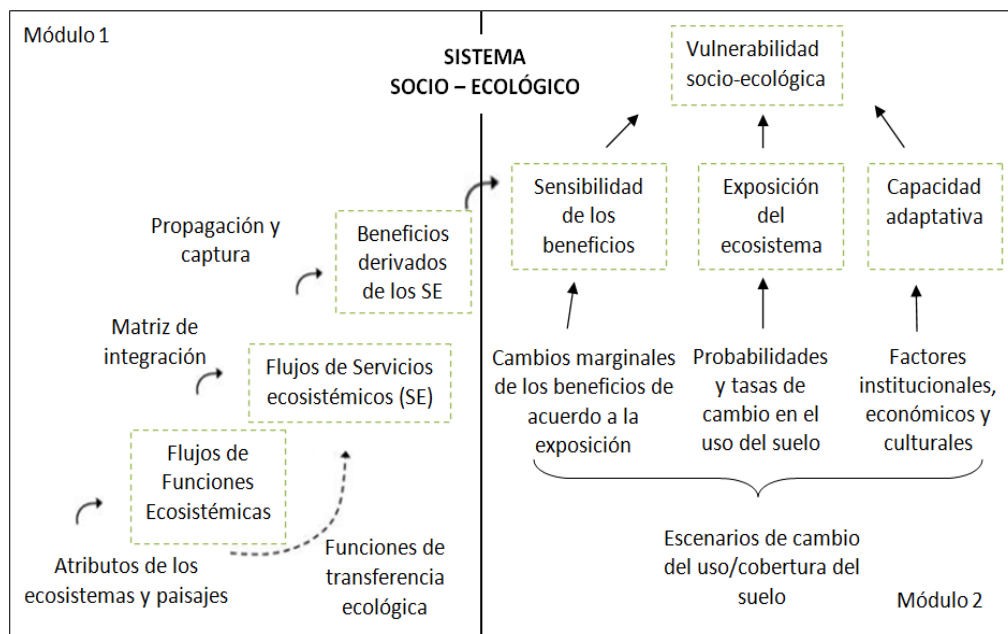
- Los procesos ecológicos básicos que permiten que se provean los anteriores.

La idea principal es que el concepto de los bienes y servicios de los ecosistemas es inherentemente antropocéntrico: es la presencia de seres humanos como agentes de valoración que permite la traducción de estructuras ecológicas básicas y procesos en entidades cargadas de valor. El creciente conocimiento y cuantificación de estos servicios, además de la estimación de su valor económico, proveen una base importante para cambiar las preferencias de la sociedad en cuanto a su conservación y manejo (Lara, 2011).

Uno de los métodos para evaluar los procesos ecosistémicos es el protocolo ECOSER (Lattera et al., 2015), el cual es una herramienta que está orientada tanto al soporte de la toma de decisiones sobre uso del suelo, como a la investigación e integración disciplinaria y colaboración científica en torno a los “flujos de funciones (FE) y servicios ecosistémicos (SE)”, su interacción y su “captura por la sociedad”, así como la “vulnerabilidad socio-ecológica (VSE)” bajo distintos escenarios de pérdida de SE. Esta herramienta consiste en un protocolo o conjunto de procedimientos que permiten evaluar y mapear SE, y estimar la VSE frente a la pérdida de los mismos, consistentes en:

- La cuantificación y representación espacial del flujo de SE.
- El grado de exposición del flujo de SE ante escenarios de cambio, tomando en consideración el tipo de presión y su magnitud.
- La sensibilidad del sistema socio-ecológico (SSE) frente a un escenario de cambio, expresada como el cambio marginal en el flujo de los beneficios derivados de SE a la sociedad.
- La capacidad de adaptación (C) del SSE frente la pérdida del flujo de un dado SE y sus beneficios bajo distintos escenarios de cambio en el uso del suelo.

En la Tabla 2 se definen los términos utilizados en el protocolo ECOSER. El mismo se compone de dos módulos (Figura 1). El Módulo 1 consiste en la evaluación y mapeo funcional del paisaje (área donde se aplique el protocolo), donde el producto generado son los mapas de FE, diferentes SE y sus beneficios asociados. El Módulo 2 se basa en los resultados del Módulo 1 y consiste en la evaluación de la VSE frente a la pérdida de beneficios derivados de los SE.



**Figura 1: Diagrama de flujos del protocolo ECOSER para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos (SE) y estimación de la vulnerabilidad socio-ecológica (VSE) a la pérdida de los mismos (Fuente: Laterra et al., 2015)**

El Módulo 1 conduce a la cuantificación, la integración y la cartografía de los diferentes componentes de la cascada de SE (Figura 2). Esto se realiza a partir de tres pasos principales que consideran: a) la evaluación de las FE y/o paisajes, a partir de la selección de atributos que se combinan dentro de variables sustitutas o proxys basadas en índices o modelos de procesos para representar FE o SE intermedios (Fisher et al., 2009); b) la evaluación de SE a partir de la o las FE que los soportan (considerando que en general, un SE dado resulta de la interacción entre distintas FE), y c) la evaluación de los beneficios que se derivan de los SE considerando que estos se propagan espacialmente y son capturados por beneficiarios tanto directos como indirectos. Como suele ocurrir con los SE culturales, cuando las FE no son conocidas o poseen alta incertidumbre, el SE puede derivarse directamente de los atributos de ecosistemas y del paisaje a través de funciones de transferencia ecológica, es decir, la extrapolación de los valores de referencia del SE dentro de las categorías de cobertura del paisaje.

El Módulo 2 se compone de tres elementos principales: a) la exposición, b) la sensibilidad, y c) la capacidad adaptativa. Los elementos expuestos al cambio de cobertura de suelo son en este caso los SE y el bienestar humano (medido en beneficios). La sensibilidad, por su parte, es el cambio marginal esperado en los beneficios de los SE, frente a un escenario de cambio de uso o cobertura de suelo. La conceptualización de la VSE es un reto y dirige la atención a cuestiones tales como: ¿quién y qué componentes de un sistema son vulnerables al cambio de uso de suelo?, ¿dónde se localizan estos componentes?, ¿cómo estos cambios y sus consecuencias son atenuadas o amplificadas por diferentes condiciones ambientales y humanas? (Turner et al., 2003 en Laterra et al., 2015).

En el siguiente trabajo se llevará a cabo el primer módulo del protocolo para evaluar el control de la erosión como función ecosistémica.

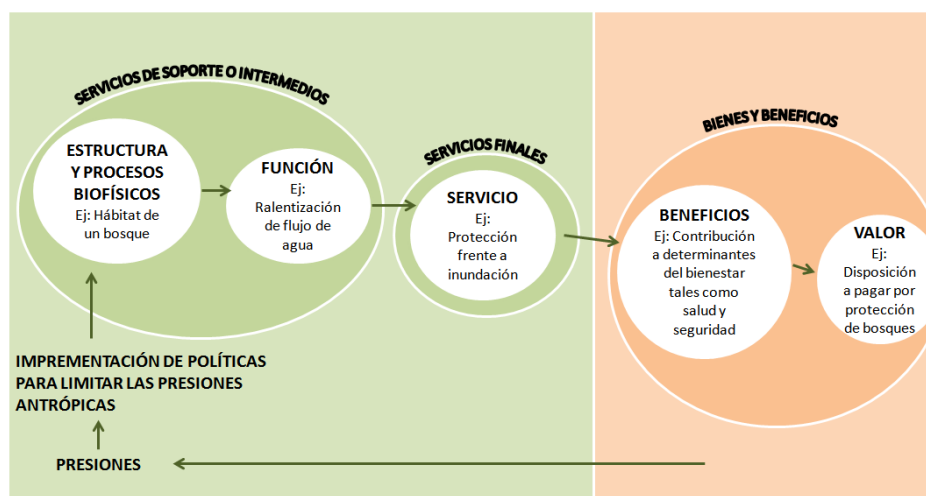


Figura 2: Cascada de los Servicios Ecosistémicos (Fuente: Haines-Young y Potschin, 2010).

Tabla 2: Definición de los términos utilizados en el protocolo ECOSER (Fuente: Laterra et al., 2015)

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Funciones ecosistémicas (FE)	También llamadas “servicios ecosistémicos intermedios”. Atributos y procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen al auto-mantenimiento de los ecosistemas y que soportan el flujo de servicios ecosistémicos.
Servicios ecosistémicos (SE)	Los aspectos de los ecosistemas utilizados activa o pasivamente para producir bienestar humano (Fisher y col., 2009). En el contexto de ECOSER, representan el conjunto de funciones ecosistémicas capaces de transformar el capital natural en beneficios potenciales para los individuos y sociedades humanas.
Flujo de SE	También conocido como provisión u oferta de SE. Es la cantidad de un SE, generada por unidad de tiempo y espacio a partir del capital natural de los ecosistemas.
Captura de SE	El flujo de SE efectivamente utilizado para el beneficio de individuos, grupos sociales o la sociedad en su conjunto. El proceso de captura normalmente exige la intervención de capital social y económico.
Vulnerabilidad socio-ecológica (VSE)	El grado en que el sistema mismo puede ser dañado o afectado como resultado de: a) su exposición o probabilidad de ocurrencia de una presión antrópica o natural sobre los ecosistemas, que a su vez determinan la pérdida de capital natural y reducciones en el flujo de sus servicios ecosistémicos (SE), b) la sensibilidad del sistema socio-ecológico en términos de pérdida de los beneficios que la sociedad deriva de esos SE, y c) la capacidad de adaptación del sistema socio-ecológico a los cambios que se generen producto de ésta.

<b>Sistemas socio-ecológicos (SSE)</b>	También conocidos como socio-ecosistemas. Consisten en una abstracción conceptual sobre la estructura y funcionamiento de porciones del territorio donde se integran componentes sociales y ecológicos, de forma que el funcionamiento del conjunto no puede ser comprendido sin considerar su interacción.
<b>Capacidad adaptativa (C)</b>	Es el grado en que un SSE puede moderar los daños potenciales, aprovechar las oportunidades o hacer frente a las consecuencias de reducciones en el flujo o a la pérdida de un dado SE.

#### 4.2.1. Control de la erosión

Para estimar el control de la erosión, siguiendo el protocolo ECOSER, se utiliza la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE); la cual, como se mencionó anteriormente, predice la pérdida de sedimentos media anual (medida en Mg/ha.año) de acuerdo a factores climáticos, topográficos, edáficos y de uso y cobertura del suelo.

Empleando esta ecuación el modelo estima la capacidad de la vegetación de mantener el suelo en su lugar, mediante la comparación de las tasas de erosión real en el sitio de estudio versus las tasas de erosión potencial que tendría el mismo (suelo desnudo). Por lo tanto, el control de la erosión de un sitio es igual a la diferencia entre la pérdida de suelo máxima o potencial (*A máxima*) y la pérdida de suelo actual o real (*A real*) (Barral, 2015).

#### 4.2.2. Importancia de la cobertura vegetal en los procesos erosivos

La vegetación influye sobre la erosión aumentando la estabilidad de los agregados del suelo y la propia cohesión del mismo, protegiéndolo del impacto de las gotas de lluvia, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía. Asimismo, la erosión influye sobre la vegetación directamente, mediante el desarraigo de las plantas y la eliminación y redistribución de las semillas; y también lo hace de manera indirecta, ya que 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).

A partir de los estudios realizados se establece para una gran amplitud de escalas espaciales, tipos de suelo, climas y vegetación que la relación entre la cobertura vegetal y la tasa de erosión hídrica se ajusta a una curva exponencial negativa (Gyssels et al. 2004 en García-Fayos, 2004). Así, para un valor de intensidad de lluvia dado, la tasa de erosión disminuye muy rápidamente con pequeños incrementos de la cobertura vegetal hasta alcanzar un

punto de inflexión (Figura 3); a partir de ese punto de inflexión la reducción de las tasas de erosión es cada vez menor aunque los incrementos de la cobertura vegetal sean grandes.

Se distinguen dos tipos de efectos de la vegetación sobre los procesos de erosión. Por una parte están los efectos sobre el agente erosivo, la precipitación, que se concretan en la capacidad de las plantas de interceptar y redistribuir la precipitación así como en influir sobre la capacidad de infiltración del suelo. Por otra parte están los efectos sobre la resistencia del suelo frente a dicho agente erosivo, es decir, los efectos sobre la estabilidad física del suelo.

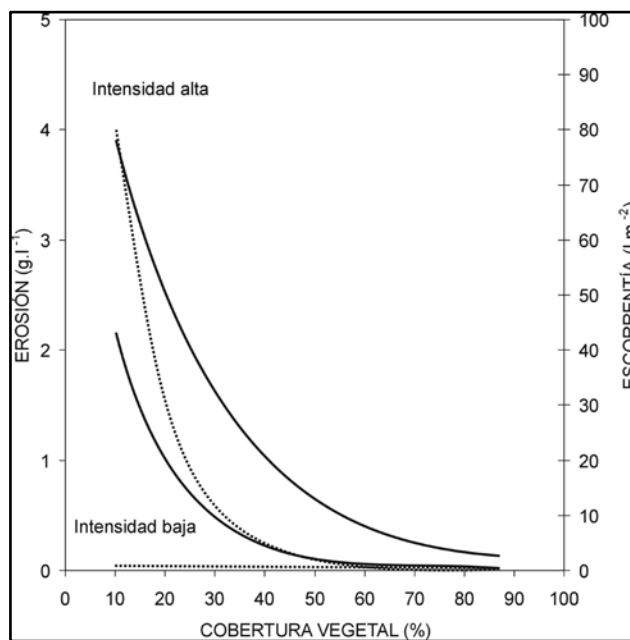


Figura 3: Relación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo (línea continua) y con la escorrentía (línea discontinua) (Fuente: García-Fayos, 2004)

#### ▪ *Intercepción y redistribución de las precipitaciones*

Del total de la precipitación incidente, parte es interceptada por las hojas y ramas de las plantas y evaporada desde allí, y parte de ella se redistribuye a través de las estructuras de las plantas hasta llegar de nuevo al suelo. Cuanto mayor volumen y complejidad estructural tenga una planta o una comunidad vegetal más importante será su capacidad de interceptación y menores las tasas de erosión, aunque esa capacidad también varía en función de la precipitación caída.

Las gotas de lluvia que no son interceptadas por la vegetación se convierten en un factor de destrucción de los agregados al alcanzar el suelo. Al impactar las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo, éstos se fragmentan en otros de menor tamaño o en partículas minerales que son más fácilmente arrastradas y que tapan los poros del suelo, sellándolo y favoreciendo, por tanto, la escorrentía superficial. Por otra parte, las gotas de lluvia al

impactar sobre el suelo salpican literalmente dichos agregados y partículas en lo que se conoce como efecto salpicadura, favoreciendo que éstos sean después arrastrados por el agua de escorrentía.

- *Infiltración y escorrentía*

La relación entre escorrentía superficial y cobertura vegetal es negativa. Una parte de esta relación se explica por la capacidad de interceptar y almacenar agua que tiene la vegetación y que ya fueron explicadas, y otra parte por el aumento de la capacidad de infiltración del suelo (Casermeiro et al. 2004 en García-Fayos, 2004).

Propiedades como la textura del suelo, su porosidad, el grado de compactación, su espesor y la presencia de grietas en el sustrato, tienen gran importancia en determinar dónde, cuándo y en qué medida se infiltra el agua. Y parte de estas propiedades están influidas directamente por la vegetación, a través del aporte de materia orgánica, la dinámica radicular y la estimulación de la actividad biológica del suelo.

Los agregados estructurales del suelo se unen entre sí gracias a las raíces de las plantas y a las hifas de los hongos, de manera que se crea una estructura compleja que puede perdurar incluso cierto tiempo después de ser eliminada la parte aérea de las plantas (Tisdall & Oades, 1982 en García-Fayos, 2004). El efecto mecánico de la cohesión producida por las raíces es muy importante no sólo frente a la erosión por salpicadura y por escorrentía sino también frente a otros tipos de erosión. En los casos de erosión en cárcavas, la existencia de un entramado de raíces tanto en superficie como en profundidad confiere estabilidad al suelo (García-Fayos, 2004).

## **5. ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TUNUYÁN SUPERIOR**

### **5.1. Localización**

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Tunuyán Superior o Valle de Uco, ubicada entre los 33° 08' y 34° 04' de latitud Sur y entre los 69° 22' y 68° 58' de longitud Oeste (Figura 4). El límite Norte lo constituye la cuenca del río Mendoza, definida por las serranías que bajan del Cordón del Plata hacia la llanura. El límite oriental lo constituye el borde de la cerrillada pedemontana o Huayquerías. Por último, el límite Sur está dado por la divisoria de cuenca con el río Diamante. La superficie total de la cuenca del río Tunuyán es de 14.040 km<sup>2</sup>.



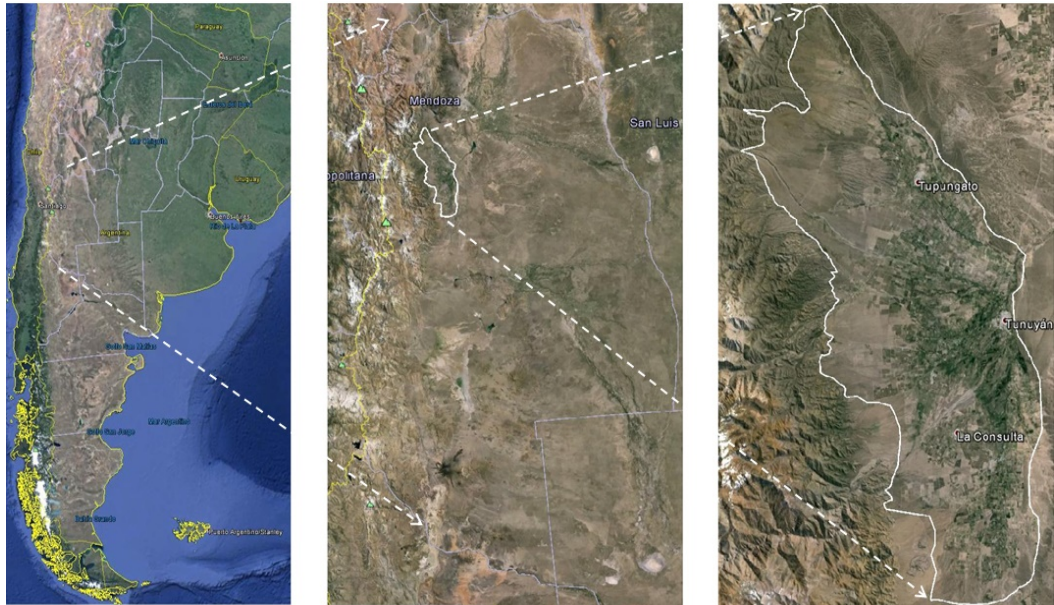


Figura 4: Ubicación de la zona de estudio. (Fuente: Google Earth Pro)

## 5.2. Geomorfología

El Valle de Uco, desde el punto de vista geomorfológico, es considerado como una llanura o planicie agradacional pedemontana y forma parte de la Depresión de los Huarpes – Graben de Tunuyán, constituyendo un elemento negativo, deprimido y más o menos aplanado.

Representa una gran depresión que fue rellenada continuamente con depósitos aluviales desde el Terciario al Cuaternario. Más precisamente es una de las unidades geomórficas de la Depresión de los Huarpes que, ubicada en su extremo norte, se conoce como "Bajada Joven al Graben de Tunuyán" (Martinis et al., 2002).

## 5.3. Clima

Su clima es continental, mesotermal y árido, según la clasificación de Papadakis e índices de Knoche, De Martonne, Thornwaite y Blair. La temperatura media es próxima a los 15°C, con máxima y mínima absolutas de 38°C y -12°C, respectivamente. La precipitación anual media es de 320 mm y se distribuye presentando una mayor frecuencia, intensidad y cantidad en los meses de verano. La radiación solar es intensa y el porcentaje de nubosidad es bajo. Todo ello contribuye a que sus suelos sean decrépitos, deficitarios en materia orgánica y, consecuentemente, no estructurados en general (Martinis et al., 2002).

El clima de tipo continental que existe en la cuenca da como resultado grandes variaciones de las condiciones atmosféricas, generando un efecto de estacionalidad considerable. El factor altitud contribuye, también, a definir grandes diferencias climáticas: desde el este al oeste, en una distancia aproximada de 180 km, se pasa de 600 m a 6.000 m de altura sobre el nivel del mar. En

términos generales se puede afirmar que en la zona baja de la cuenca el clima es principalmente árido, en la zona precordillerana es semiárido, y en las zonas altas húmedo (Hernández et al., 2002).

En la cuenca existen dos regímenes de precipitación, los cuales varían de una estación a otra. Uno es netamente mediterráneo, con precipitaciones importantes concentradas en los meses de invierno, característico de las zonas altas de la cuenca; y otro es del tipo monzónico, donde las mayores precipitaciones se registran entre los meses de primavera y otoño.

#### **5.4. Hidrología**

Los ríos y arroyos de la zona, son producto del derretimiento de las nieves precipitadas en la alta montaña. Son 21 cursos de agua superficiales: los ríos Tunuyán y Las Tunas, y los arroyos Negro, Cuevas, Guevara, de las Casas, La Carrera, Olmos, Novillo Muerto, Villegas, Grande, Pircas, Santa Clara, Chupasangral, Cepillo, Cruz de Piedra, Cortaderas, Papagallos, El Manzano, del Rosario y Yaucha. Aportan sus aguas a la cuenca desde el oeste y sus regímenes son de tipo nival: caudales crecientes desde la primavera al verano y decrecientes hacia el invierno. Todos, excepto el río Tunuyán que tiene su origen en la Cordillera Principal, tienen sus áreas de recolección o recepción de sus aguas (cuencas altas) en la Cordillera Frontal (Martinis et al., 2002).

El río Tunuyán, cuyo módulo es de 28,5 m<sup>3</sup>/s, es el más caudaloso. El tramo del río Tunuyán cuyo cauce está trazado sobre la cuenca Centro, y cuyas aguas aportan a la misma, se denomina Tunuyán Superior, en contraste con otro tramo del río, conocido como Tunuyán Inferior, que se encuentra aguas abajo y que aporta en conjunto con el río Mendoza a la cuenca hidrogeológica Norte.

En el valle existen variados aprovechamientos (riego agrícola, industria, consumo poblacional), todos ellos sin derechos adquiridos a través de concesiones. Cabe aclarar que el río constituye prácticamente la única efluencia de la cuenca (no existiría flujo subterráneo saliente) y el total que conduce se dirige al dique embalse El Carrizal. A partir de éste, hacia el norte y este se desarrolla el sistema del río Tunuyán Inferior de la cuenca Norte (Martinis et al., 2002).

Al Este de la cuenca, fuera de ella, originados por precipitaciones en las formaciones que limitan al este de la cuenca, existen varios arroyos secos (de cursos temporarios) que aportan esporádicamente sus crecidas, aunque su magnitud es despreciable en relación con los arroyos del oeste. Finalmente, completando la hidrografía del área, al este y surcando la cuenca en los sentidos oeste-este y norte-sur, partiendo desde la zona límite de acuífero libre y acuíferos confinados, se encuentra una serie de cursos de agua que se alimentan básicamente de los

niveles freáticos. En algunos casos y periódicamente, reciben desagües de riego y de lluvia. A todos ellos se los considera egresos de la cuenca, ya que sus aguas vuelcan al cauce del río Tunuyán en su tramo terminal dentro del Valle de Uco, donde él también actúa como dren. Vía río Tunuyán salen de la cuenca, como producto de la colección de agua subterránea desde el nivel freático, unos 17 m<sup>3</sup>/s (Martinis et al., 2002).

### **5.5. Suelos**

Los suelos del Valle de Uco se originan a partir del holoceno antiguo (cuaternario), sobre limos y arenas finas depositadas antes y después del primer y segundo estadio glacial. El valle descansa sobre una serie de conos de deyección tanto del río Tunuyán, como de los ríos y arroyos afluentes de él. Predominan principalmente los suelos del tipo Entisoles, los cuales son de escaso desarrollo. En la parte Norte de la cuenca también se encuentran suelos del orden Molisol (figura 5). El primer orden está compuesto por dos subórdenes: psammentes y fluventes.

Los suelos torrifluventes típicos generalmente se desarrollan sobre sedimentos recientes depositados por ríos (Regairáz, 2000). Estos son suelos minerales generalmente de climas áridos y régimen de humedad tórrido, sin horizontes bien definidos, de poca profundidad, limitada por pedregosidad y con un gran contenido de piedras en superficie. Poseen un buen drenaje, una pendiente promedio del 2% y en estos suelos es posible encontrar plantaciones de frutales de carozo y pepita, producción vitícola y chacras dedicadas a la horticultura, en todos los casos bajo riego.

En el sector noroeste del departamento de Tupungato, en el valle de Las Carreras se encuentran suelos correspondientes a Haplustoles énticos, los cuales poseen un alto contenido de materia orgánica, de 1,5 m de profundidad aproximadamente con algo de piedras. Son los únicos molisoles descritos por el mapa de suelos INTA (1990), para la provincia de Mendoza; en estos suelos es común encontrar producciones de papa, en rotaciones con centeno en secano, y ganadería (Cara, 2012).

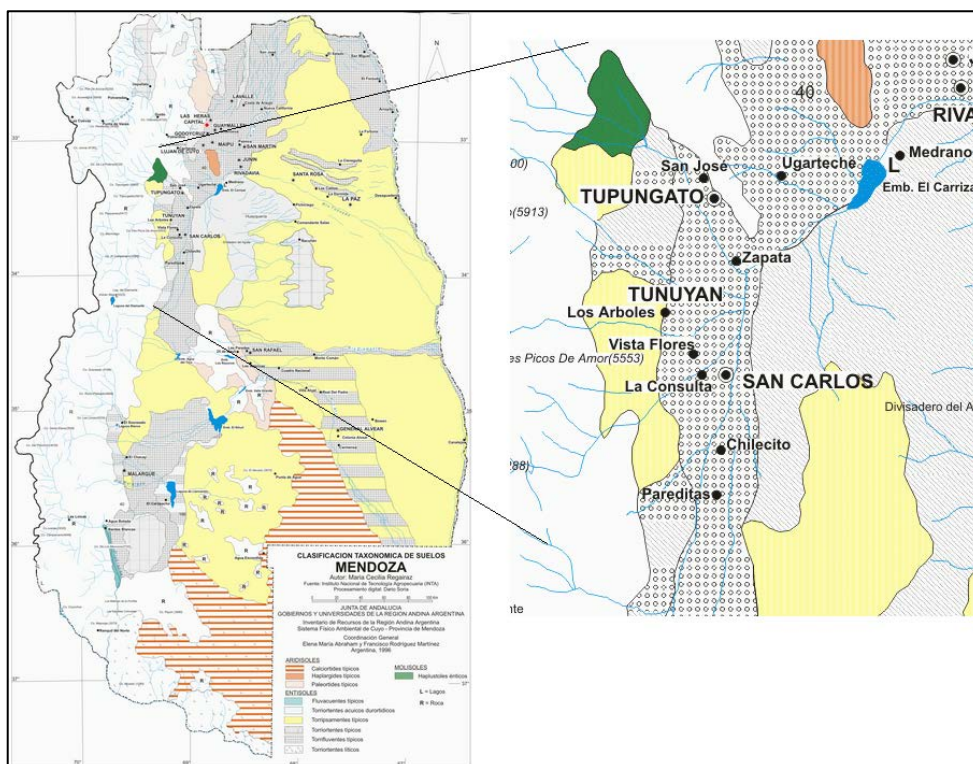


Figura 5: Suelos de la región del Valle de Uco. (Fuente: Regairáz, 2000)

## 5.6. Flora y Vegetación

La vegetación es característica de zonas áridas, aunque con mayor cantidad y diversidad de especies en la parte más baja de la cuenca y en Tupungato, como consecuencia de la abundante agua que aflora a través de vertientes (Martinis et al., 2002).

En el sector de la depresión de los Huarpes, se desarrolla la formación de jarilla, estepa arbustiva en la que predomina *Larrea divaricata*, y *L. cuneifolia* “jarilla”, y *Prosopis flexuosa* “algarrobo dulce” en forma arbustiva, estos jarillales se extienden desde los 1.300 a 1.400 m.s.n.m., siendo sustituidos a mayores alturas por comunidades montañosas. En el piedemonte se desarrolla un denso jarillal, al cual se ha incorporado *Motea aphilla* “ala de loro”, y el estrato herbáceo está representado por *Acantholippia seriphoides* “tomillo”. Debido a que estos jarillales son muy pastoreados por las cabras, el suelo removido y endurecido es ocupado por *Lycium tenuispinosum* “piquillín de víbora” y *Opuntia aoracantha* (quisco); finalmente, en zonas de rellenos aluviales, se destaca la comunidad compuesta por *Larrea cuneifolia* “jarilla”, *Bulnesia retama* “retamo” y *Geoffrea decorticans* “chañar”. Las gramíneas son escasas y sólo aparecen en formas aisladas de los géneros *Bouteloua* y *Tridens*; el pastizal presente en la cordillera y en el piedemonte es representado por comunidades del género *Stipa*, con una cobertura entre 20% y 23% de unos 20 a 40 cm de altura, entre los 1.900 y 2.500 m.s.n.m. (Cara, 2012). La fisonomía

general del valle se completa con amplias áreas cultivadas, que transformaron partes del mismo en uno de los oasis más importantes de Mendoza (Martinis et al., 2002).

### **5.7. Aspectos Socio-Económicos**

En la cuenca del río Tunuyán superior se ha desarrollado uno de los principales oasis de la región. A partir del siglo XVIII se empezaron a cultivar alimentos para ganado que eran trasladados a Chile dando lugar a la formación de villas del floreciente Valle de Uco. Éste se caracterizó por la instalación de potreros y estancias utilizando las abundantes aguas del río y los numerosos arroyos y vertientes de la región para la producción de frutales de pepita (peras y manzanas), sobre todo en Tunuyán, y la viticultura con pequeños productores de variedades viníferas de calidad en San Carlos y Tupungato. A partir de 1997, ingresan importantes inversiones extranjeras mediante tres modalidades: asociación con empresas locales, compra de firmas, o implementación de emprendimientos totalmente nuevos (Furlani de Civit et al, 2001). Se trata de un área que posee una aptitud excepcional para la producción de uvas finas, caracterizada por suelos pedregosos muy permeables, amplitud térmica anual y diaria, y disponibilidad de agua subterránea (Gutiérrez de Manchón et al., 1999). Una de las actividades que se encuentra en vía de desarrollo es el agroturismo, teniendo en cuenta la vocación principal de la población y las características atractivas del espacio agrícola.

En la actualidad, un tercio del área se encuentra implantada con viñedos, la mayor parte de variedades finas, entre las que se destacan Chardonnay, Merlot y Malbec; este rubro productivo es el responsable de la expansión del valle hacia el piedemonte. Otro tercio son frutales, durazneros y ciruelos (variedades para consumo en fresco o industria), perales, manzanos y nogales. Un 24% son huertas dedicadas a producción de papa, ajo, zapallo y tomate. Un 10% corresponde a plantaciones de álamo y el resto corresponde a forrajeras de corte o pastoreo, oleaginosas para semilla y plantas aromáticas (Pizzolato, 2012).

En los sectores altos del distrito de La Carrera se desarrolla históricamente ganadería de bovinos sobre pasturas. En la zona baja del departamento de Tupungato, distritos de Anchoris, La Arboleda y Zapata, se encuentran explotaciones de hidrocarburos, algunas comenzadas en la década del 40 y otras actuales (Cara, 2012).

## **6. METODOLOGÍA**

Como se mencionó anteriormente, para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica se utilizará la RUSLE. En el diagrama 1 se presenta la metodología que fue llevada a cabo para realizar el presente trabajo.

Se utilizarán los softwares de sistemas de información geográfica QGIS (<http://qgis.org/>) y SAGA GIS (<http://saga-gis.org>) y de estadística Infostat (<http://www.infostat.com.ar/>).

A continuación se detalla la metodología para calcular cada uno de los factores presentes en dicha ecuación.

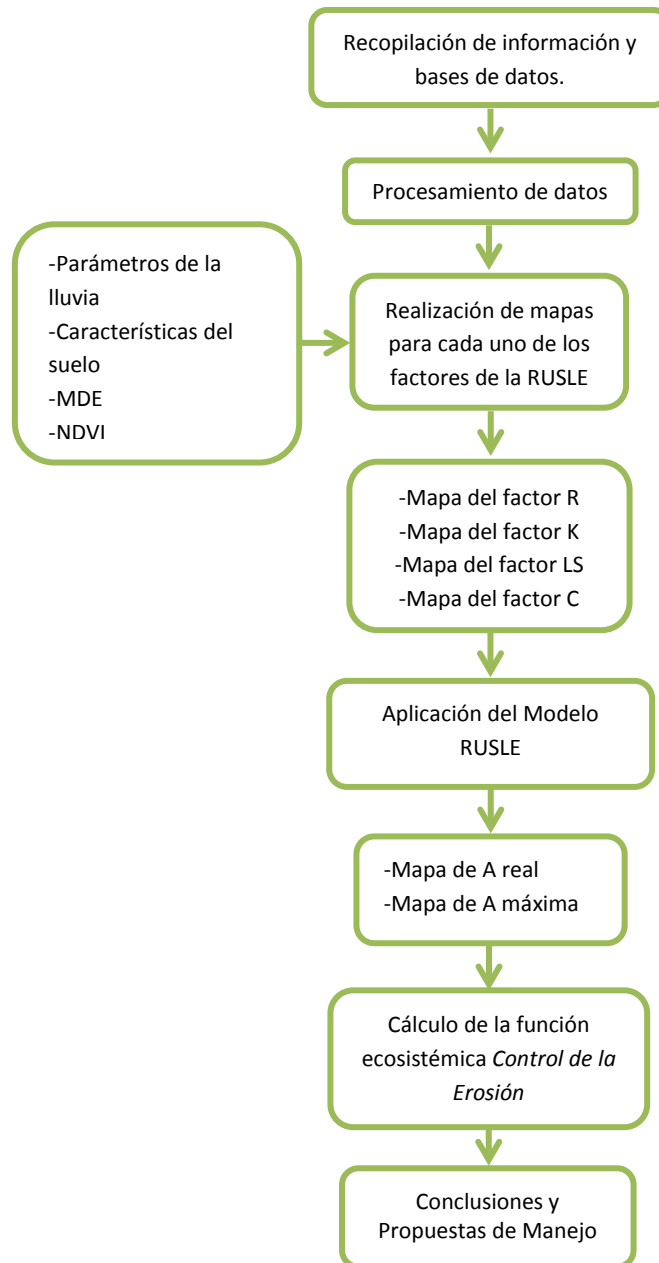


Diagrama 1: Metodología (Fuente: Elaboración propia)

### 6.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)

Los datos del factor R fueron extraídos de la tesis de grado de Quiroz (2015). Los valores del mismo fueron calculados en función de la energía cinética y la intensidad máxima de la lluvia (Tabla 3).

La información de precipitaciones mensuales fue extraída de registros históricos de las estaciones meteorológicas Tunuyán, Agua Amarga, Vistaflora y La Consulta, de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas de Mendoza (<http://contingencias.mendoza.gov.ar/>), y de la estación Valle de Uco, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>).

A partir de la localización espacial de las estaciones meteorológicas mencionadas se generaron mapas de precipitaciones medias mensuales, que mediante un modelo de regresión permitieron estimar el factor R.

Con los datos del factor R anual y mensuales, y las coordenadas de las estaciones meteorológicas, se confeccionó una tabla, la cual fue ingresada a QGis, en donde se realizó una interpolación; se utilizó la opción Ponderación Inversa a la Distancia (IDW), con un tamaño de celda de 30 m. Así se obtuvo el mapa del factor R que luego fue utilizado en la RUSLE.

**Tabla 3: Valores del factor R en la cuenca de río Tunuyán superior (Fuente: Quiroz, 2015)**

Mes/Estación	La Consulta	Tunuyán	Agua Amarga	Peral	Vista Flores	Cordón del Plata	Tres Esquinas
Enero	73,52	140,83	68,22	88,74	70,97	152,70	82,82
Febrero	99,97	152,56	116,07	121,32	164,96	113,75	110,13
Marzo	114,82	178,83	206,51	161,48	120,140	226,77	89,41
Abril	71,26	104,49	75,05	94,92	153,74	55,63	70,50
Mayo	11,51	45,40	33,24	45,39	50,72	41,26	23,12
Junio	19,26	43,33	31,04	16,05	32,27	18,66	13,95
Julio	23,72	28,98	39,75	26,74	56,01	15,36	23,97
Agosto	25,53	65,86	74,40	57,54	88,63	66,01	35,38
Septiembre	16,73	72,98	51,77	67,59	49,35	63,20	34,55
Octubre	46,63	120,19	106,02	105,041	117,06	112,83	105,41
Noviembre	66,15	93,59	84,07	73,13	56,40	82,78	71,47
Diciembre	71,29	99,44	81,65	52,99	88,38	57,93	106,49
<b>R ANUAL</b>	<b>640,40</b>	<b>1146,48</b>	<b>967,81</b>	<b>910,92</b>	<b>1048,65</b>	<b>1006,89</b>	<b>767,21</b>

## 6.2. Factor de erodabilidad (K)

El factor K se obtiene a partir de la siguiente ecuación (Renard et al., 1994):

$$100 K = (2,1M^{1,14} * (10)^{-4} * (12 - a) + 3,25 * (b-2) + 2,5 * (c - 3))$$

Donde:

- M= (100 – cl)\*(si+vfs)
- cl= % de arcilla (<2 μm)
- si=% de limo americano (entre 2 y 50 μm)
- vfs= % de arena muy fina (entre 50 y 100 μm)
- a= % porcentaje de materia orgánica en el suelo
- b= clase de estructura del suelo (en el área de estudio es siempre 4)
- c= clase de permeabilidad del perfil

Para el caso de estudio se aplicó dicha ecuación corregida, la cual fue propuesta por la Estación Experimental Agropecuaria de INTA Paraná para suelos con menos del 70% de limo (utilizando el Sistema Métrico Internacional):

$$100 K = 0,1019 * 1,292 * (2,1M^{1,14} * (10)^{-4} * (12 - a) + 3,25 * (b-2) + 2,5 * (c - 3))$$

Se recopiló información de suelos (granulometría, materia orgánica, profundidad) de una base de datos georreferenciados de 343 perfiles de suelos relevados en 2004-2005.

Para estimar el porcentaje arena muy fina se siguió el siguiente procedimiento: a partir de un relevamiento de granulometría y arena muy fina (117 datos) en las zonas de Gualtallary y Altamira, se estableció una relación funcional entre arena muy fina y las demás fracciones granulométricas. Para ello se utilizó el software Infostat, con el que se hizo un análisis multivariado de árbol de regresión hasta el nivel 4, donde la variable dependiente fue arena muy fina y las regresoras fueron arcilla, limo americano y arena americana.

Para estimar la superficie de interpolación de las variables arcilla, limo americano y arena muy fina se realizó un análisis geoestadístico en SAGA GIS.

El análisis geoestadístico consta de dos partes:

l) Análisis estructural (Spatial and geostatistics - Points): sirve para determinar los tres parámetros del modelo (*nugget* o pepita, *sill* o meseta, *range* o rango). Estos parámetros se obtienen a partir de un gráfico llamado variograma donde el eje X representa distancia y el eje Y representa varianza.



II) Interpolación o 'krigeado' (Spatial and geostatistics - Kriging): se obtiene un *grid* (en base a los parámetros del modelo determinados anteriormente) para cada variable que luego se abre en Qgis; los cuales son utilizados en la ecuación para obtener el factor K.

Para el parámetro **a** (% de materia orgánica), debido a que existen pocos datos de la zona, se ha considerado un valor promedio igual a 0,7.

El término **b** de la ecuación USLE puede tomar diferentes valores (Tabla 5); para el caso de este estudio toma el valor 4.

Tabla 5: Valores de estructura de suelo (b)

Estructura	Valor
Granular muy fina (<1 mm)	1
Granular fina (1-2 mm)	2
Granular media (2-5 mm) o gruesa (5-10 mm)	3
Bloques, laminar o maciza (> 10 mm)	4

Para conocer el valor de **c** (clase de permeabilidad), se realizó un mapa de texturas del suelo en el software SAGA GIS, a partir de la herramienta Grid Analysis (Soil Texture Classification), y a continuación se llevó a cabo una reclasificación de la textura.

### 6.3. Factor topográfico (LS)

El factor LS es el producto entre la longitud de la ladera (L) y el gradiente de la pendiente (S). L se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo suficiente como para que ocurra la deposición o hasta el punto en el que el escurrimiento entra en un canal definido; y S se expresa en porcentaje (diferencia de cota en 100 m de distancia horizontal).

Los datos fueron extraídos de Pérez (2014). En dicho trabajo la autora obtuvo, a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) extraído del sitio de la NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) y con una resolución de 30 m, los índices S y L utilizando el análisis morfométrico.

### 6.4. Factor de cobertura (C)

El factor de cobertura (Factor C) ha sido uno de los coeficientes más difíciles de estimar en grandes áreas geográficas. Tradicionalmente, las estimaciones espaciales han sido hechas por una simple asignación de valores del Factor C extraído de la literatura o de datos a campo

contenidos en un mapa de clasificación de la cobertura del suelo (Folly et al., 1996; Juergens and Fander, 1993; Morgan, 1995 en De Asis & Omasa, 2007). Este método, sin embargo, da lugar a estimaciones del factor C que son constantes para áreas relativamente grandes y no refleja una adecuada variación en la vegetación que existe dentro de las mismas (Wang et al., 2002 en De Asis & Omasa, 2007). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para estimar y realizar mapas el factor C; el mismo se relaciona directamente con dicho factor mediante análisis de regresión (De Asis & Omasa, 2007).

Con las bandas rojo (B4) e infrarrojo cercano (B5) de la imagen satelital extraída del Satélite LANDSAT 8, fecha de captura 5 de marzo de 2015, se calculó el índice NDVI:

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

A partir del índice NDVI y utilizando la ecuación que aparece a continuación, se calculó el factor C (Smith et al., 2007).

$$C = 0,45 - 0,805 \times NDVI$$

#### **6.5. Factor de prácticas mecánicas de control de erosión (P)**

En el caso de estudio, el factor P es igual a 1 debido a que no existen prácticas de control de la erosión.

#### **6.6. Índices morfométricos**

Los datos obtenidos a partir del modelo RUSLE se ajustaron utilizando dos índices morfométricos, indicadores de signos de erosión. Los mismos fueron obtenidos a partir del MDE y se mencionan a continuación:

- *Índice de humedad topográfica (Wetness Index)*

El índice de humedad fue originalmente desarrollado para predecir las áreas saturadas y la profundidad del nivel freático del suelo. Posteriormente ha sido empleado para predecir el contenido de humedad del suelo y para identificar áreas de erosión y/o deposición potencial de materiales, y para la predicción del desarrollo de cárcavas. Valores altos del índice de humedad indican potencial para la acumulación de agua en el suelo, y coincide con aquellas zonas de baja pendiente y con un valor de área de drenaje específica alto. Valores bajos del índice de humedad indican bajo potencial topográfico para la acumulación de agua en el suelo, ya sea por tratarse de un área con una cuenca de captación pequeña o por un alto valor de pendiente, indicador de suelos bien drenados (Cara, 2012).

En áreas completamente planas el cálculo de este índice puede no ser útil, de modo que valores muy bajos de pendiente pueden arrojar resultados de una magnitud exagerada que no es consistente, en ocasiones, con el significado físico del parámetro calculado (Olaya, 2004).

- *Índice de potencia de flujo superficial (Stream Power Index)*

El índice de potencia de flujo superficial es un estimador de la fuerza erosiva del flujo superficial. Este índice fue concebido con el fin de predecir las áreas potenciales con riesgo de desarrollo de cárcavas debido a la concentración del flujo superficial.

Indica las áreas donde existe potencial para la concentración del flujo superficial y donde, además, la pendiente puede producir que el flujo alcance una velocidad tal que provoque la incisión con el consiguiente desarrollo de cárcavas (Cara, 2012).

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **7.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)**

En la cuenca del río Tunuyán superior, el factor R toma valores que oscilan entre 673 y 1058 MJ.mm/ha.h.año. En la Figura 6 se observa que las zonas de mayor valor de R (en rojo) corresponden a los tercios superior e inferior de la cuenca, mientras que la zona centro posee los menores valores de R (en azul).

En el norte de Argentina se han realizado estudios que determinan la erosión hídrica utilizando el modelo RUSLE, en el cual el factor de erosividad de la lluvia (factor R) fue obtenido a partir del método de Arnouldus. Yapur (2010) en la cuenca del río Bermejo (Salta-Jujuy) halló valores del factor R que oscilan entre 848,80 y 210,79; y Ramírez (2010) en la cuenca del río Juramento (Salta) halló valores que varían entre 711,19 y 2,29. En Estados Unidos (abarcando los estados de Texas, Arkansas, Colorado, Kansas, Louisiana, New México y Oklahoma), Wang et al. (2002) realizaron un estudio para conocer el factor R utilizando un método geoestadístico llamado Simulación Gaussiana Secuencial, y hallaron que dicho factor varía entre 5,98 y 6,37.

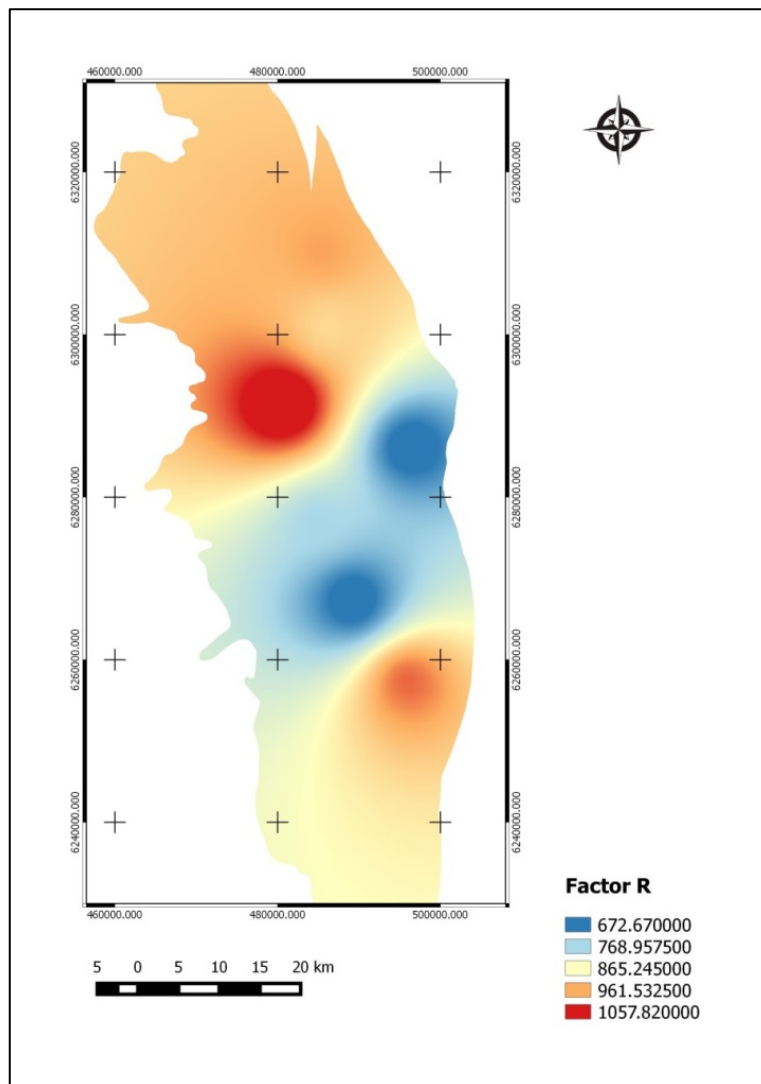


Figura 6: Factor R en la cuenca del río Tunuyán Superior

## 7.2. Factor de erodabilidad (K)

Los resultados del análisis multivariado con árbol de regresión se muestran en las Figuras 7 y 8.

Para obtener la predicción de arena muy fina se siguió el siguiente procedimiento: cuando el valor de arena americana es mayor a 91,5, corresponde un valor de arena muy fina de 9,17 (nodo 2); cuando el valor de arena americana es menor o igual a 91,5 se debe observar el valor de limo americano, si el mismo es mayor a 23,5 existen dos posibilidades: cuando el valor de arcilla sea menor o igual a 7,5 corresponde un valor de arena muy fina de 23,31 (nodo 1.2.1) y cuando el valor de arcilla sea mayor a 7,5 corresponde un valor de arena muy fina de 27,4 (nodo 1.2.2). Si el valor de limo americano es menor o igual a 23,5 también hay dos posibilidades: cuando el valor de arena americana sea menor o igual a 80,5 corresponde un valor de arena muy fina de 18,36 (nodo 1.1.1) y cuando el valor de arena americana sea mayor a 80,5 corresponde un valor de 22,06 (nodo 1.1.2).

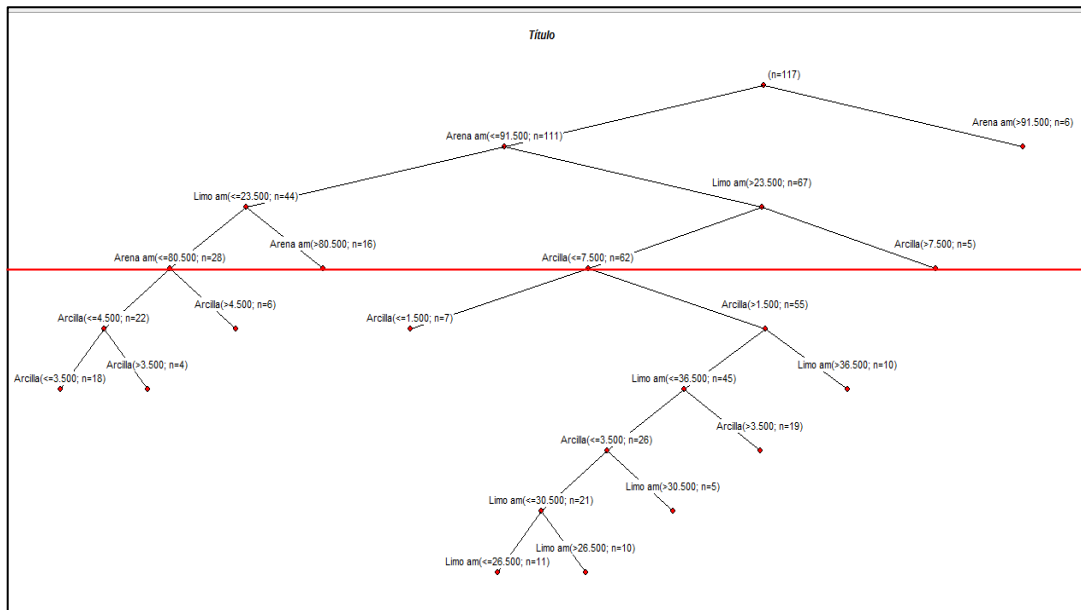


Figura 7: Árbol de regresión, donde la línea de color rojo indica el nivel 4.

**Árboles de clasificación-regresión**

H= Suma de cuadrados corregida

Nodo	Formación	H	Predicción	n	Media	Varianza	Mínimo	Máximo	
Raiz				21.40	117	21.40	40.66	4.00	40.00
1	Arena am(<=91.500)	3490.56	22.06	111	22.06	31.73	5.00	40.00	
1.1	Limo am(<=23.500)	1639.16	19.70	44	19.70	38.12	5.00	34.00	
1.1.1	Arena am(<=80.500)	880.43	18.36	28	18.36	32.61	6.00	30.00	
1.1.1.1	Arcilla(<=4.500)	719.45	17.45	22	17.45	34.26	6.00	30.00	
1.1.1.1.1	Arcilla(<=3.500)	472.00	18.67	18	18.67	27.76	9.00	30.00	
1.1.1.1.2	Arcilla(>3.500)	102.00	12.00	4	12.00	34.00	6.00	20.00	
1.1.1.2	Arcilla(>4.500)	77.33	21.67	6	21.67	15.47	15.00	26.00	
1.1.2	Arena am(>80.500)	618.94	22.06	16	22.06	41.26	5.00	34.00	
1.2	Limo am(>23.500)	1445.91	23.61	67	23.61	21.91	14.00	40.00	
1.2.1	Arcilla(<=7.500)	1309.18	23.31	62	23.31	21.46	14.00	40.00	
1.2.1.1	Arcilla(<=1.500)	323.71	26.43	7	26.43	53.95	18.00	40.00	
1.2.1.2	Arcilla(>1.500)	908.55	22.91	55	22.91	16.82	14.00	36.00	
1.2.1.2.1	Limo am(<=36.500)	707.24	23.29	45	23.29	16.07	15.00	36.00	
1.2.1.2.1.1	Arcilla(<=3.500)	254.46	22.54	26	22.54	10.18	16.00	30.00	
1.2.1.2.1.1.1	Limo am(<=30.500)	226.57	22.14	21	22.14	11.33	16.00	30.00	
1.2.1.2.1.1.1.1	Limo am(<=26.500)	142.91	22.91	11	22.91	14.29	18.00	30.00	
1.2.1.2.1.1.1.2	Limo am(>26.500)	70.10	21.30	10	21.30	7.79	16.00	24.00	
1.2.1.2.1.1.2	Limo am(>30.500)	10.80	24.20	5	24.20	2.70	22.00	26.00	
1.2.1.2.1.2	Arcilla(>3.500)	418.11	24.32	19	24.32	23.23	15.00	36.00	
1.2.1.2.2	Limo am(>36.500)	165.60	21.20	10	21.20	18.40	14.00	29.00	
1.2.2	Arcilla(>7.500)	59.20	27.40	5	27.40	14.80	21.00	31.00	
2	Arena am(>91.500)	278.83	9.17	6	9.17	55.77	4.00	24.00	

Figura 8: Resultados del análisis multivariado con árbol de regresión

Los resultados de la primera parte del análisis geoestadístico se muestran en la Figura 9 (variogramas) y en la Tabla 6 (valores de los parámetros correspondientes a los porcentajes de arcilla, limo, arena y arena fina). En la Figura 10 se observan los mapas de las variables mencionadas como resultado de la segunda parte de dicho análisis; a partir de los mismos se puede decir que al oeste de la cuenca de estudio predominan las texturas más gruesas (mayores porcentajes de arena) y en la zona este las texturas finas (mayores porcentajes de arcilla, limo y arena muy fina).

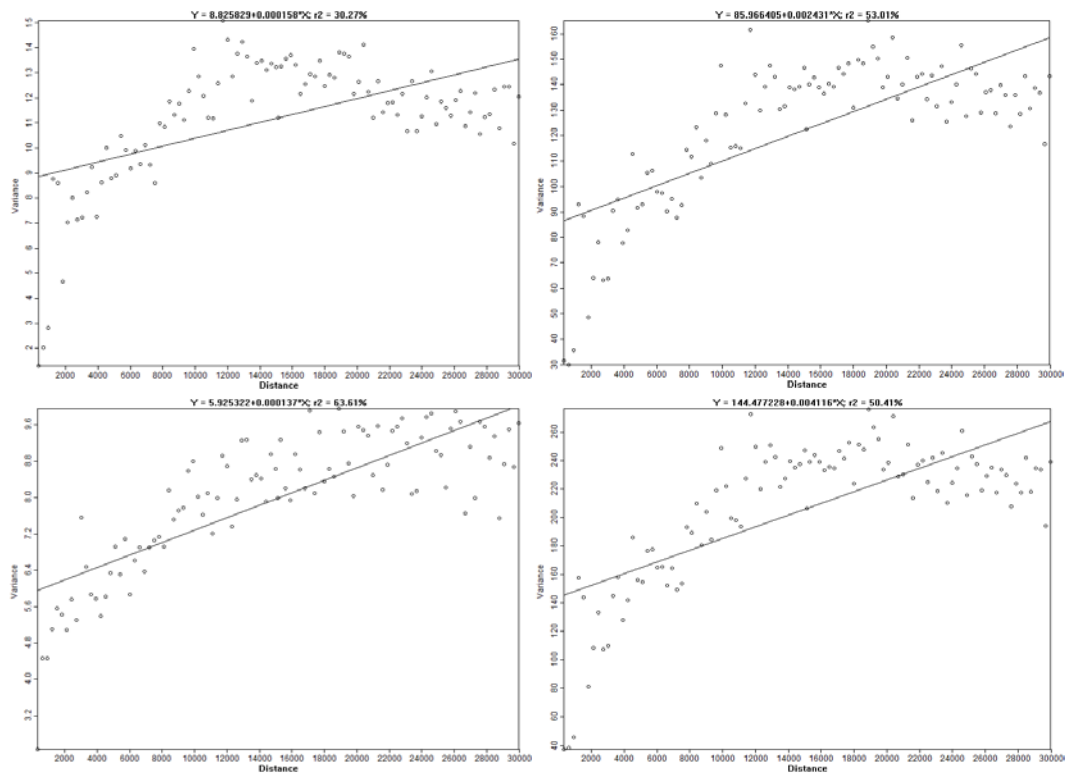


Figura 9: Variogramas correspondientes a las variables arcilla (superior izquierda), limo (superior derecha), arena muy fina (inferior izquierda) y arena (inferior derecha).

Tabla 6: Valores de los parámetros del modelo utilizado en el análisis estructural

Fracción	Pepita ( <i>nugget</i> )	Meseta ( <i>sill</i> )	Alcance ( <i>range - m</i> )
Arcilla	5,5	12	12.000
Limo	60	130	12.000
Arena muy fina	4,5	8,8	10.000
Arena	100	220	12.000

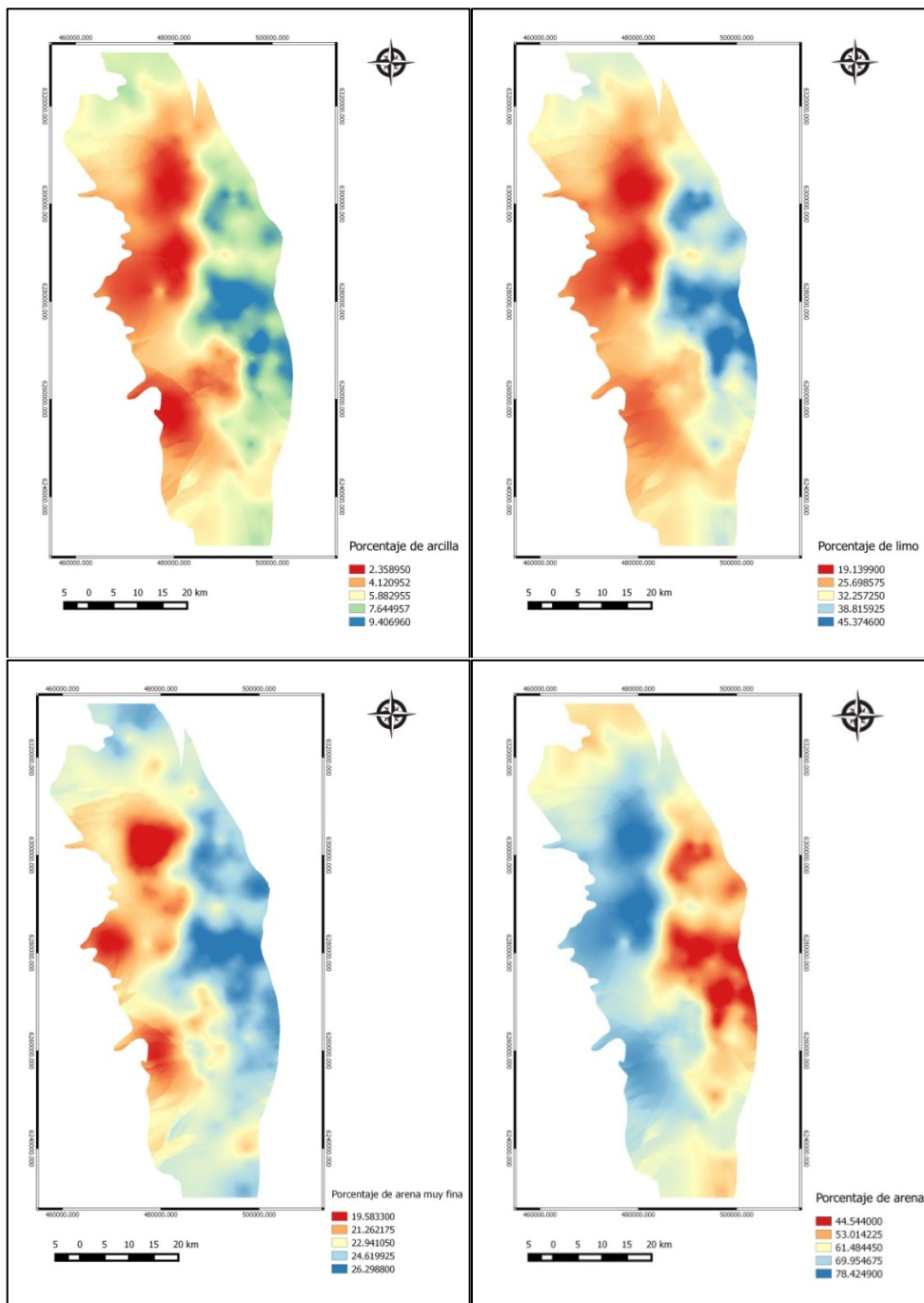


Figura 10: Porcentaje de arcilla, de limo, de arena muy fina y de arena en la cuenca de río Tunuyán Superior

A partir de los valores de arcilla, limo americano y arena muy fina se obtuvo el mapa del parámetro **M** (Figura 11), el cual varía entre 3,859 (color verde) y 6,473 (color rojo).

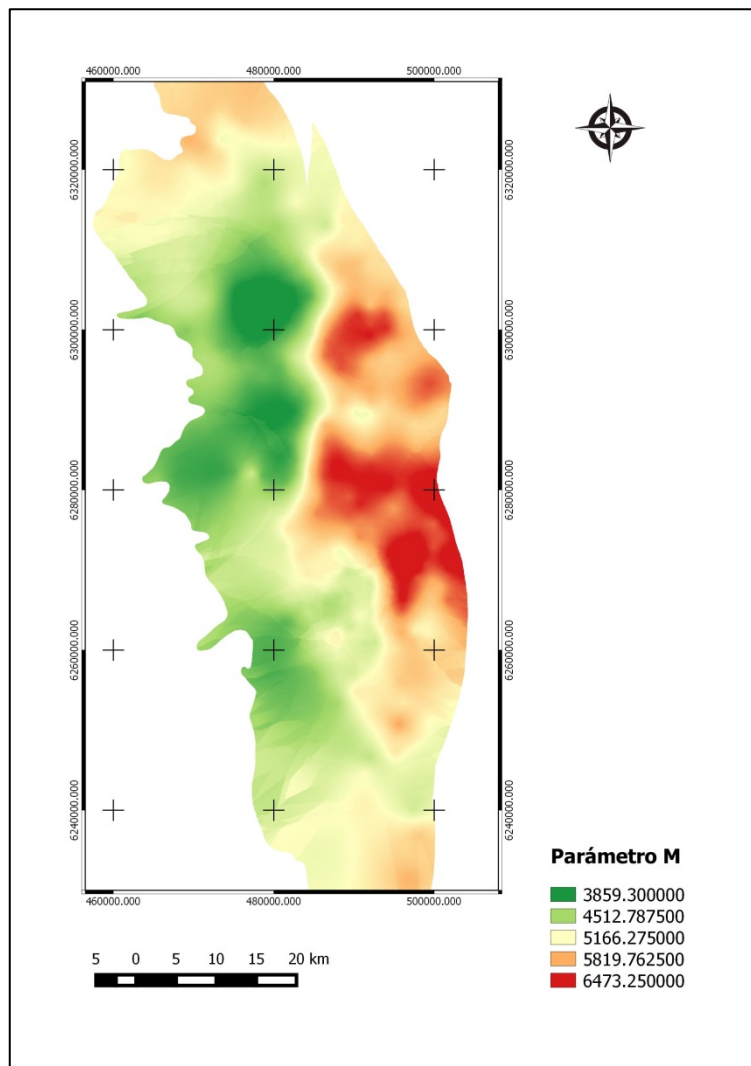


Figura 11: Parámetro M utilizado para obtener el factor K, en la cuenca del río Tunuyán Superior

La Figura 12 muestra el mapa del parámetro  $c$ , obtenido a partir de la reclasificación de la textura. Dicho parámetro puede tomar valores de 1 a 4 (Tabla 7).

Tabla 7: Valores del parámetro  $c$

Textura	Valor
Rápida	1
Moderadamente rápida	2
Moderadamente lenta	3
Lenta	4



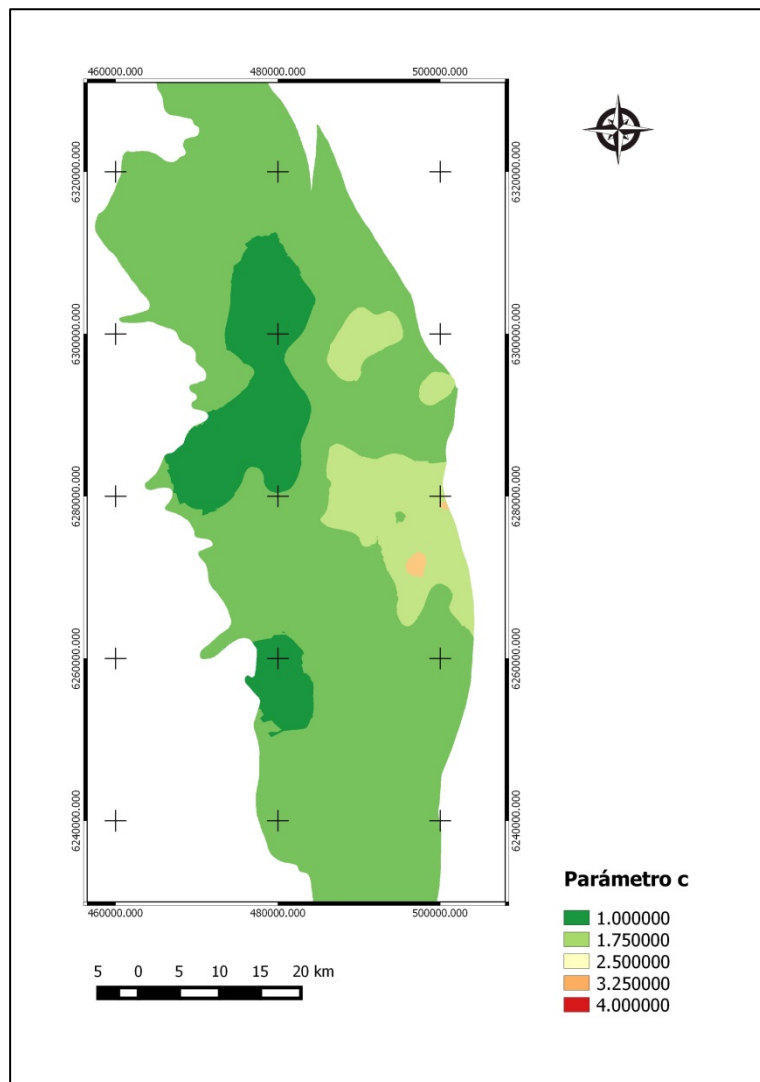


Figura 12: Parámetro c utilizado para obtener el factor K, en la cuenca del río Tunuyán Superior

Los valores del factor K para la cuenca del río Tunuyán Superior oscilan entre 0,04 y 0,07 Mg.ha.h/MJ.mm.ha aproximadamente (Figura 13). Como se puede observar, en la zona este de la cuenca (color rojo) los valores del factor K son los mayores, es decir que en ella el suelo presenta una menor resistencia a los procesos erosivos caracterizándose por ser de texturas finas; estos suelos son los más susceptibles a dichos procesos debido a la disminución de la tasa de infiltración. En la mayor parte del sector oeste de la cuenca se presentan los menores valores de dicho factor (color azul) que coinciden con altos porcentajes de arena; estos suelos ofrecen resistencia al desprendimiento y presentan una alta infiltración, por lo tanto un bajo escurrimiento.

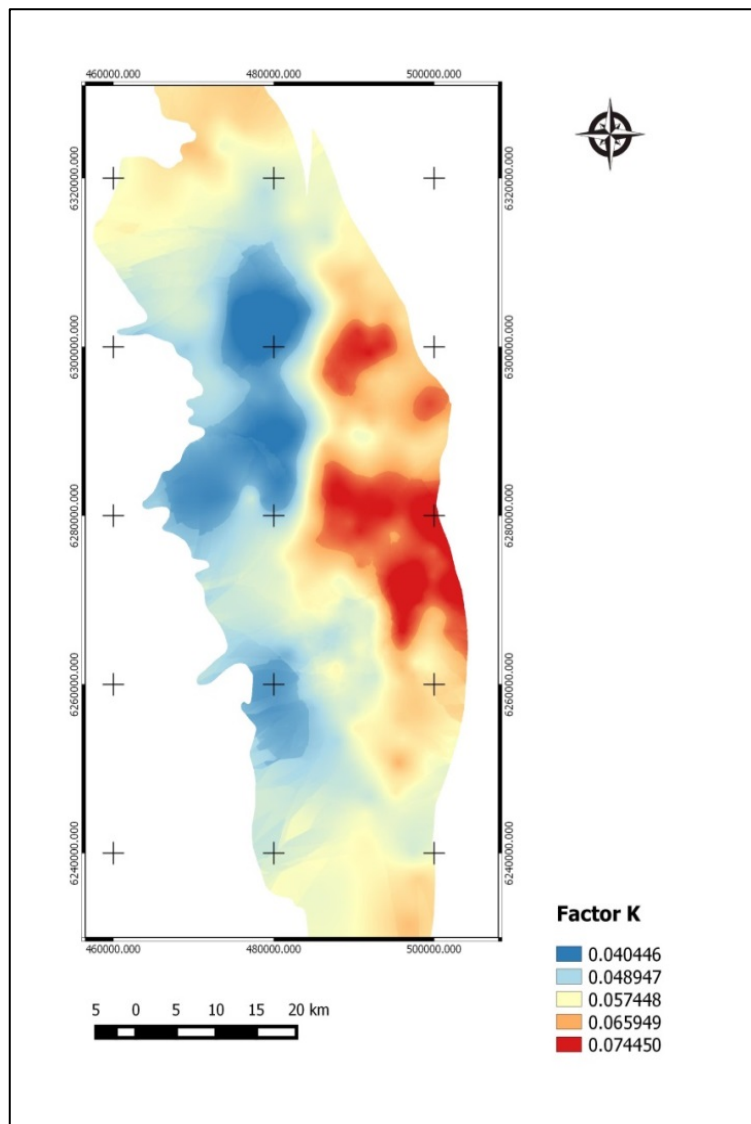


Figura 13: Factor K en la cuenca del río Tunuyán Superior

En nuestro país se han realizado varias experiencias para estimar el factor K. Algunos autores trataron de establecer, mediante el uso de lluvia artificial, estimadores de la susceptibilidad del suelo a la erosión. Para la Serie Marcos Juárez, utilizando un simulador rotativo en parcelas de campo, Marelli et al. (1984) obtuvieron un K promedio de 0,22; mientras que para la misma Serie, Da Veiga & Noailles Bosch (1993) estimaron a partir del nomograma de Wischmeier & Smith (1978), un K de 0,52. Irurtia & Mon (1993), trabajando con un micro simulador, en la Serie Pergamino encontraron valores de K de 0,68; mientras que los estimados con el nomograma oscilaron en 0,58 (Echeverría et al., 2006).

En el sur de la región semiárida argentina, específicamente en el suroeste bonaerense, Echeverría et al. (2006) obtuvieron un K de 0,06 en la localidad de Cabildo (piedemonte ondulado de la Sierra de la Ventana), un K de 0,05 en Bahía Blanca y de 0,04 en las pendientes que separan las planicies arenosas del SO de la provincia de Buenos Aires y SE de la provincia de La Pampa.

En la cuenca inferior del río Bermejo Salta-Jujuy, Yapur (2010) obtuvo valores del factor K que oscilan entre 0,1 y 0,5. En la cuenca del río Juramento ubicada en la provincia de Salta, Ramírez halló valores de K que oscilan entre 0,2 y 0,66.

En España, Dumas Salazar (2012) en la cuenca hidrográfica del río Mundo, Albacete calculó valores de K que van desde 0,04 a 0,08.

### **7.3. Factor topográfico (LS)**

Los valores del factor LS para la cuenca del río Tunuyán Superior oscilan entre 0 y 7. Como se puede observar en la Figura 14 la mayor parte de la cuenca presenta valores bajos de dicho factor (color azul) y en la zona oeste existen pequeñas zonas que presentan valores más elevados (color rojo), debido a que dichas zonas presentan una alta pendiente.

En Argentina, Yapur (2010) calculó un factor LS para la cuenca del río Bermejo (Salta-Jujuy) que varía de 0 a 88,13 y para la cuenca de río Juramento (Salta), Ramírez (2010) encontró que varía de 0 a 83,71. En España, Dumas Salazar (2012) en la cuenca del río Mundo (Albacete) halló valores entre 0,40 y 22,6. En comparación con el área de estudio, las cuencas mencionadas presentan mayores pendientes que determinan altos valores del factor LS.

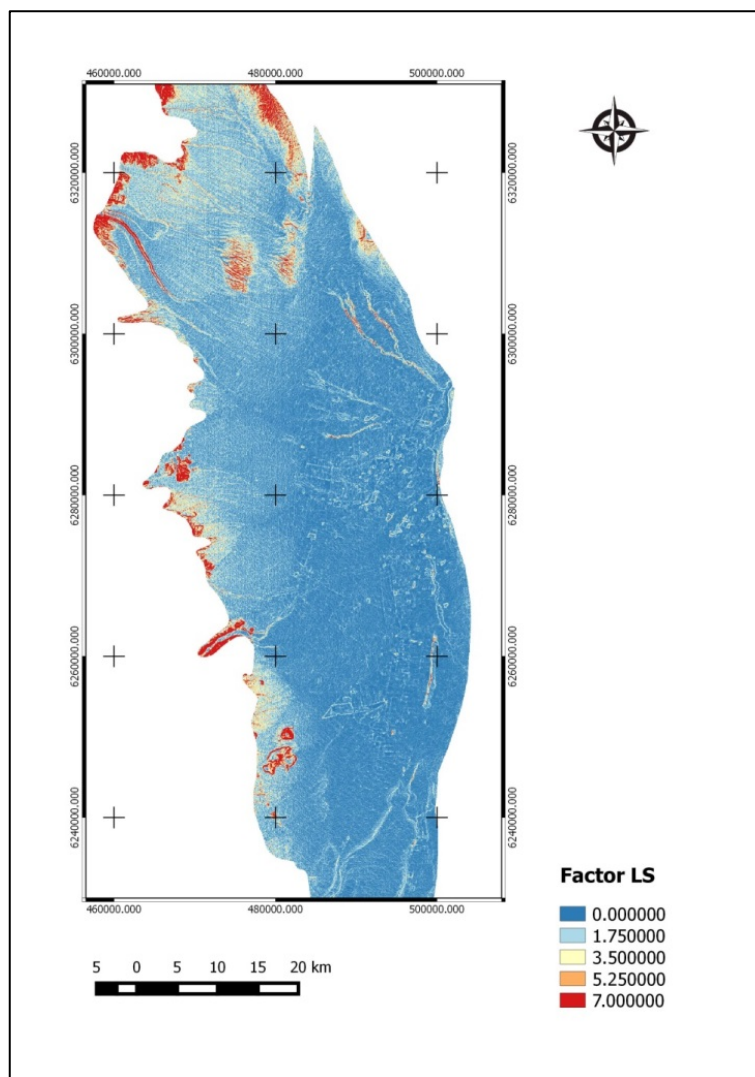


Figura 14: Factor LS en la cuenca del río Tunuyán Superior

#### 7.4. Factor de cobertura (C)

El factor C de cobertura, como se dijo anteriormente, se obtiene a partir del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Para la cuenca del río Tunuyán Superior el NDVI calculado se puede observar en la Figura 15; el mismo varía desde 0,06 a 0,44, observándose de color verde oscuro los mayores valores y de color rojo los menores.

Los valores que toma el factor C de cobertura en la cuenca de estudio se pueden observar en la Figura 16; donde el color verde indica zonas cultivadas de la cuenca cuyo valor de dicho factor se encuentra más alejado de 1, es decir que existe una mayor cobertura. El color rojo indica valores del factor C cercanos a 1, es decir aquellas áreas que presentan menor cobertura vegetal y que corresponden mayormente a vegetación nativa.

Ramírez (2010), en su estudio de la cuenca del río Juramento (Salta), obtuvo valores del factor C que varían entre 0,006 (región de las Yungas) y 0,8 (regiones del Monte, de la Puna y Altoandina). El mayor valor del factor C obtenido por Dumas Salazar (2012) en la cuenca del río Mundo

(Albacete, España) fue de 1, correspondiente a zonas industriales de la cuenca; y el menor valor fue de 0,041 calculado para área de bosque mixto con una cobertura mayor al 7%. En ambos trabajos se calcula el factor C a partir del NDVI.

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, se puede observar que el valor mínimo de C obtenido en la cuenca de estudio, es decir aquel que corresponde a la vegetación nativa, se encuentra relativamente cercano al valor obtenido en la cuenca del río Juramento para las regiones del Monte, de la Puna y Altoandina. En cuanto al menor valor obtenido por Ramírez, en la cuenca del Valle de Uco no existe cobertura tal por lo que se explica la gran diferencia con el valor mínimo obtenido por el autor en la provincia de Salta. Con respecto a los valores de la cuenca del río Mundo se puede decir que el área de bosque mixto presente en la misma, correspondiente al menor valor del factor C, es una cobertura similar a la de cultivo en la cuenca del presente trabajo debido a la proximidad relativa de los datos.

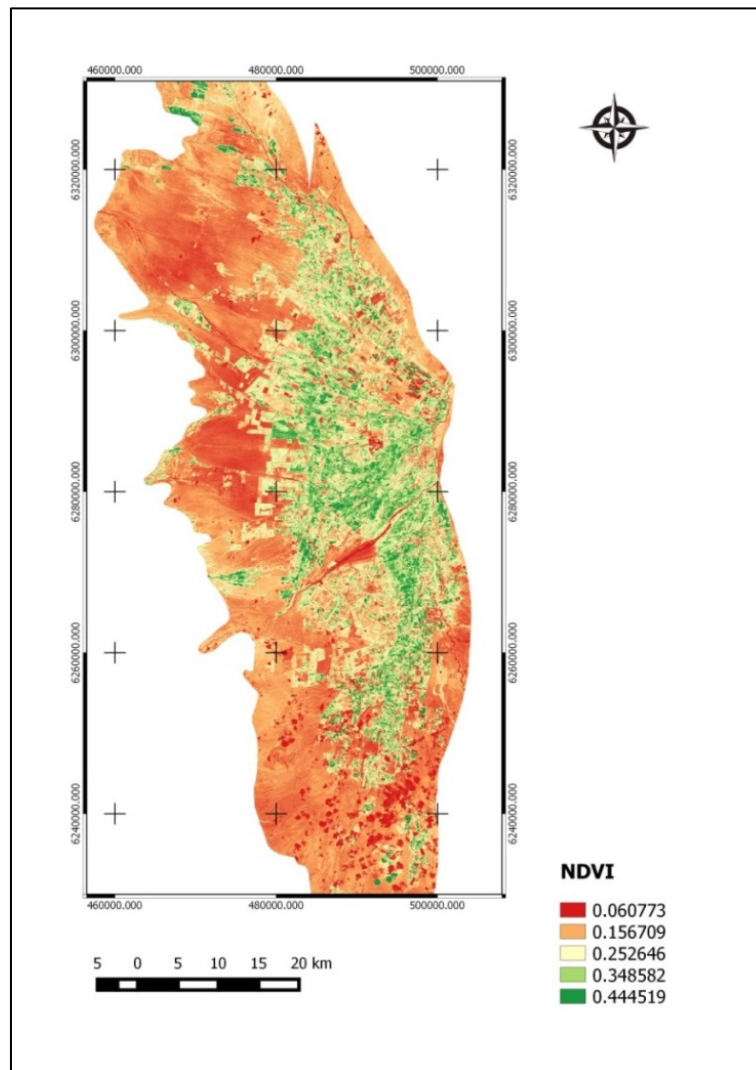


Figura 15: NDVI en la cuenca del río Tunuyán Superior

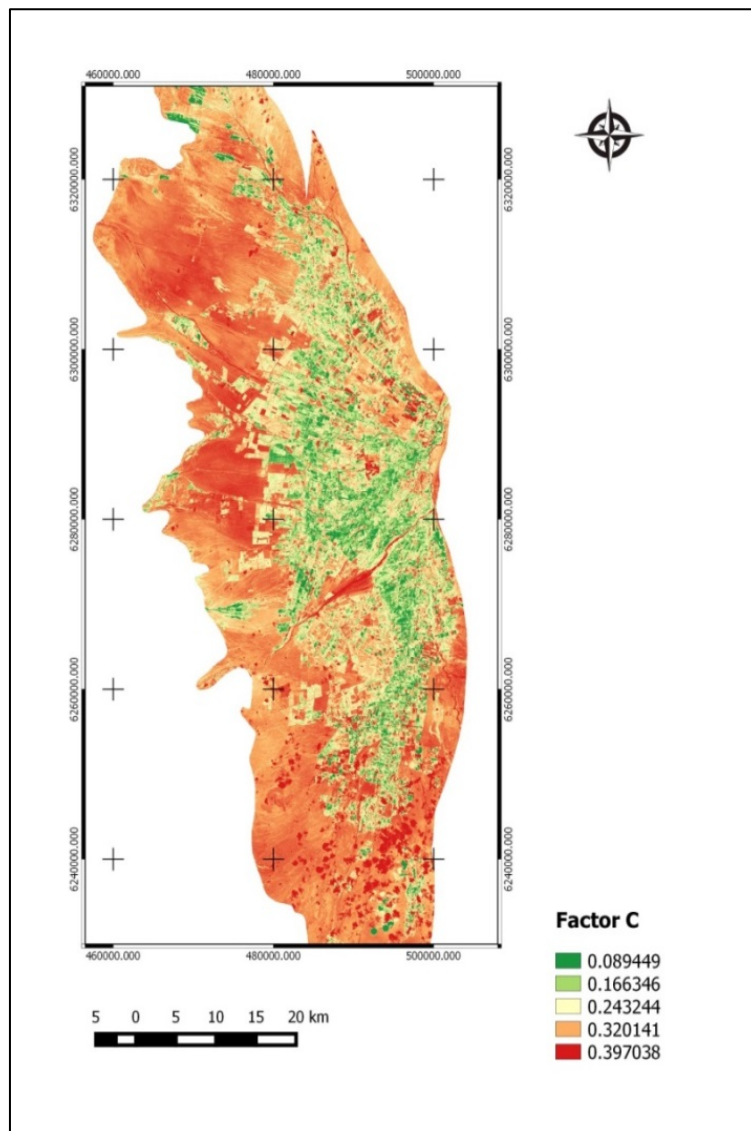


Figura 16: Factor C en la cuenca de río Tunuyán Superior

### 7.5. Pérdida de suelo real

En la Figura 17 se observa la pérdida de suelo real por unidad de superficie medida en Mg/ha.año, calculada para la cuenca del río Tunuyán Superior. El color verde oscuro indica la menor pérdida de suelo (0 Mg/ha.año) y el color rojo indica la mayor pérdida de suelo (110 Mg/ha.año).

Las zonas de la cuenca donde se registran las mayores pérdidas de suelo corresponden a aquellas que presentan valores elevados del factor LS, es decir, dichas pérdidas se deben principalmente a la pendiente del terreno. Secundariamente, estas pérdidas por erosión coinciden con valores altos (no los máximos) del factor C, sobre todo en el sur oeste de la cuenca (Figura 17-color negro).

En relación con los demás factores de la RUSLE, se puede decir lo siguiente:

- Al norte de la zona de estudio, existen pequeñas áreas que presentan altos valores de pérdida de suelo, correspondientes a las lomadas de El Jaboncillo y El Peral en dichas áreas el valor del factor R es medio-alto por lo que se puede decir que la pérdida de suelo allí se debe a la pendiente y al efecto erosivo de las lluvias (Figura 17-color violeta).
- En El Zampal – Zampalito, ubicado el centro este de la cuenca, se observan elevados valores de pérdida de suelo en los cauces de los arroyos, que se deben a la textura limosa, es decir, a la erodabilidad de suelo en ese sitio (Figura 17-color celeste).

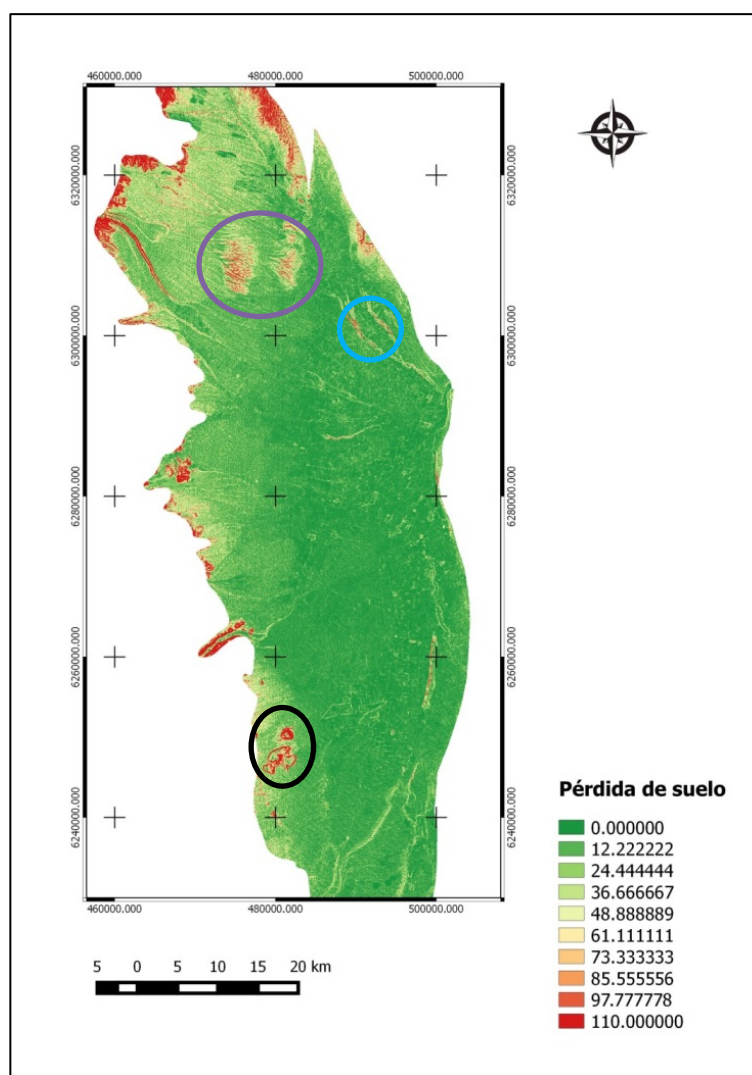


Figura 17: Pérdida de suelo real en la cuenca del río Tunuyán Superior

En la Tabla 8 se presenta un análisis estadístico descriptivo para la pérdida de suelo real; y en la Figura 18, el histograma correspondiente al mapa de dicha pérdida. En el mismo se observa que la mayor parte de los valores se encuentran entre 0 y 50 Mg/ha.año.

Tabla 8: Análisis estadístico descriptivo de la pérdida de suelo real

Pérdida de suelo (Mg/ha.año)	
Valor mínimo	0
Valor máximo	535
Media	18,37
Desviación estándar	30,79

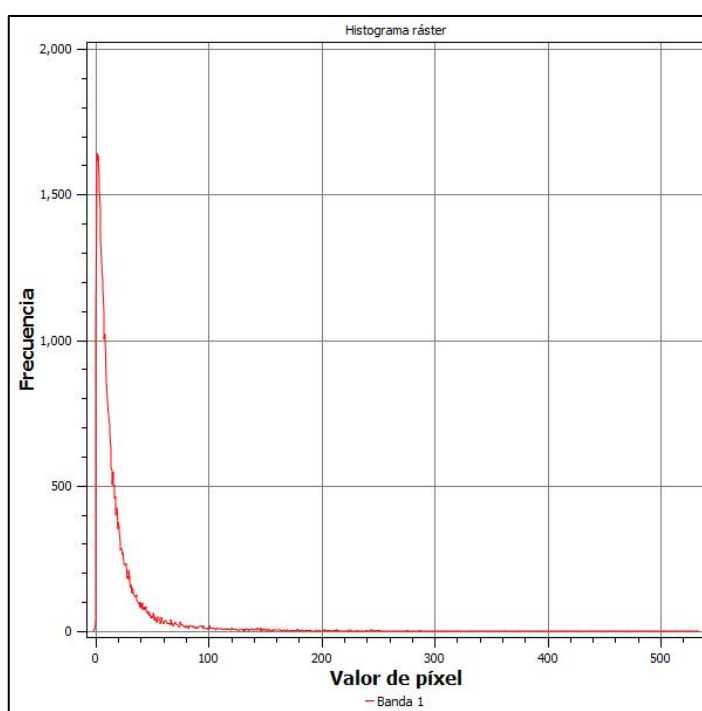


Figura 18: Histograma correspondiente a la pérdida de suelo real en la cuenca del río Tunuyán Superior

En Mendoza existe un único trabajo acerca de la pérdida de suelo por erosión hídrica; es el realizado por Vich et al. (2010) en la Cuenca Aluvional Piloto del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), ubicada al oeste de la ciudad de Mendoza. En los períodos 1986-87 y 1993-96 existen 206 registros para seis parcelas experimentales, en las cuales el 34% corresponde a una pérdida de suelo menor a 1.000 kg/ha, el 27% a una pérdida comprendida entre 1.000 y 2.000 kg/ha, y el 39% a una pérdida mayor a 2.000 kg/ha.

Como se mencionó anteriormente, para validar los datos obtenidos con el modelo se calcularon los siguientes índices morfométricos: Índice de potencia de flujo superficial e Índice de humedad topográfica.



Los valores del Índice de humedad topográfica varían entre 5 y 17 (Figura 19). Los menores valores (color rojo) indican pendientes fuertes o escasa superficie de captación de agua, por lo que en dichas áreas de la cuenca el agua circulará rápido produciendo una mayor erosión del suelo.

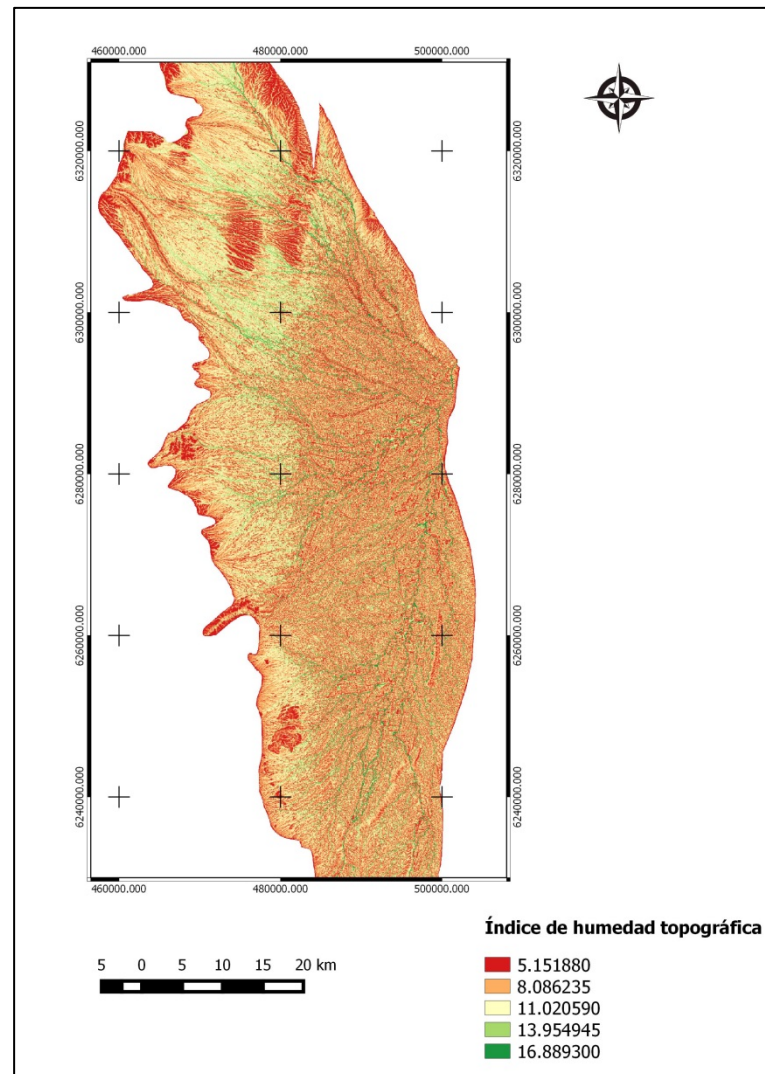


Figura 19: Índice de humedad topográfica en la cuenca del río Tunuyán Superior

En la Figura 20 se muestra el mapa correspondiente al Índice de potencia de flujo superficial. Los mayores valores (color rojo) indican aquellas áreas de la cuenca de estudio donde la concentración del flujo superficial y la pendiente son tales que permiten el desarrollo de cárcavas.

Realizando una comparación de los mapas de dichos índices y de la pérdida real de suelo, se observa que las zonas de la cuenca donde existen grandes pérdidas de suelo coinciden con aquellas que presentan bajos valores del Índice de humedad topográfica y altos valores del Índice de potencia de flujo superficial, por lo que se puede concluir que allí existen signos de erosión en el terreno.

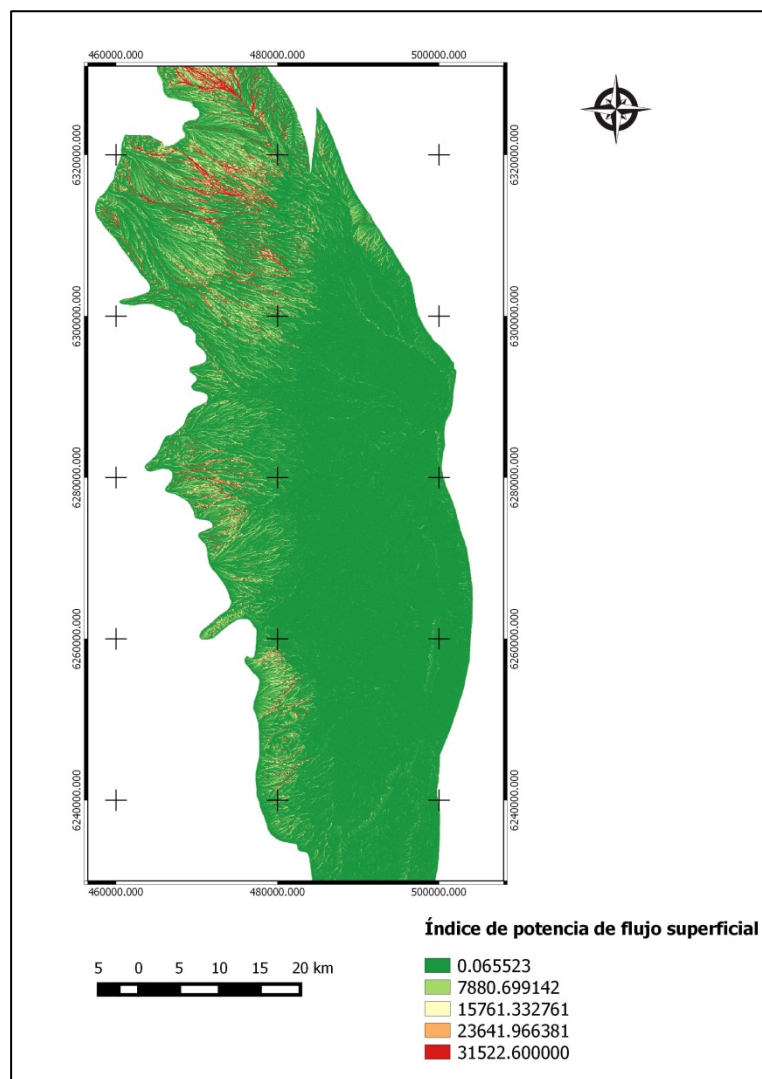


Figura 20: índice de potencia de flujo superficial en la cuenca de río Tunuyán Superior

Con el fin de dimensionar la magnitud de los valores de pérdidas de suelo observadas en el presente trabajo, se buscaron diversos sistemas de clasificación de la erosión, el más empleado actualmente es el propuesto por FAO- PNUMA-UNESCO y contempla cuatro niveles de erosión (Tabla 9).

**Tabla 9: Clases de erosión según FAO (Fuente: FAO, 1980)**

CLASE DE EROSIÓN	PÉRDIDA DE SUELO (Mg/ha.año)	DESCRIPCIÓN
Nula a ligera	Menor a 10	Agrupación de suelos que han perdido parte del horizonte "A" original, pero en porcentajes inferiores al 25%.
Moderada	10–50	Suelos que han perdido entre 25 y 75% de la profundidad del horizonte "A" original. En su mayor parte, el estrato superficial consiste en una mezcla de horizonte "A" y del estrato subyacente.
Alta	50 – 200	Suelos que han perdido más del 75% del horizonte "A" original. En su mayor parte, la capa arable consiste enteramente o en gran medida, del material que subyace al horizonte "A".
Muy alta	Mayor a 200	Estos suelos han perdido todo el horizonte "A", más parte o todo el horizonte inmediatamente inferior. La mayor parte de estas áreas pueden presentar un intrincado sistema de cárcavas.

Para la cuenca de estudio se generó un mapa teniendo en cuenta dicha clasificación (Figura 21) en el que se pueden observar de color rojo las zonas que presentan una pérdida de suelo mayor a 200 Mg/ha.año (clase muy alta de erosión), las mismas corresponden a un 4,6% de la cuenca de estudio y de color naranja aquellas que presentan una erosión alta (28,2%). La mayor parte de la cuenca (55,5%) presenta erosión moderada (Tabla 10).

**Tabla 10: Porcentajes correspondientes a cada una de las clases de erosión, en la cuenca de río Tunuyán Superior**

Clase	Píxeles	Porcentaje
1	361.873	<b>11,7</b>
2	1.708.230	<b>55,5</b>
3	867.415	<b>28,2</b>
4	142.932	<b>4,6</b>
<b>Total</b>	<b>3.080.450</b>	<b>100,0</b>

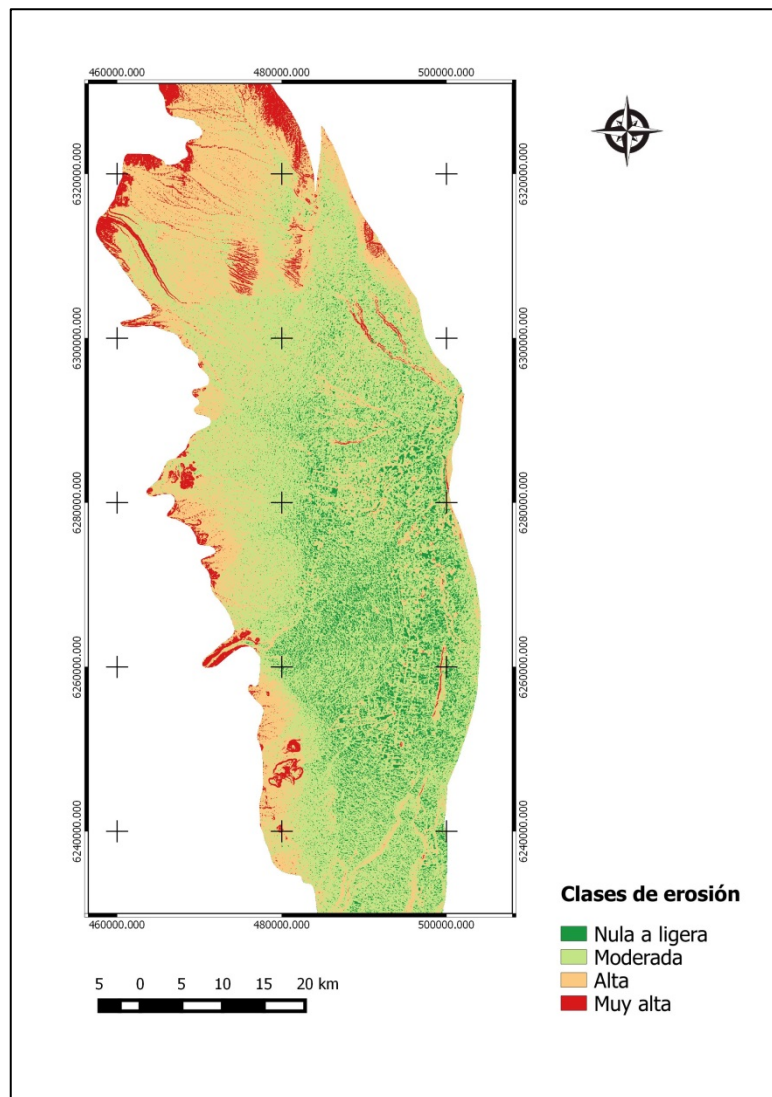


Figura 21: Clases de erosión en la cuenca del río Tunuyán Superior

En la cuenca del río Juramento, Ramírez (2010) obtuvo que el 20% de la cuenca presentó erosión nula a ligera (728.725 ha), principalmente en las zonas donde la pendiente es inferior al 5%; el 27% (992.125 ha) presentó erosión moderada, el 29% (1052.950 ha) erosión alta y el 24% restante (896.200 ha) presentó erosión muy alta. En la cuenca del río Bermejo, la erosión nula a ligera encontrada fue del 88%, la moderada y alta del 5% y la erosión muy alta del 3% (Yapur, 2010). Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados se puede decir que la cuenca del río Tunuyán Superior se encuentra menos erosionada que la del río Juramento pero presenta mayores pérdidas de suelo que la del río Bermejo.

Orúe et al. (2007) realizaron un mapa de riesgo de erosión de las principales cuencas sujetas a expansión agrícola en Argentina, el cual mostró que el 17% y el 32% de las cuencas analizadas presentan un riesgo alto-muy alto y moderado, respectivamente. Las zonas de riesgo alto a muy alto se extienden en el NOA, desde Quebrada de Humahuaca (N de Jujuy) y Tartagal (N de Salta) hasta la zona de Tafí del Valle (Tucumán), en el NEA corresponden a la provincia de Misiones,

mientras que en la Región Pampeana a sectores de las Sierras de Córdoba y las Sierras de Ventana y Tandilia. Con el presente trabajo se amplía la información obtenida por estos autores para otra cuenca de la República Argentina que también se encuentra bajo gran presión agrícola y que con los resultados obtenidos se muestra que existe una gran parte de la misma con riesgo de erosión.

#### 7.6. Pérdida de suelo máxima

En la Figura 22 se muestra un mapa de los valores de la pérdida máxima de suelo, es decir la pérdida de suelo considerando el factor C igual a 1, en la cuenca de estudio. En dicho mapa la mayor pérdida de suelo corresponde a 350 Mg/ha.año (color rojo) y la menor pérdida a 0 Mg/ha.año (color verde oscuro). En la Tabla 11 se presenta, al igual que en el apartado anterior, el análisis estadístico descriptivo de la pérdida de suelo máxima.

Tabla 11: Análisis estadístico descriptivo de la pérdida de suelo máxima

Pérdida máxima de suelo (Mg/ha.año)	
Valor mínimo	0
Valor máximo	1573,27
Media	59,30
Desviación estándar	94,71

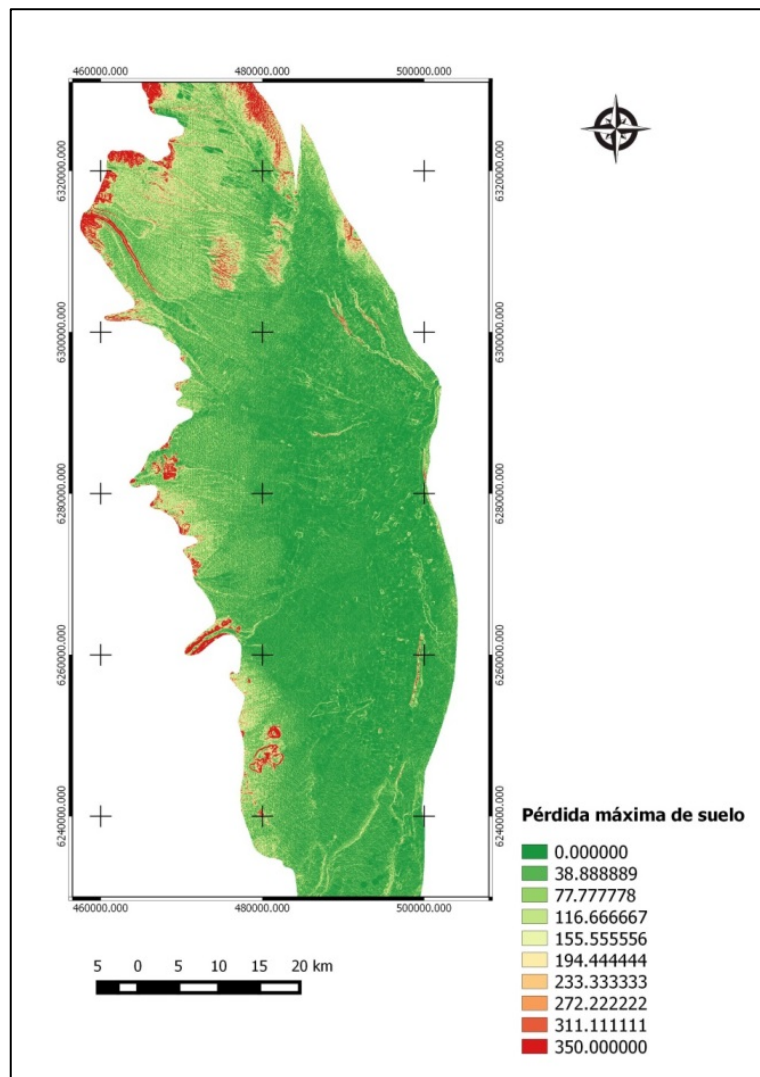


Figura 22: Pérdida de suelo máxima por unidad de superficie en la cuenca del río Tunuyán Superior

A diferencia del histograma anterior, en la Figura 23, que muestra el histograma de la pérdida máxima de suelo en la cuenca, se observa que la mayoría de los valores se encuentran entre 0 y 200 Mg/ha.año.

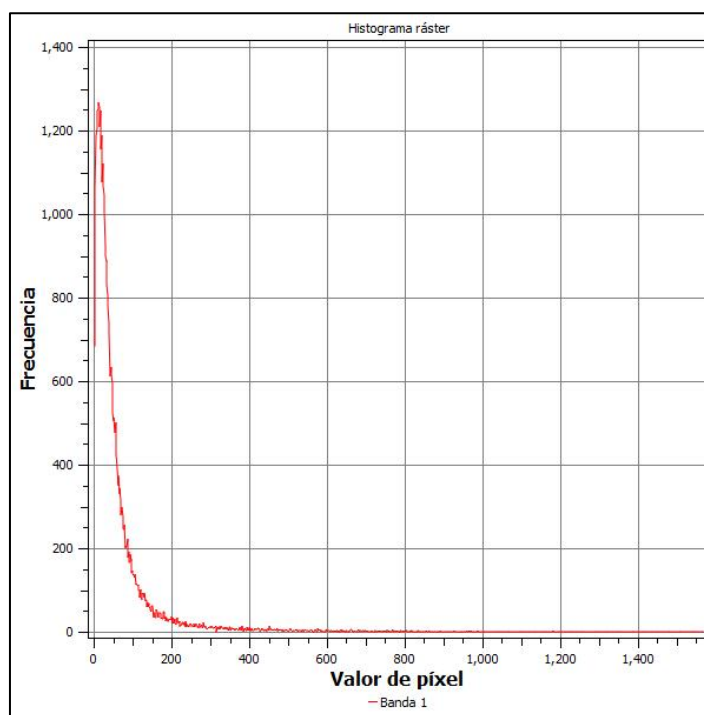


Figura 23: Histograma correspondiente a la pérdida de suelo máxima en la cuenca del río Tunuyán Superior

Comparando los valores obtenidos de ambos mapas (A real y A máxima), se hace notoria la importancia de la cobertura vegetal en los procesos erosivos. Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, la presencia de cobertura vegetal reduce la erosión del suelo ya que protege al mismo del impacto de las gotas de lluvia, incrementa su grado de infiltración, reduce la velocidad de escorrentía y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

### 7.7. Control de la erosión

La Figura 24 muestra el mapa que representa el control de la erosión como función ecosistémica, es decir la diferencia entre la pérdida de suelo máxima y la pérdida de suelo real. Se puede observar que el valor máximo es de 229,23 (color rojo) y el valor mínimo es 0,98 (verde).

Los mayores valores del control de la erosión, es decir aquellos donde la diferencia entre pérdida máxima y la pérdida real es alta, corresponden a sitios de la cuenca de estudio donde el factor C ejerce un papel fundamental en el proceso erosivo; y es allí donde deben llevarse a cabo diferentes pautas manejo para prevenir y/o mitigar la erosión hídrica.

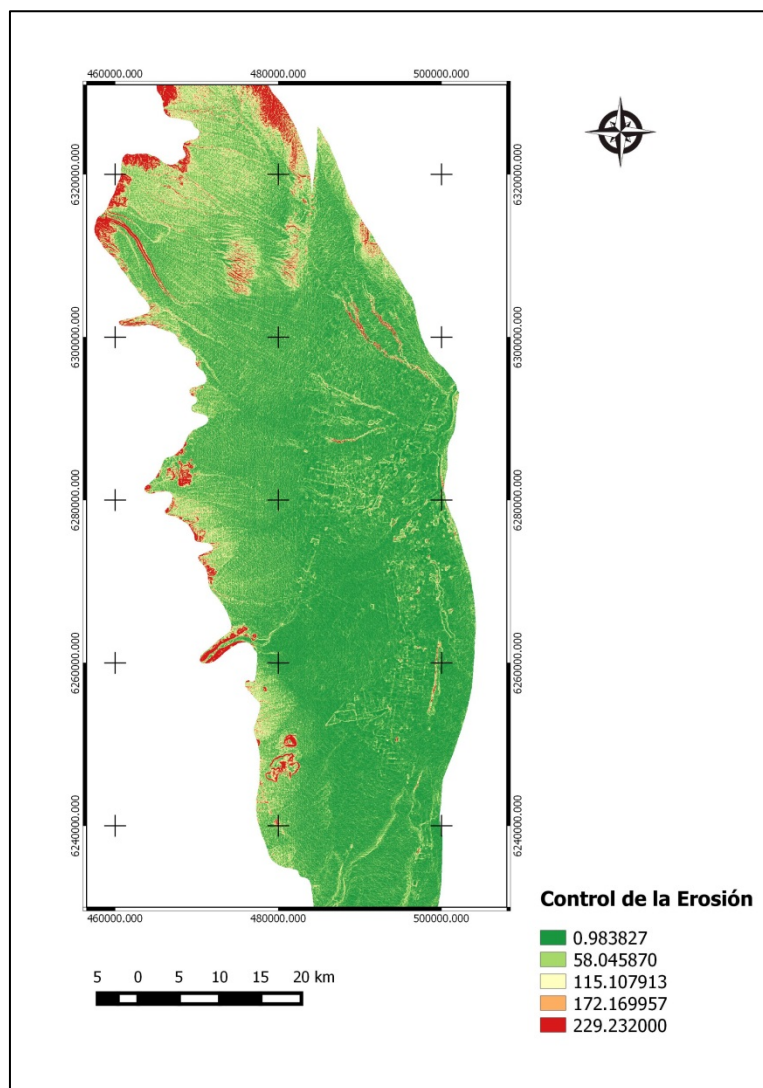


Figura 24: Control de la erosión en la cuenca del río Tunuyán Superior

Se ha comprobado que el establecimiento de coberturas vegetales es una excelente alternativa de manejo para prevenir los procesos erosivos (Sancho & Cervantes, 1997, en Alvarado, 2014).

En los ambientes áridos y semiáridos la probabilidad de recuperación en forma natural se ve fuertemente limitada, y con ello la recuperación de las interacciones y procesos ecológicos con el entorno, por lo que se hace necesaria la intervención del hombre con técnicas que inicien y aceleren estos procesos (Beider, 2012). Se debe tender a lograr la recuperación con especies nativas que, una vez instaladas, no requieran el aporte extra de energía (Dalmaso et al., 2002). La revegetación se propone revertir las condiciones de las áreas degradadas con la plantación de especies vegetales nativas, que lleven a restituir la estructura y la cobertura vegetal (Dalmaso, 2010).

Para poder llevar a cabo la revegetación es necesario que la vegetación utilizada sea rústica, adecuada al medio y adaptada a las limitaciones físico-químicas existentes, para ello es



fundamental conocer la composición florística y su dinámica en el área de estudio (Ortiz et al, 1996, en Beider, 2012).

La recuperación de la cobertura vegetal con especies leñosas perennes facilita la instalación de otras especies provenientes de las comunidades de contacto, ya que generan un efecto nodriza sobre las nuevas plántulas que intentan establecerse. Las plantas adultas actúan como trampa de restos orgánicos y semillas transportadas por el viento que se acumulan debajo de ellas, proveyendo un sustrato adecuado para la germinación. Además, las plántulas encuentran protección a la herbivoría aumentando su probabilidad de establecimiento y desarrollo (Gutiérrez y Squeo, 2004, en Beider, 2012).

En función de lo dicho anteriormente, en el área del estudio se puede llevar a cabo un plan de revegetación teniendo en cuenta la dinámica del ecosistema y utilizando especies nativas del lugar. Dentro de las especies leñosas se podrían utilizar *Prosopis flexuosa* “algarrobo dulce” y/o *Geoffrea dicorticans* “chañar”, que junto a las especies de jarilla *L. divaricata* y *L. cuneifolia* funcionarían como nodrizas permitiendo el establecimiento del estrato herbáceo.

En la Figura 25 se muestra el Control de la Erosión relativo a la pérdida de suelo máxima (en porcentaje) obtenido a partir del siguiente cálculo:

$$\frac{A \text{ máxima} - A \text{ real}}{A \text{ máxima}} \times 100$$

Los resultados en la cuenca de estudio oscilan entre 91,9% (color rojo) y 60,5% (color verde oscuro). Los mayores porcentajes se presentan en la zona centro y este de la cuenca, es decir, en la zona bajo cultivo. Dichos valores corresponden a valores pequeños de erosión real o actual por lo que hay que tener en cuenta que en caso de desmonte o pérdida total de la vegetación en esas zonas, se producirían enormes pérdidas de suelo que provocarían un gran desastre ambiental.

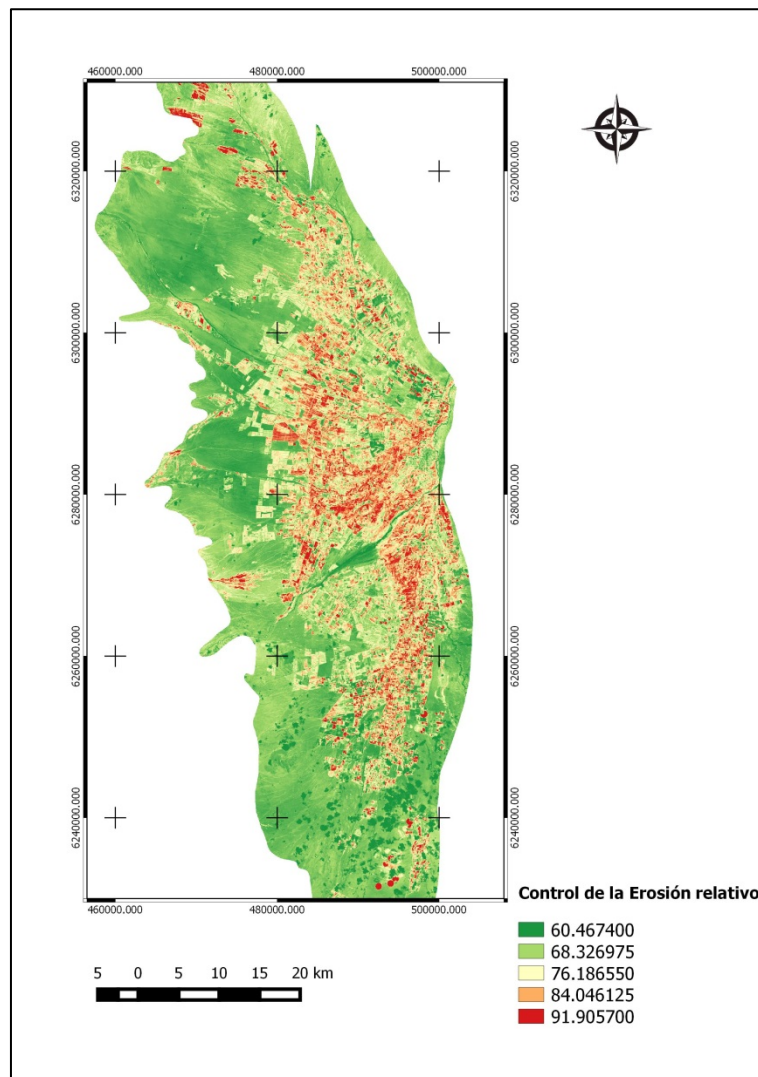


Figura 25: Control de la Erosión relativo (en porcentaje) en la cuenca del río Tunuyán superior

## 8. CONCLUSIONES

En la actualidad la cuenca del río Tunuyán Superior se encuentra bajo una gran presión antrópica, ya que se están llevando a cabo numerosos emprendimientos vitivinícolas, en su mayoría extranjeros; los cuales producen modificaciones en las propiedades del suelo, en la biodiversidad, en la dinámica natural del agua y en la economía regional.

La realización del presente trabajo permite obtener una visión a gran escala del problema de erosión hídrica en la cuenca del río Tunuyán Superior, siendo capaz de orientar la toma de decisiones políticas para la conservación y el manejo sustentable del recurso suelo, en el marco de los servicios ecosistémicos. Además permite la detección de áreas críticas que deben ser estudiadas en mayor profundidad para implementar medidas de mitigación específicas a menor escala.

En cuanto a la variabilidad espacial del riesgo de erosión hídrica en la cuenca del río Tunuyán Superior, el mayor riesgo se presenta al oeste de la misma y se debe principalmente al factor

topográfico, es decir, al grado y a la longitud de la pendiente. Además existen otras zonas de la cuenca que presentan grandes pérdidas de suelo, y éstas se deben tanto a la pendiente como a la susceptibilidad del suelo a la erosión (La Zampal-Zampalito) y a la erosividad de las tormentas (lomas de El Jaboncillo y El Peral).

Teniendo en cuenta la clasificación de la FAO, se puede decir que un 4,6% de la cuenca de estudio se encuentra en la clase muy alta de erosión y un 28,2% en la clase alta. La mayor parte de la misma (55,5%) presenta erosión moderada.

Los resultados de la función ecosistémica control de la erosión muestran que la cobertura vegetal juega un rol fundamental en el proceso erosivo, ya que actúa protegiendo los suelos del mismo; por lo que se acepta la hipótesis planteada: la cobertura vegetal afecta de forma diferenciada al proceso erosivo según la distribución espacial de los factores intervinientes. Es por ello que resulta imprescindible preservar la vegetación nativa presente en la cuenca de estudio para evitar la pérdida de suelo ocasionada por el agua de las lluvias.

Para prevenir y/o mitigar la erosión hídrica del suelo a nivel de cuenca una propuesta de manejo es la revegetación con plantas nativas, para lo cual es necesario conocer la dinámica florística del sitio de estudio y las limitantes biofísicas del mismo; esto permite la recuperación y/o mejora de la cobertura vegetal. El plan de restauración puede incluir también obras estructurales tales como corrección de cárcavas, consolidación de laderas, construcción de terrazas, entre otras.

En cuanto al manejo a escala de finca, se debe hacer un uso racional del área de cultivo teniendo en cuenta ciertas recomendaciones, tales como: estabilizar taludes con piedras y/o vegetación, establecer franjas o islas de vegetación nativa perpendiculares a la pendiente, cultivar especies herbáceas en los interfilares y respetar los cauces naturales de drenaje superficial, entre otras.

Finalmente es importante mencionar la necesidad de integrar los servicios ecosistémicos en las políticas de desarrollo, ya que la evaluación de los mismos constituye una herramienta para el ordenamiento territorial que permite la planificación de los distintos usos de suelo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- ALATORRE, L. & BEGUERÍA, S. 2003. Los modelos de erosión: una revisión. *Rev. C. & G* 23 (1-2):29-48. España.
- ALCAYAGA, H. et al. 2006. Uso de Datos de Precipitación Diaria, Mensual y Anual para la Estimación de la Erosividad de la Lluvia, Factor R del Modelo (R) USLE. En: V Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola y VII Congreso Latinoamericano y del Caribe, ASAE, IICA, ICAE y Gobierno de Chile.
- ALVARADO, V. 2014. Plantas nativas para el control de la erosión en taludes de ríos urbanos. *Spanish Journal of Soil Science*. Vol. 4, pp. 99-111. Costa Rica.
- BARRAL, M.P. 2015. Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos. Módulo 1 – Versión 2.0. EEA INTA Balcarce – Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de La Plata.
- BEIDER, A. 2012. Viverización de Especies Nativas de Zonas Áridas. *Experimentia: Revista de Transferencia Científica*, N°2. IADIZA (Instituto Argentino de Investigaciones en las Zonas Áridas). Mendoza, Argentina.
- BOYD, J. & BANZHAF, S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63:616-626.
- CARA, L. 2012. Estudio Geomorfológico del sector central del Departamento de Tupungato, aplicando técnicas geomáticas. Provincia de Mendoza, Argentina. Trabajo Final para optar al título de Licenciado en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional de San Juan. 99p.
- CENTRO REGIONAL ANDINO-INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (CRA-INA). 2009. Documento del Centro Regional Andino del Instituto Nacional del Agua sobre: El agua en Mendoza y su problemática ambiental. Ministerio de medio ambiente e la provincia de Mendoza.
- CISNEROS, J. M. et al. 2012. Erosión hídrica, principios y técnicas de manejo. Ed. UniRío. Córdoba, Argentina. 290 p.
- COSTANZA, R. et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
- DALE, V. & POLASKY S. 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*. N° 64, pp. 286–296.

- DALMASSO, A. et al. 2002. Revegetación de áreas degradadas. Boletín de Extensión Científica, IADIZA (Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas). Argentina
- DALMASSO, A. 2010. Revegetación de áreas degradadas con especies nativas. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, N° 45 (1-2), pp. 149-171.
- DA VEIGA, A. & NOAILLES BOSH, E. 1993. Susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica en la subregión Pampa Ondulada (Factor K). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. pp. 297-298. Mendoza.
- DE ASIS A. & OMASA K. 2007. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 62:309–324.
- DE VENETE, J. et al. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?. Earth Science Reviews. Vol. 127, pp. 16-29.
- DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN (DCSyLCD). 2002. Manual sobre Desertificación. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. 58 pp.
- DUMAS SALAZAR, A. 2012. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo. Trabajo de fin de Máster. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. España.
- ECHEVERRÍA, N. et al. 2006. Erodabilidad de suelos del sur de la Región Semiárida Argentina. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur. Ciencia del Suelo 24.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1980. metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO-PNUMA-UNESCO. 86 p.
- FISHER, B. et al. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics 68: 643–653.
- FUNDACIÓN PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (FECIC). 1988. El deterioro del ambiente en la Argentina para Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua. Buenos Aires, Argentina.
- FURLANI DE CIVIT et al. 2001. Aclaraciones sobre áreas de influencia frente a efímeros territorios organizacionales. Ed. Ex Libris, Facultad de Filosofía y Letras, pp. 19-37. Mendoza, Argentina.

- FURLANI DE CIVIT et al. 2004. Visión sobre cambios territoriales y sociales en Mendoza. Revista Theomai, N°9. Universidad Nacional de Quilmes. ISSN: 1515-6443. Disponible en: theomai@unq.edu.ar
- GARCÍA, C. M. et al. 2011. Evaluación del potencial Erosivo de lluvia en la región limítrofe entre las Provincias de Córdoba y Santa Fe, Argentina. En: III Taller sobre Regionalización de precipitaciones máximas Rosario- Argentina. UCC –EHCPA.
- GARCÍA-FAYOS, P. 2004. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Ecología del mundo mediterránea en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid. Capítulo 11, pp. 309-334.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. 1991. La Ecuación universal de Pérdidas de suelo: Pasado, Presente y Futuro. CONA, MADRID, Ecología 5(1), pp 13-50.
- HAINES-YOUNG, R. & Potschin, M. 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being, in Raffaelli, D. G. and Frid, C. L. J. (eds) Ecosystem Ecology: A New Synthesis (Cambridge: Cambridge University Press/British Ecological Society), pp. 110-139. Disponible: [http://www.nottingham.ac.uk/CEM/pdf/Haines-Young&Potschin\\_2010.pdf](http://www.nottingham.ac.uk/CEM/pdf/Haines-Young&Potschin_2010.pdf)
- HERNÁNDEZ, J.I. et al. 2002. Proyecto: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL VALLE DE UCO. Tomo 1. Publicación Interna, Instituto Nacional del Agua. Capítulo 1, pp 5.
- HONORATO, R. et al. 2001. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. Ciencia e Investigación Agraria 28:7-14. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Santiago, Chile.
- IRURTIA, C.B. & MON, R. 1993. Medición de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo con microsimulador de lluvia. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. pp 37-38. Mendoza.
- KUMAR, P. et al. 2013. Linking ecosystem services to strategic environmental assessment in development policies. Environmental Impact Assessment Review. N°40, pp. 75–81.
- LARA, 2011. Servicios ecosistémicos de los bosques nativos en Chile: estado del arte y desafíos. Capítulo 3. Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA.

- LATERRA, P. 2015. ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial. Disponible en: <http://ecoser.com.ar/>.
- MARELLI, HJ. et al. 1984. Evaluación de la erosión hídrica en suelo labrado. Ciencia del Suelo Vol. 2. N°1, pp. 69-77.
- MARTINIS, N. et al. 2002. Proyecto: Evaluación hidrogeológica de la cuenca del Valle de Uco. Tomo 1, 2 y 3. Publicación Interna IT N° 15-CRA. Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Andino. 520pp.
- MICHELENA, R. 2011. Degradación de tierras en Argentina, prevención y control. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, Argentina.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. 2003. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment, Washington, D.C. World Resources Institute. EE.UU.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. 2005. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. 219 pp.
- MORGAN, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ed. Mundiprensa, 343 pp. Madrid, España.
- OLAYA, V. 2004. Hidrología computacional y modelos digitales del terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico, 391 pp.
- ORÚE, M. E. et al. 2007. Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el Modelo USLE con apoyo de SIG. TELEDETECCIÓN- Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Ed. Martin. ISBN: 978-987-543-126-3, pp. 185-192. Argentina.
- PANDO MORENO, M. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 51:23-36. México.
- PÉREZ, M. 2014. Relación espacial de variables edáficas y geomorfológicas del Valle de Uco (Mendoza). Tesis de grado. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias. 95 pp.
- PIZARRO, R. et al. 2009. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo. PHI (Programa Hidrológico Internacional)-VII, Documento Técnico N°18. Chile.

- PIZZOLATO, D. 2012. Reestructuración de los sistemas agroalimentarios y diferenciación social agraria en el Valle de Uco, Mendoza. Implicancias para la Extensión Rural. Estrategias y Experiencias para el trabajo en extensión.
- PROGRAMA DE ACCIÓN NACIONAL DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN (PAN). 1999. Primer Informe Nacional. Dirección de Conservación del Suelo y Lucha contra la Desertificación. Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- QUIROZ, J.E. 2015. Estimación del factor erosividad de las precipitaciones "R", en el oasis centro de Mendoza. Tesis de grado. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias. Mendoza, Argentina. 104 pp.
- RAMIREZ, L. 2010. Estimación de la Pérdida de Suelos por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Juramento-Salta. Tesis de grado en Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 104 p.
- REGAIRÁZ, M. C. 2000. Suelos de la provincia de Mendoza. Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina. Extraído en Marzo de 2016. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/copy.htm#001>
- RENARD, K.G. & FOSTER, G.R. 1994. RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future, Journal of Soil and Water Conservation, vol. 49(3), pp 213–220.
- RÓTOLO, C. & FRANCIS, C. 2008. Los servicios ecosistémicos en el "corazón" agrícola de Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Oliveros. Argentina.
- SMITH, S. V. et al. 2007. Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous Mediterranean-climate watershed. Ecological Applications 17:1379–1387. Extraído e Marzo de 2016. Disponible en: <http://www.esapubs.org/archive/appl/A017/052/appendix-A.htm>
- VICH, A. I. et al. 2010. Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado del centro-oeste de Argentina. Multequina, N° 19, pp. 7-20.
- WANG G. et al. 2002. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall–runoff erosivity R factor. Ecological Modelling. Vol. 153, pp. 143–155.



WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses- A Guide to Conservation Planning. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook Nº 537. USDA. Washington DC, USA. 58 pp.

YAPUR, S. et al. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Cuenca Inferior del Río Bermejo, Salta- Jujuy. Tesis de grado en Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 224 p.

ZHOU P. et al., 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75:319-325.