



RÍO NEGRO
UNIVERSIDAD NACIONAL

**CARACTERIZACIÓN Y MAPA DE ESTADOS EROSIVOS DE LA
CUENCA ALUVIONAL ROCA, GENERAL ROCA, PROVINCIA DE
RIO NEGRO, ARGENTINA**



Trabajo Final de grado de la Carrera Licenciatura en Geología

Autor: Aranda, Denis Antonel

Director: Caselli, Alberto Tomás

Co Director: Lema, Santiago Joaquín

General Roca, Noviembre de 2020

ÍNDICE:

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivos	3
1.2. Ubicación del área de estudio	3
1.3. Clima	4
1.4. Vegetación	7
2. MARCO GEOLÓGICO	8
2.1. Estratigrafía	8
2.1.1. Formación Jagüel (Maastrichtiano – Daniano)	9
2.1.2. Formación Roca (Daniano)	10
2.1.3. Formación El Palo (Mioceno superior - Plioceno inferior)	10
2.1.4. Formación Bayo Mesa (Plioceno superior - Pleistoceno inferior)	11
2.1.5. Depósitos aluviales y abanicos actuales (Holoceno)	12
2.2. Geomorfología	12
2.2.1. Antigua planicie aluvial pedemontana disectada	13
2.2.2. Pedimentos	14
2.2.2.1. <i>Primer nivel de pedimentos</i>	14
2.2.2.2. <i>Pedimentos de flanco con nivel de base en –o vinculados a– los ríos Neuquén – Negro</i>	14
2.2.3. Terrazas fluviales	15
2.2.4. Planicies estructurales por arrasamiento	15
2.3. Estructura	16
2.4. Suelos	17
2.4.1. Clasificación	17
2.4.2. Taxonomía de suelos (USDA)	18
2.4.3. Grupo hidrológico de suelos	19

3. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Número de Curva	21
3.1.1. Marco teórico	21
3.1.2. Método	22
3.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	
y su aplicación para generar un mapa de estados erosivos	25
3.2.1. Marco teórico	25
3.2.2. Esquema del proceso	26
4. RESULTADOS	28
4.1. Número de Curva	28
4.1.1. Mapa de pendientes	28
4.1.2. Características hidrológicas	29
4.1.3. Mapa de tipo de suelos	29
4.1.4. Mapa de uso de suelos	30
4.1.5. Mapa del Número de Curva	32
4.2. Estimación de parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y aplicación	35
4.2.1. Factor R	35
4.2.2. Factor K	40
4.2.3. Factor LS	42
4.2.4. Factor C	48
5. URBANIZACIÓN Y RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA	52
6. CONCLUSIONES	54
7. BIBLIOGRAFÍA	

RESUMEN

La pérdida de suelo por escorrentía constituye una problemática medioambiental y también logística para la expansión de los asentamientos urbanos que, sobre la barda Norte del Río Negro en la región de la ciudad de General Roca, se manifiesta con severa intensidad resultando de gran importancia el estudio de las zonas con mayor vulnerabilidad a la erosión. En este aspecto las aplicaciones basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) por su versatilidad se posicionan como una herramienta principal para una correcta gestión del medio ambiente. Este trabajo tiene como objetivo identificar dichas zonas con mayor sensibilidad a la erosión. Para ello se utiliza, por un lado, el método hidrológico del Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos que define mediante el parámetro Número de Curva (CN) la capacidad de una cuenca vertiente para producir escorrentía. Se propone un método que apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica, permite el cálculo del Número de Curva de manera automatizada y mediante el uso de fuentes de datos actualizados. Para finalizar se utiliza el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) como método para el cálculo de las tasas de pérdida de suelo, posibilitando la elaboración de una cartografía de estados erosivos, que permite la identificación de las áreas de especial sensibilidad a la erosión.

ABSTRACT

The loss of soil due to runoff constitutes an environmental and also logistical problematic for the expansion of urban settlements that manifests itself with severe intensity on the North bank of the Río Negro in the region of the city of General Roca, the study being of great importance of the areas most vulnerable to erosion. In this regard, applications based on Geographic Information Systems (GIS), due to their versatility, are positioned as a main tool for proper environmental management. This work aims to identify these areas with greater sensitivity to erosion. For this, the hydrological method of the United States Soil Conservation Service (SCS) is used, which defines the capacity of a catchment basin to produce runoff by means of the Curve Number (CN) parameter. A method is proposed that, supported by the use of Geographic Information Systems, allows the calculation of the Curve Number in an automated way and through the use of updated data sources. Finally, the USLE (Universal Soil Loss Equation) model is used as a method for calculating soil loss rates, making it possible to draw up a mapping of erosive states, which allows the identification of areas of special sensitivity to erosion.

1. INTRODUCCIÓN

En países con climas semiáridos la erosión produce pérdida de suelos lo cual constituye un problema medioambiental considerable y un peligro inminente para los asentamientos, tanto particulares como de empresas. Resulta de gran importancia el análisis y delimitación de áreas de mayor y menor vulnerabilidad, a fin de planificar un manejo adecuado de la superficie. En el caso de Argentina estos eventos se localizan en una franja Norte-Sur, región árida y semi-árida, que se extiende al Oeste del país.

En la región del Alto Valle del río Negro, las precipitaciones intensas que ocurren en periodos cortos de tiempo aportan alrededor del 50% de la lluvia anual, generando eventos aluvionales que transportan importantes volúmenes de agua y sedimentos desde la parte alta de las cuencas hacia las zonas bajas, donde en la mayoría de los casos se encuentran localizados los centros urbanos. Esto produce anegamientos y destrucción de puentes, caminos, construcciones, entre otras cosas. Todo esto sumado al crecimiento poblacional y a la urbanización hacia la zona de bardas hace que las obras de defensa puedan llegar a ser insuficientes ante un evento aislado de gran magnitud.

Los mayores antecedentes históricos demostrativos del peligro fueron los eventos aluvionales de marzo de 1975 que arrasaron gran parte de la provincia del Neuquén y Alto Valle del río Negro.

Explicación técnica de la catástrofe: de acuerdo a lo informado por el Servicio Meteorológico Nacional, un sistema de muy baja presión en las alturas sobre la región dio lugar a un aporte de humedad proveniente del Océano Atlántico, provocando intensas lluvias y tormentas eléctricas principalmente los días 11 y 12 de marzo. La intensidad de las precipitaciones, llovió en 48 horas lo que normalmente llueve en un año (en Neuquén el promedio anual de lluvias es de 145 mm mientras que en 48 horas llovieron 150 mm) produjo grandes corrientes de agua y lodo que desbordaron arroyos, ríos y canales, destruyendo viviendas, aislando poblaciones y causando serios daños vitales en servicios públicos, caminos, vías férreas y bienes de la población. La ciudad de Neuquén se vio anegada por el lodo que bajó de las bardas, provocando la rotura de la cañería de agua corriente y taponando los desagües. Picún Leufú y Piedra del Águila quedaron aislados, en la primera, el 80% de las casas fueron arrasadas por aluviones y se perdieron todos los cultivos (Neuquén.COPAIDE, 1975).

Es importante cuantificar la pérdida de suelos generada por escorrentía, fenómeno que ha afectado en el pasado a la ciudad de General Roca en forma de inundaciones y aluviones extraordinarios. Esto permitirá mejorar los modelos hidrológicos de la cuenca así como también los procesos de planificación y toma de decisiones con respecto a posibles avances de la urbanización hacia la zona de bardas. Para ello es necesario aplicar una metodología que permita delimitar las zonas con mayor sensibilidad a la erosión.

1.1. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivos generales contribuir al conocimiento de los procesos y variables que influyen en la erosión hídrica del suelo y sus efectos en la región, para que de esta forma poder prevenir situaciones que resulten perjudiciales o peligrosas para el desarrollo urbano y social del área. Además se realizaron mapas de estados erosivos para evaluar las áreas con especial vulnerabilidad.

Este trabajo tiene como objetivos específicos:

- Caracterizar la geología y geomorfología del cuaternario expuesta en la zona de estudio.
- Mapa de Número de Curva (CN) mediante Sistemas de Información Geográfica.
- Estimar los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y generación de un mapa de estados erosivos.

1.2. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de General Roca, provincia de Río Negro, República Argentina. General Roca está ubicada en los 39° 02' de latitud sur y 67° 35' de longitud oeste. La altitud del municipio oscila entre los 300 msnm del límite norte de la ciudad y los 227 msnm de su ángulo sudeste contra la costa del río.

La cuenca aluvional denominada cuenca Roca se localiza sobre la barda Norte del Río Negro en la región de la ciudad de General Roca (fig. 1.1.) y sus descargas afectan directamente a la zona periférica de la ciudad.

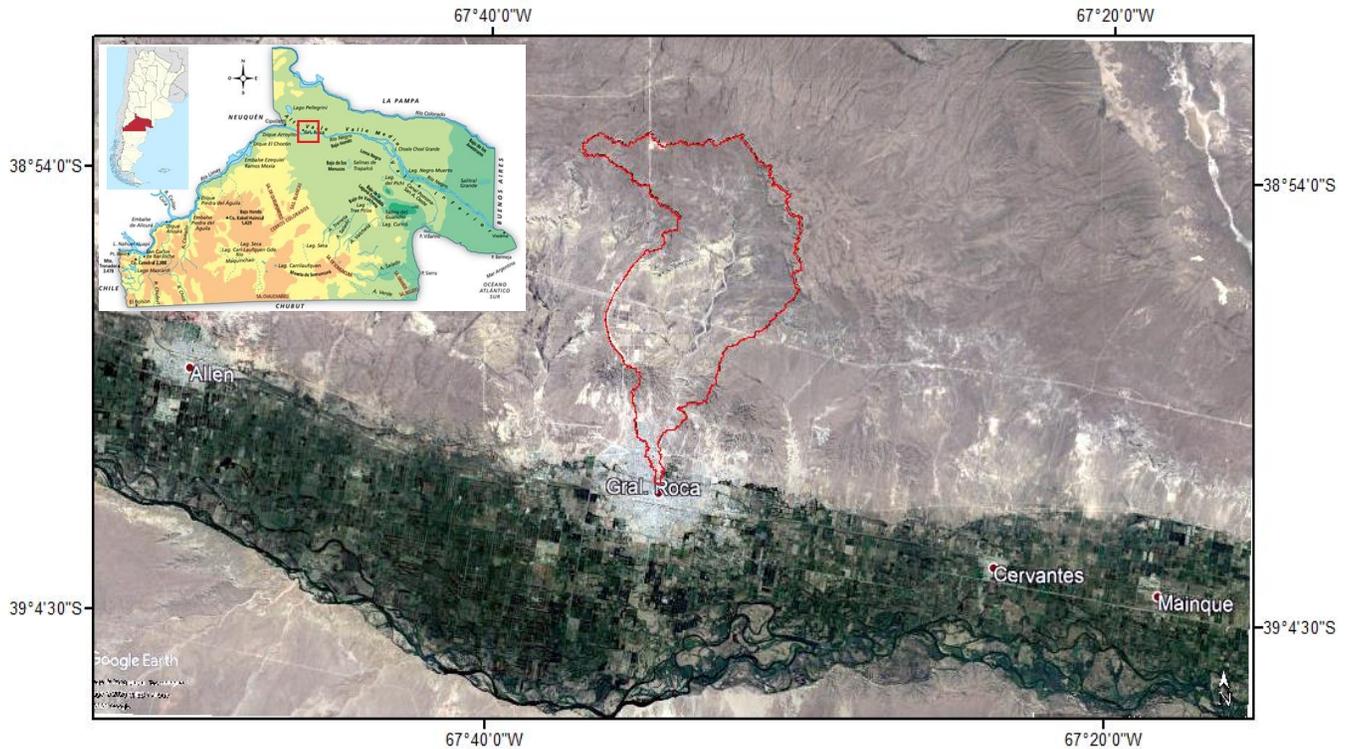


Figura 1.1. Localización del área de estudio, cuenca aluvional Roca.

1.3. Clima

El clima en el Alto Valle de Río Negro es continental, templado y árido, con una precipitación media anual de 188 mm y heladas durante el invierno y la primavera. Las precipitaciones son de origen convectivo, caracterizándose por su gran intensidad, corta duración y escasa cobertura areal. Los vientos predominan del cuadrante oeste, noroeste y sudoeste, con mayor frecuencia en primavera-verano (Marizza et al. 2010).

Las variables meteorológicas más importantes a tener en cuenta son: la temperatura (tabla 1.1.), la precipitación (tabla 1.2.) y el viento (tablas 1.3.; 1.4. y fig. 1.2.) Estos valores fueron recolectados por la estación meteorológica de General Roca para el período 1977-2011, cuyo procesamiento estuvo a cargo del Departamento Provincial de Aguas (DPA) (Lema 2016).

Temperatura [°C]	Meses												Media Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Media	22.9	22.7	17.6	12.9	8.5	7.2	5.4	7.7	11.3	14.6	18.9	21.2	14.2
Mínima Media	14.3	15.1	9.3	4.8	1.4	1.9	0.6	1.6	3	6.8	10.4	13.1	6.8
Máxima Media	31.3	31.4	26.4	22.7	17.1	13.3	12.7	15.1	19.5	22.3	27.3	29.4	22.4

Tabla 1.1. Temperaturas medias, mínimas medias y máximas medias mensuales. Período 1997-2011. Tomado de Lema (2016).

	Meses												Media anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Precipitación Media Mensual [mm]	20.1	14.7	21.3	19	18.5	23	17.4	11.1	25.5	22.3	12.1	14.2	206.1

Tabla 1.2. Precipitaciones medias mensuales. Período 1997-2011. Tomado de Lema (2016).

	Meses												Media anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Velocidad Viento [km/h]													
Media	2.4	2.27	1.59	1.65	1.45	2.17	1.99	2.52	3.47	3.25	2.84	2.62	2.35
Máxima	69.2	72.4	62.8	61.2	85.3	66	62.8	57.9	64.4	70.8	75.6	66	

Tabla 1.3. Velocidades máximas y medias mensuales de viento. Período 1997-2011. Tomado de Lema (2016).

	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Dirección Predominante	SW	N	S	W	W	NW	WNW	NW	N	NW	W	S

Tabla 1.4. Dirección predominante de viento. Período 1997-2011. Tomado de Lema (2016).

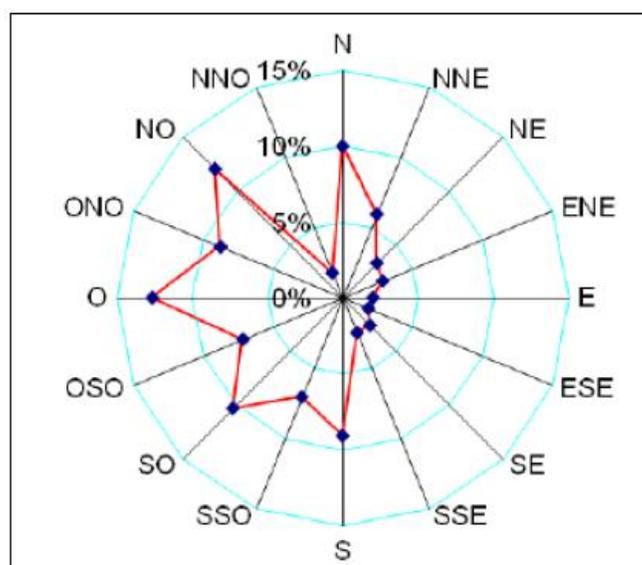


Figura 1.2. Frecuencia de dirección de viento. Tomado de Lema (2016).

También se cuenta con los datos de precipitaciones mensuales para las localidades de Allen (tabla 1.5.), Cinco Saltos (tabla 1.6.) y Villa Regina (tabla 1.7).

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual
2006	0,80	70,70	3,00	19,20	3,10	26,20	35,60	1,10	5,30	51,20	1,00	1,80	219,00
2007	27,00	8,70	30,50	0,50	1,00	8,10	11,00	3,30	35,20	1,30	2,50	0,00	129,10
2008	31,30	8,50	5,10	12,70	70,70	25,90	5,60	11,00	10,40	1,20	2,00	6,60	191,00
2009	3,20	0,00	0,20	0,00	39,40	5,80	9,00	13,40	8,40	0,00	13,00	0,20	92,60
2010	6,70	3,60	8,00	1,00	32,80	10,20	0,40	3,40	60,00	19,60	2,80	6,20	154,70
2011	18,20	5,80	1,60	5,80	0,40	2,40	2,20	5,00	0,00	35,80	2,40	0,80	80,40
2012	49,40	8,20	36,80	4,80	2,60	4,60	0,60	14,60	0,80	68,60	29,20	5,60	225,80
2013	38,80	1,40	14,40	8,00	3,80	0,80	3,80	1,00	15,20	11,20	0,20	0,20	98,80
2014	0,00	9,20	0,20	117,40	58,60	1,40	10,60	1,00	24,00	45,00	11,60	16,20	295,20
2015	17,40	18,40	1,20	26,40	1,20	8,20	4,80	8,80	24,40	10,60	0,80	0,20	122,40
2016	21,20	27,60	2,40	14,80	90,00	13,00	19,20	7,40	5,40	120,00	4,20	1,60	326,80
2017	1,00	19,00	42,00	25,20	3,40	8,00	13,60	4,60	8,00	1,40	16,40	22,80	165,40
2018	2,40	11,40	0,00	0,00	17,70	21,10	96,40	3,30	58,20	30,60	46,40	6,60	294,10
2006-2018	16,72	14,81	11,18	18,14	24,98	10,44	16,37	5,99	19,64	30,50	10,19	5,29	184,25

Tabla 1.5. Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica de C.M. Guerrico, Allen para el periodo 2006-2018. Fuente: Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle del INTA.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual
2012	32,60	22,60	8,60	3,00	1,60	5,20	0,40	10,00	3,20	76,20	62,40	6,80	232,60
2013	39,60	15,20	36,20	10,20	5,20	0,00	1,20	0,00	16,80	40,40	0,00	0,20	165,00
2014	0,00	3,20	0,40	147,40	44,80	1,20	11,40	10,80	25,40	51,60	9,40	8,80	314,40
2015	5,20	8,00	0,40	8,40	0,80	8,00	9,00	11,20	19,00	16,60	2,40	0,40	89,40
2016	21,80	17,80	4,00	22,40	76,00	7,60	28,00	9,20	2,50	186,60	4,80	2,80	383,50
2017	0,00	5,60	12,30	22,00	4,00	8,30	14,50	6,10	16,50	4,60	10,60	20,00	124,50
2018	0,00	10,20	3,20	0,40	24,20	16,00	50,40	1,40	37,00	34,00	16,20	6,00	199,00
2019	0,00	22,40	0,00	13,80	24,00	17,80	8,40	6,80	8,40	14,20	6,20	0,60	122,60
2012-2019	12,40	13,13	8,14	28,45	22,58	8,01	15,41	6,94	16,10	53,03	14,00	5,70	203,88

Tabla 1.6. Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica de Cinco Saltos para el periodo 2012-2019. Fuente: Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle del INTA.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual
2011	16,60	0,80	20,40	3,40	1,00	3,20	9,60	6,80	0,20	39,20	9,40	13,00	123,60
2012	52,80	13,20	14,80	6,60	0,80	7,40	2,00	37,20	2,20	59,40	33,80	6,80	237,00
2013	79,60	7,00	54,80	21,20	3,00	4,60	5,00	1,00	8,80	13,00	2,60	6,20	206,80
2014	0,00	4,80	1,40	96,80	47,80	1,20	2,40	0,20	9,60	24,80	9,40	24,60	223,00
2015	18,60	69,00	0,20	13,40	0,40	4,00	1,00	5,80	35,80	18,00	0,80	35,20	202,20
2016	77,00	25,60	15,00	14,00	79,60	11,00	32,00	17,80	17,20	126,60	2,20	0,80	418,80
2017	0,00	2,60	109,40	96,00	6,80	15,40	39,40	17,80	11,40	1,00	32,60	20,00	352,40
2018	10,40	18,00	6,40	0,20	23,80	24,60	68,40	1,80	63,60	58,00	66,20	7,60	349,00
2019	0,60	16,60	0,00	7,40	39,80	28,20	10,00	6,80	7,20	10,80	6,00	1,00	134,40
2011-2019	28,40	17,51	24,71	28,78	22,56	11,07	18,87	10,58	17,33	38,98	18,11	12,80	249,69

Tabla 1.7. Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica de Villa Regina para el periodo 2011-2019. Fuente: Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle del INTA.

1.4. Vegetación

Según la clasificación fitogeográfica de Cabrera (1976), la ciudad se encuentra dentro de la provincia fitogeográfica del Monte, distrito de llanuras y mesetas la cual está definida por una estepa arbustiva con varios estratos y muy poca cobertura donde son muy frecuentes las jarillas. Los estratos medio y bajo (50 a 150 cm) son los de mayor cobertura, aunque no superan el 40%. Los ríos poseen una galería arbórea de sauce criollo.

Vegetación dominante: Estepa arbustiva xerófila, sammófila o halófila. También hay matorrales y bosques marginales de algarrobos o de sauces.



Figura 1.3. Ejemplo de la vegetación dominante en la barda norte de General Roca, fotografía tomada desde la parte superior del dique Roca.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Estratigrafía

La mayoría de las unidades geológicas expuestas en la zona de estudio se encuentran comprendidas en el sector Sureste de la Hoja Geológica 3969-II Neuquén (Rodríguez et al. 2007) y algunas unidades quedando en el límite con la Hoja Geológica 3969-IV General Roca (Hugo y Leanza, 2001). La cuenca de estudio se halla en el margen norte del valle del río Negro donde la erosión descubre unidades de edad Maastrichtiano - Daniano a depósitos actuales del Holoceno correspondientes al extremo oriental de la cuenca Neuquina.

Una síntesis de la geología de la región de la cuenca se muestra en el cuadro 2.1. Las rocas más antiguas, aflorantes por la erosión fluvial, corresponden a la Formación Jagüel (Maastrichtiano/Daniano). Ver mapa geológico en la figura 2.1.

Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos aluviales y abanicos actuales
		Pleistoceno	Depósitos fluviales antiguos de los Ríos Neuquén y Negro (terrazas fluviales indiferenciadas).
			Depósitos que cubren pedimentos vinculados a los Ríos Neuquén y Negro.
	Neógeno	Plioceno Superior	Formación Bayo Mesa.
		Mioceno Superior	Formación El Palo.
	Paleógeno	Daniano	Formación Roca
Mesozoico	Cretácico Superior	Maastrichtiano - Daniano	Formación Jagüel

Cuadro 2.1. Cuadro Cronoestratigráfico de la zona de estudio.

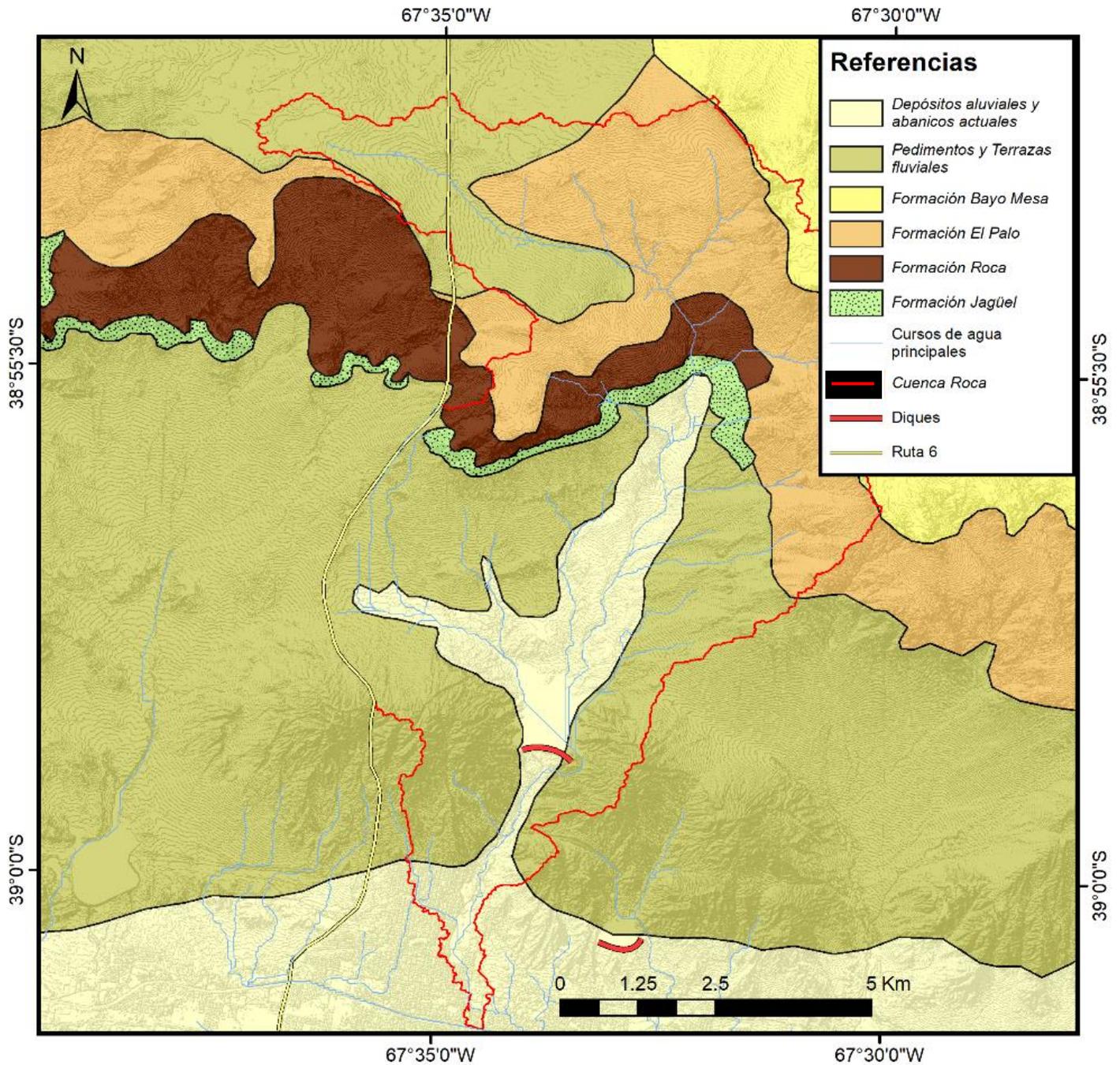


Figura 2.1. Mapa geológico de la zona de estudio.

2.1.1. Formación Jagüel (Maastrichtiano – Daniano)

Las sedimentitas de la Formación Jagüel son un conjunto monótono de pelitas (arcilitas, limolitas, limoarcilitas) de colores verde oliva y amarillento, atravesadas por guías delgadas

de yeso fibroso. Estas guías quedan en la superficie meteorizada otorgando un brillo característico a los afloramientos. Las arcilitas son plásticas, con brillo céreo, fragmentosas; algunas presentan laminación, en tanto que las limolitas son grisáceas; todas las pelitas son calcáreas (Barrio, 1990b).

En las bardas situadas al norte de General Roca los afloramientos de la Formación Jagüel son muy friables, de color castaño a verde oliva y conforman la parte basal de las bardas.

Según Náñez y Concheyro (1996) y Náñez (2002), el contenido micropaleontológico de la Formación Jagüel ha permitido ubicarla temporalmente en el Maastrichtiano tardío - Daniano (temprano y tardío).

2.1.2. Formación Roca (Daniano)

Está compuesta por Calizas, arcilitas, margas y yeso. En líneas generales, los afloramientos de la Formación Roca presentan buenas exposiciones, con importante expresión morfológica debida a los paquetes calcáreos resistentes que forman cornisas, la coloración amarilla, ocre o anaranjada pálida y el abundante contenido fosilífero (Rodríguez, 2007).

En su localidad tipo (General Roca) la Formación Roca está compuesta por una alternancia de calizas grises a amarillentas, muy fosilíferas, con arcilitas y margas verdosas, con abundante yeso hacia el techo. El conjunto tiene un espesor de aproximadamente 26 m (Weber, 1972).

En el ámbito de la Hoja Neuquén, la edad de la Formación Roca se ha determinado sobre la base de microfauna y nanofósiles calcáreos en el Daniano tardío (Náñez y Concheyro, 1993, 1996, Concheyro y Náñez, 1994). Sin embargo, en el sector occidental de la Cuenca Neuquina (afloramientos de Malargüe, Mendoza), la edad de la Formación Roca es maastrichtiana tardía (Parras et al., 1998, Parras y Casadío, 1999), con lo cual la unidad sería diacrónica.

2.1.3. Formación El Palo (Mioceno superior - Plioceno inferior)

Está compuesta por areniscas, fangolitas, tufitas, calizas. La litología dominante consiste en areniscas gruesas a muy gruesas, a veces conglomerádicas, de color gris azulado o verdoso. Son líticas, con predominio de clastos de basalto, y selección regular a mala. En el tramo

superior, el tamaño de grano disminuye y la coloración pasa a castaña y blanquecina. Los estratos son gruesos, con geometría lenticular y estratificación cruzada en artesa de gran escala; son frecuentes las bases de corte y relleno con intraclastos. Como intercalaciones aparecen fangolitas castañas a rojizas, algunos niveles de calizas impuras, horizontes con evidencias de edafización y alternativamente, limolitas y areniscas limosas gris blanquecinas con abundante detrito piroclástico (Uliana, 1979). El espesor de la unidad es relativamente constante y ronda los 50 m en la mayor parte de las localidades donde se la observó. Uliana (1979) citó también espesores de hasta 80 metros.

En líneas generales, las sedimentitas de la Formación El Palo se depositaron en un medio fluvial de energía variable; las acumulaciones arenosas lenticulares con estructuras de corriente y bases erosivas señalan la presencia de ríos anastomosados, en tanto que las intercalaciones finas con concreciones calcáreas y paleosuelos corresponden a depósitos de llanura aluvial (Uliana, 1979).

Sobre la base de sus relaciones estratigráficas, la Formación El Palo es post Mioceno medio; en tanto que los vertebrados fósiles adjudicados a la Edad Huayqueriense indican el Mioceno tardío, según la escala vigente para las Edades Mamífero sudamericanas (Uliana, 1979 y Pascual et al. 1984).

2.1.4. Formación Bayo Mesa (Plioceno superior - Pleistoceno inferior)

Está compuesta por conglomerados y areniscas gruesas. Se destacan los conglomerados de color gris claro, en su composición predominan los fragmentos de basalto, con menor proporción de otras rocas volcánicas y cuarzo. Es frecuente la imbricación de clastos y la estratificación está pobremente definida. En forma subordinada se presentan cuerpos lenticulares de areniscas gruesas de color gris, con estratificación cruzada en artesa. El tramo superior de la unidad (alrededor de 1 m) está cementado por carbonato de calcio de color blanquecino a castaño claro. El espesor de la unidad es relativamente constante y oscila entre los 10 y 15 metros (Uliana, 1979).

La entidad forma parte de los extensos mantos de grava que con diferente desarrollo y en distintos niveles topográficos cubren buena parte de las mesetas de la Patagonia Extraandina, y que han recibido diferentes denominaciones: Formación Tehuelche (Doering, 1882), Rodados Tehuelches (Windhausen, 1914), Rodados Patagónicos (Wichmann, 1924), II Nivel

de Piedemonte (Groeber, 1955), entre otros. Existen múltiples interpretaciones sobre el origen de los mantos pefíticos patagónicos, que involucran la acción de procesos marinos, fluviales y/o glaciarios. Para la región comprendida entre los ríos Colorado y Negro, Fidalgo y Riggi (1970) sostuvieron que el origen de estas unidades responde a repetidos cambios en el nivel de base y que su dispersión estuvo controlada por procesos de pedimentación, acción fluvial y remoción en masa.

La edad de esta unidad fue considerada post Plioceno medio, dado que al este de Gobernador Ayala cubre a depósitos con mamíferos de edad Huayqueriense (Uliana, 1979). Franchi et al. (1984) y Ardolino et al. (1996) la situaron tentativamente en el Plio - Pleistoceno. Weber (1972) ubicó a la Formación Tehuelche en el Pleistoceno inferior sobre la base de su relación discordante con la Formación El Palo.

Los pedimentos y terrazas fluviales se describen en el capítulo 2.2. Geomorfología como: 2.2.2 Pedimentos y 2.2.3 Terrazas fluviales respectivamente.

2.1.5. Depósitos aluviales y abanicos actuales (Holoceno)

Corresponden a los sedimentos transportados por los cursos fluviales, que conforman las planicies de inundación, los rellenos de canal y abanicos aluviales de variables dimensiones. Los cursos fluviales que atraviesan la zona de estudio son de carácter efímero, y en general la competencia es baja, por lo que predominan las granulometrías arenosas a pelíticas en los depósitos, con proporciones menores de grava fina en capas delgadas.

2.2. Geomorfología

Para caracterizar la geomorfología de la zona de estudio se tomó lo descrito por Rodríguez et al. (2007) en la Hoja geológica 3969-II Neuquén y sumado a la propia interpretación de imágenes satelitales se generó el mapa de la figura 2.2. donde se delimitan las principales unidades geomorfológicas.

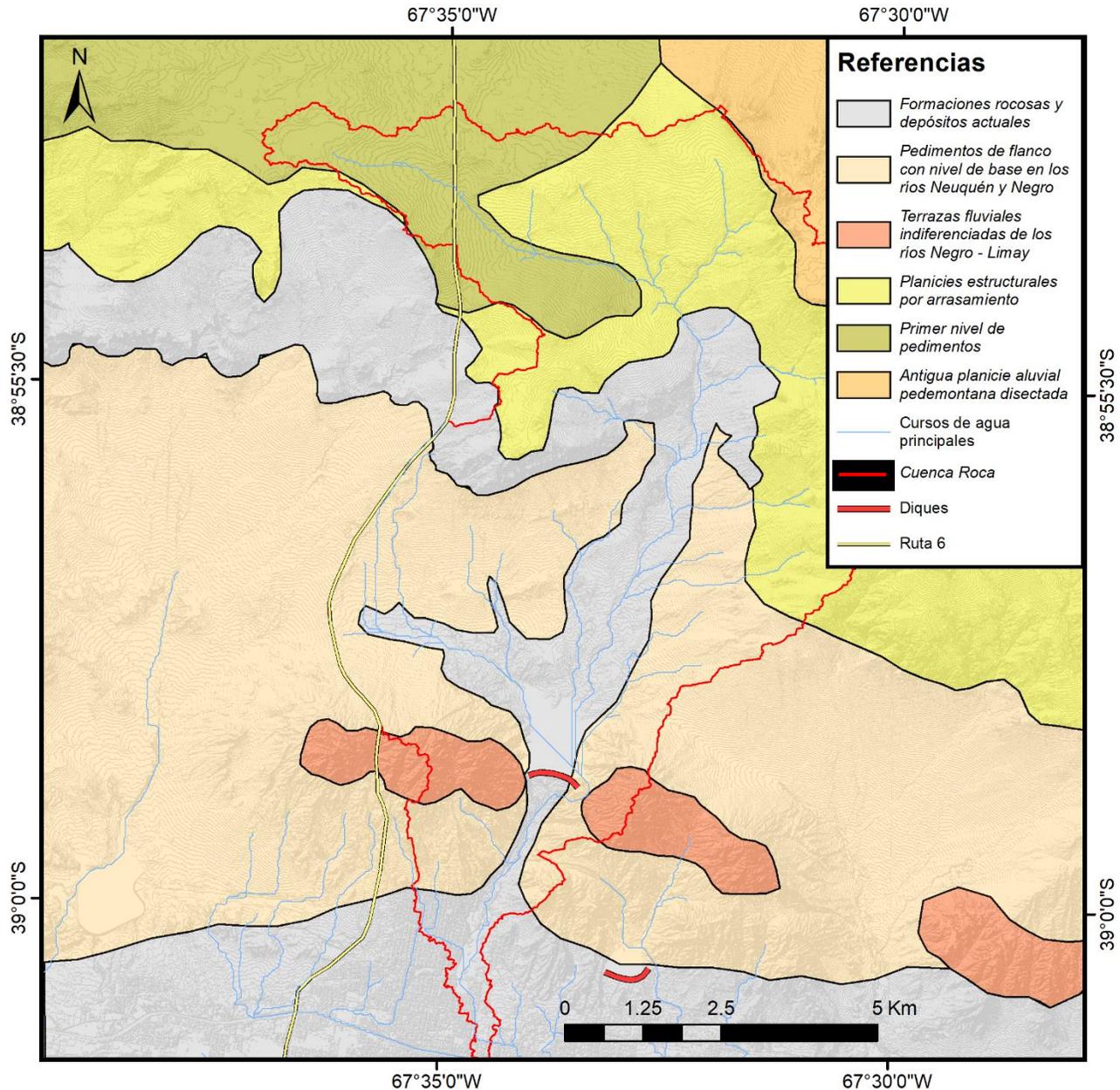


Figura 2.2. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

2.2.1. Antigua planicie aluvial pedemontana disectada

Se trata de un extenso nivel mesetiforme coronado por mantos de gravas, descrito como Formación Bayo Mesa. Esta geoforma fue estudiada originalmente por González Díaz y Malagnino (1984) y González Díaz y Ferrer (1986) quienes señalaron que la distribución de estos depósitos sugiere la forma de un gran abanico aluvial cuyo ápice estaría en las vecindades de la sierra Blanca (Añelo, Neuquén).

Dentro de la Hoja Neuquén, esta amplia superficie está bordeada por escarpas de erosión donde afloran sedimentitas del Grupo Malargüe y de las formaciones Barranca de los Loros y El Palo. La cubierta de gravas actúa como protección para estas rocas de escasa resistencia. Toda la planicie está flanqueada por importantes superficies de pedimentación.

2.2.2. Pedimentos

2.2.2.1. *Primer nivel de pedimentos*

Este nivel se ha reconocido en las cotas 470 a 400 m en el área situada al norte de Allen y General Roca, donde compone la parte alta de las bardas con afloramientos del Grupo Malargüe. Esta antigua superficie está disectada por numerosos cañadones, por lo que su topografía es irregular. En los sectores donde se la ha identificado, está rodeando a remanentes de erosión de la Antigua planicie aluvial pedemontana disectada, por lo que se interpreta que el Primer nivel de Pedimentos se formó a expensas de la erosión de estos depósitos aluviales antiguos.

2.2.2.2. *Pedimentos de flanco con nivel de base en –o vinculados a– los ríos Neuquén – Negro*

Estas superficies de erosión se extienden con buena continuidad lateral al pie de la escarpa de erosión de la meseta coronada por las pefitas de la Formación Bayo Mesa. Los pedimentos desarrollados en el flanco sur de la Antigua planicie aluvial pedemontana disectada fueron descritos en detalle por Fauqué (1996).

En nuestra zona de estudio, superficies de pedimentación con nivel de base en el río Negro biselan a sedimentitas del Grupo Malargüe; la escarpa de erosión al pie de la cual se desarrollan está determinada por niveles resistentes de la Formación Roca.

Sobre estas superficies de erosión se depositaron sedimentos arenosos a conglomerádicos vinculados en su origen con superficies de pedimentación posteriores al denominado primer nivel de pedimentos. Las mismas presentan desarrollo variable y genéticamente se encuentran vinculadas a diferentes niveles de base. Estas acumulaciones adoptan la forma de mantos de espesor variable (hasta 12 m), constituidos por arenas limosas rosado blanquecinas, con lentes de conglomerado polimíctico gris, con clastos redondeados de tamaño variable entre 2 y 4 cm, a veces con estratificación cruzada tangencial; localmente

presentan fragmentos rodados de valvas de la Formación Roca. En algunos sectores se observó cementación por carbonato de calcio. Debido a su génesis, la proveniencia de estos sedimentos es local, en el área de estudio buena parte de los depósitos deriva de la destrucción de la Formación Bayo Mesa (Uliana, 1979).

2.2.3. Terrazas fluviales

Los ríos permanentes de la región se caracterizan por sus valles muy amplios, escalonados en sección transversal, cuyos laterales están formados por superficies llanas situadas a diferentes niveles que representan terrazas fluviales. En los bordes de dichas terrazas afloran unidades cretácicas hasta cenozoicas, expuestas por el desplazamiento lateral del cauce, sumado a la remoción en masa y al lavaje pluvial (Fauqué, 1996). Todas estas superficies están cubiertas por mantos de rodados que son remanentes de las viejas planicies aluviales (depósitos fluviales antiguos). En algunos casos, los rodados presentan entoscamiento, originando así planicies estructurales por cementación calcárea (González Díaz y Ferrer, 1986).

En total se distinguieron para el río Neuquén ocho niveles de terrazas. Los que se sitúan en forma desconectada a lo largo del río Negro y el río Limay se mapearon como indiferenciados, ya que no se ha establecido con certeza con cuál de los niveles del río Neuquén se corresponden. Estos depósitos se originaron en forma concomitante con la evolución del valle fluvial. Su posición topográfica inferior permite considerarlos más jóvenes que los rodados de la Formación Bayo Mesa, por lo que se los asigna al Pleistoceno. Litológicamente, se trata de ortoconglomerados polimícticos compuestos por clastos subredondeados de volcanitas mesosilícicas y básicas, de colores gris, castaño oscuro y negro, con diámetros que pueden llegar a 25 cm (Ardolino et al., 1996; de Ferrarís, 1966). Presentan estratificación grosera, con algunas intercalaciones arenosas. Algunos niveles poseen cementación por carbonato de calcio en la parte superior y resultan así impermeables y más resistentes.

2.2.4. Planicies estructurales por arrasamiento:

Estas geoformas son superficies planas horizontales o suavemente inclinadas en las que se exponen o están subaflorantes sedimentitas de los grupos Neuquén y Malargüe, controladas

por la existencia de estratos resistentes. Estas superficies se originan por erosión de los términos más friables de una sucesión sedimentaria hasta la exposición superficial de una capa dura, en general de gran desarrollo areal (González Díaz y Ferrer, 1986).

Al norte del río Negro, las sedimentitas del Grupo Malargüe integran las Planicies estructurales por arrasamiento del noroeste rionegrino de González Díaz y Malagnino (1984), que conforman un paisaje mesetiforme bajo con aspecto escalonado determinado por bancos resistentes, en particular las calizas de la Formación Roca

2.3. Estructura

La cuenca de estudio está ubicada dentro de la cuenca Neuquina, más precisamente en el sector oriental de la misma, donde la deformación está controlada por el basamento y se manifiesta como un plegamiento muy suave generado por inversión tectónica de sistemas extensionales del Mesozoico inferior (Fig. 2.3). Esta deformación tuvo lugar en sucesivos pulsos durante el Jurásico y Cretácico que determinaron la configuración de las estructuras principales, las que fueron reactivadas en diversa medida durante la orogenia Ándica (Vergani et al., 1995; Ramos, 1999a). Por lo general, estas estructuras muestran escasa o nula expresión en superficie, debido a la extendida cobertura sedimentaria cenozoica no perturbada. A excepción del área suroccidental de la Hoja 3969-II Neuquén, donde son reconocibles algunos rasgos vinculados con la Dorsal de Huincul, las estructuras más importantes se pueden identificar por medio de la profusa información de subsuelo generada por la exploración petrolera.

La Dorsal de Huincul continúa en subsuelo, al este de la ciudad de Neuquén, en la falla del río Negro, con orientación N80°O. Esta estructura se asocia a fallamiento normal y fosas tectónicas de orientación E - O que fueron reconocidas en los yacimientos Fernández Oro y General Roca e interpretadas como estructuras transtensivas secundarias (Ramos y Cortés, 1984). Estudios geofísicos recientes señalan la continuidad de esta falla en el subsuelo de la provincia de Río Negro por 350 km, con rumbo variable E – O a SE (Kostadinoff et al., 2005).

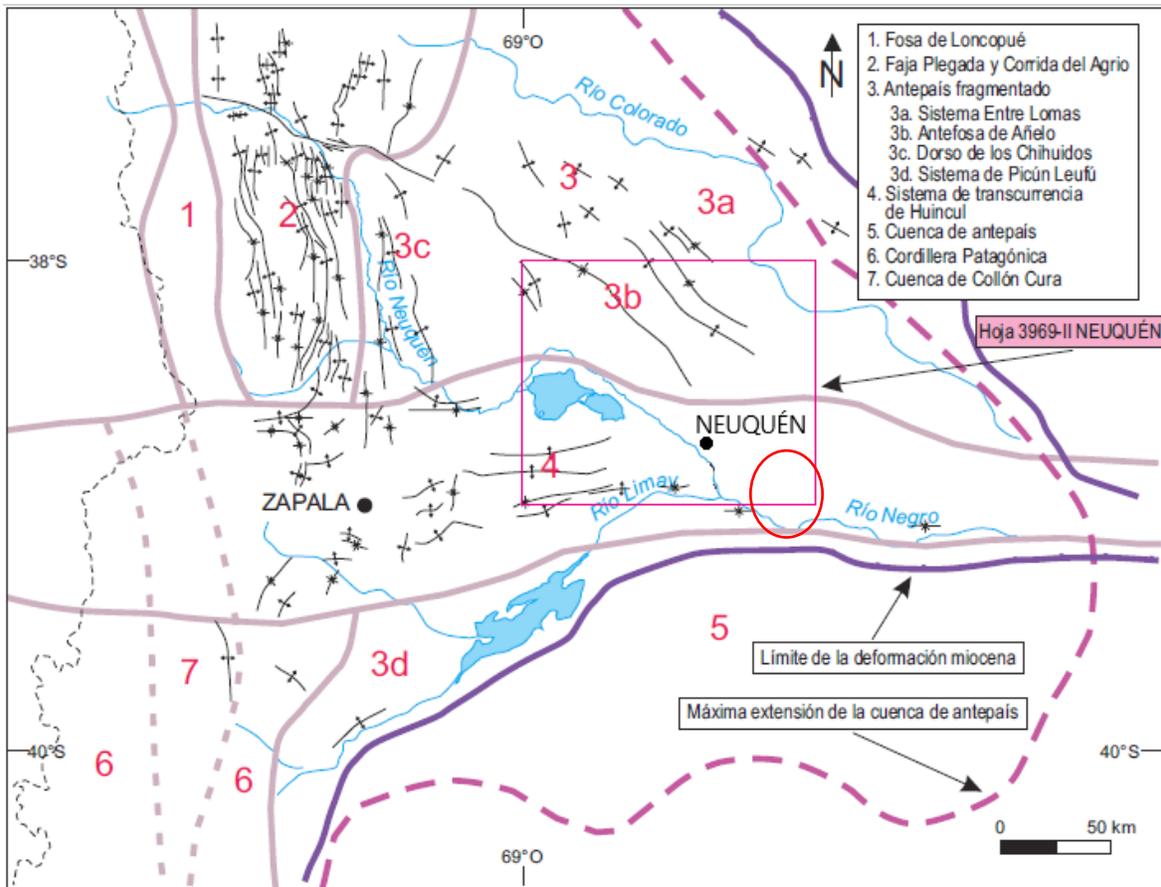


Figura 2.3. Unidades morfoestructurales de la cuenca Neuquina. Tomado de Rodríguez et al. 2007. Ubicación de la cuenca Roca (en rojo).

2.4. Suelos

2.4.1. Clasificación

De todas las clasificaciones desarrolladas, las más utilizadas son:

- **Clasificación climática o zonal**, que se ajustan o no, a las características de la zona bioclimática donde se haya desarrollado un tipo concreto de suelo, teniendo así en cuenta diversos factores como son los climáticos y los biológicos, sobre todo los referentes a la vegetación. Esta clasificación ha sido la tradicionalmente usada por la llamada Escuela Rusa.
- **Clasificación genética**, en la que se tiene en cuenta la forma y condiciones en las que se ha desarrollado la génesis de un suelo, teniendo en cuenta por tanto, muchas más variables y criterios para la clasificación.

- **Clasificación analítica** (conocida como Soil Taxonomy), en la que se definen unos horizontes de diagnóstico y una serie de caracteres de referencia de los mismos. Es la establecida por la Escuela Americana.

La clasificación de suelos más ampliamente implementada a nivel mundial fue la desarrollada por la USDA (United States Department of Agriculture) en 1938. Posteriormente, la FAO adopta una nueva clasificación de suelos, basada en la clasificación de USDA, para el mapa mundial de suelos realizado por la FAO-UNESCO en 2006 generando la Base Mundial de Referencia para los Recursos del Suelo (WRB).

2.4.2. Taxonomía de suelos (USDA)

La taxonomía de suelos de USDA (Soil Taxonomy) es una clasificación de suelos en función de varios parámetros y propiedades que se desarrolla en diferentes niveles: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie.

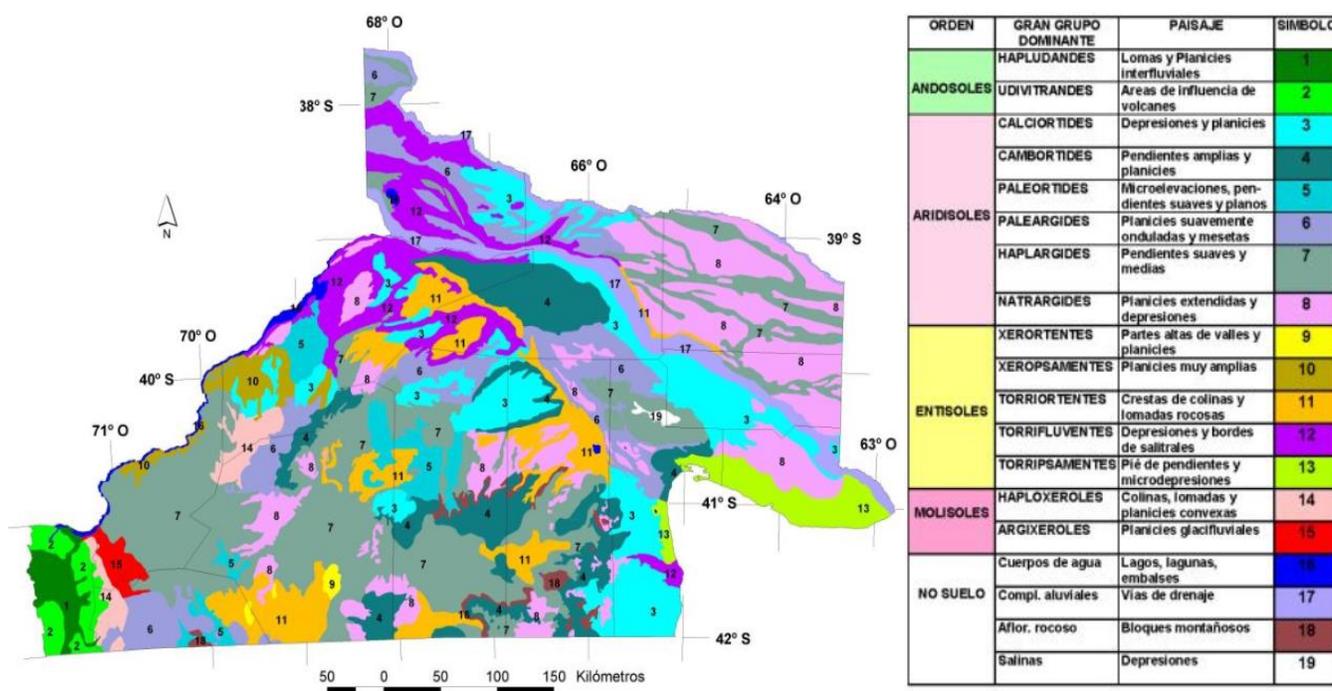


Figura 2.4. Mapa de suelos de la provincia de Río Negro. Tomado Cruzate et al. 2006.

En nuestra zona de estudio de acuerdo con el régimen de humedad de los suelos (Soil Taxonomy USDA, 1974), la Sección de control de humedad se clasifica como de régimen árido en las categorías superiores, o tórrico a nivel de subgrupo. Por esta razón, debido al

marcado déficit de humedad a lo largo de todo el año, prácticamente sin excepción, todos los suelos se caracterizan por ser totalmente calcáreos, así como por la ausencia de la diferenciación de horizontes genéticos, en ocasiones aisladas muy escasa. Esto origina una marcada insuficiencia de los procesos de lixiviación, los que a través de ciclos prolongados han redundado en concentraciones importantes de las bases, en forma de precipitaciones calcáreas o yesíferas de diverso grado y calidades (Laya 1980).

2.4.3. Grupo hidrológico de suelos

En la base del método para la asignación del Numero de Curva (CN) está la clasificación del suelo respecto de su comportamiento esperado en relación a la generación de escorrentía, bajo unas condiciones homologables de cobertura vegetal y precipitación (NRCS, 1999). La clasificación original data de 1955 y es obra de Musgrave, si bien posteriormente se ha ido modificando, ajustando las definiciones y delimitaciones de las categorías consideradas en la misma (Mongil y Navarro, 2012), conocidas en su conjunto como grupos hidrológicos.

□ **Grupo A.** Suelos con un potencial muy bajo para generar escorrentía. Derivado de la alta profundidad “efectiva” (no hay limitaciones físicas para la percolación del agua), con buenas tasas de infiltración (velocidad de transmisión elevada por alta macroporosidad de marcado carácter litológico).

□ **Grupo B.** Suelo con potencial generador de escorrentía bajo. Su capacidad de infiltración es moderada, al presentar una profundidad “efectiva” superior a 1 m, con buena porosidad estructural (resultante de un elevado contenido en materia orgánica de los horizontes superficiales).

□ **Grupo C.** Suelos con potencial medio para provocar escorrentía. El reducido contenido en materia orgánica o la presencia de materiales litológicos de texturas finas llevan a unas tasas de infiltración bajas, con independencia de la concurrencia o no de limitaciones físicas para la percolación a partir de los 25 cm.

□ **Grupo D.** Suelo con alto potencial para provocar escorrentía. La infiltración está muy dificultada por la reducida macroporosidad que presenta el horizonte superficial o por el escaso valor de profundidad “efectiva” (inferior a 25 cm).

Según el estudio de cuencas aluvionales del Alto Valle de Río Negro y Valcheta (Laya et al., 1980) se han encontrado en el área estudiada, los cuatro grupos hidrológicos de suelos. De entre ellos se destacan por su orden sucesivo de importancia, los de los grupos A y B, por sobre los de C y D.

La distribución del grupo A se extiende por diversos sectores de toda el área, pero particularmente desde la altura de Villa Regina hasta Choele Choel. Con el grupo B sucede lo mismo, pero inversamente, su mayor difusión se encuentra desde Villa Regina hacia el Oeste. Los grupos C y D se encuentran solamente en la última área nombrada.

En forma generalizada puede decirse que el grupo A se vincula a los aluviones subrecientes asociados a la formación El Palo; y menos, a otras vertientes que desembocan directamente en el valle del Río Negro Superior, donde las acciones eólicas recientes y actuales son destacadas. El grupo B está asociado a los rodados patagónicos y a la mayor parte de la formación Lomas Coloradas, así como a depósitos aluvionales recientes de la cuenca del lago Pellegrini y otras cercadas. El grupo C alcanza su mayor expresión en el fondo de la cuenca del paleocauce del Neuquén.

Finalmente el grupo D está íntimamente ligado a los afloramientos y zonas linderas de las formaciones Jagüel, Allen y Roca.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Número de Curva

3.1.1. Marco teórico

Del conjunto de procesos que rigen el ciclo hidrológico, la infiltración juega un papel central, puesto que de él derivan consecuencias en el comportamiento ecológico general del sistema atmósfera-suelo. Este proceso es complejo, estando condicionado por un conjunto de factores muy diversos que van desde las características de la precipitación, hasta la heterogénea disposición espacial de la superficie terrestre, pasando inevitablemente por el suelo como sujeto activo, dada su condición de medio poroso y absorbente.

Cuando se supera la cantidad máxima de agua que puede ser infiltrada por un suelo o la tasa de infiltración es insuficiente para absorber el volumen de agua aportado, la consecuencia inmediata es la generación de escorrentía. El modelo de número de curva estima, de forma empírica, la escorrentía superficial generada por un aguacero. Uno de los métodos más extendidos y experimentados de los modelos empíricos de infiltración es el del SCS de los Estados Unidos (McCuen, 1982).

El modelo asume la hipótesis conceptual de que la escorrentía acumulada en una porción de la cuenca es a la infiltración acumulada, como la precipitación bruta acumulada, una vez descontada la fracción necesaria para que se produzca el encharcamiento, a la máxima infiltración acumulada que puede producirse, es decir:

$$\frac{Q}{F} = \frac{P - P_0}{S} \quad (1)$$

Siendo S la máxima infiltración potencial, F la infiltración real después del encharcamiento, P la precipitación, Q la escorrentía superficial y P₀ el umbral de escorrentía, es decir, la cantidad de precipitación necesaria para que el suelo se encharque y la escorrentía superficial aparezca.

Considerando que por continuidad se debe cumplir:

$$F = (P - P_0) - Q \quad (2)$$

Y asumiendo una relación media experimental entre el umbral de escorrentía y la máxima infiltración potencial de:

$$P_0 = 0.2S \quad (3)$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (4)$$

Los estudios empíricos realizados por el SCS permitieron relacionar la máxima infiltración potencial con un parámetro de referencia, denominado número de curva, CN, cuyos valores están tabulados entre 0 y 100.

$$S \text{ (mm)} = 254 \cdot \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad (5)$$

3.1.2. Método

En este trabajo se propone un método para la obtención de manera automática del número de curva, parámetro hidrológico que se utiliza para el cálculo de la escorrentía. El método propuesto está basado en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten trabajar con datos de distinta índole que se den en una misma localización. La generación de mapas del número de curva se realiza mediante la aplicación de tablas de reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información. El método propuesto se ha aplicado a la cuenca aluvional Roca, que tiene una superficie aproximada de 76 km².

En la Tabla 3.1. se muestran los valores del número de curva deducidos del parámetro umbral de escorrentía, P₀, utilizado en el trabajo de Témez (1978).

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho R	>= 3	77	68	89	93
Barbecho R	< 3	71	78	82	86

Cultivos en hilera R	>= 3	69	79	86	89
Cultivos en hilera R	< 3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	>= 3	63	75	83	86
Cereales de invierno R	< 3	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	>= 3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres R	< 3	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	>= 3	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos R	< 3	52	67	76	79
Pradera pobre	>= 3	68	78	86	89
Pradera media	>= 3	49	69	78	85
Pradera muy buena	>= 3	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	46	67	81	88
Pradera media	< 3	39	59	75	83
Pradera muy buena	< 3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	>= 3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	>= 3	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	>= 3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	25	50	67	76
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) espesa		36	52	62	69
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	>= 3	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	91	91	91	91
Rocas impermeables	>= 3	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	93	93	93	93

Tabla 3.1. Número de curva para condiciones medias de humedad. Se consideró que la vegetación sigue la línea de máxima pendiente, por tanto el valor elegido como característica hidrológica fue R.

Como se observa en la Tabla 3.1. el valor del parámetro número de curva para condiciones medias de humedad en el suelo depende del uso del suelo, las características hidrológicas, la pendiente del terreno y el tipo de suelo.

El método que se propone en este trabajo se apoya en los SIG. Estos son sistemas gestores de base de datos geográficos. Cuatro son sus funciones principales (Aronoff, 1989):

1. Entrada de datos
2. Manejo de datos (almacenamiento y búsqueda)
3. Manipulación y análisis de los datos
4. Salida de datos, tanto en forma de tabla como en mapa

Hay dos tipos de estructura de datos en un SIG: vectorial (puntos, líneas y polígonos) y ráster (red de celdas rectangulares).

En estudios hidrológicos el uso del modelo ráster es más adecuado que el vectorial. Las ventajas principales que presenta este modelo son: a) la división de la zona de estudio en unidades espaciales que tienen el mismo tamaño y la misma forma, facilitando la aplicación de modelos distribuidos, b) es fácil realizar operaciones con las celdas vecinas (p.e. análisis estadísticos) y c) permite combinar cualquier tipo de dato con mapas obtenidos de imágenes satélite.

En la sección de Resultados se presentan los mapas matriciales obtenidos (también llamados capas de información) de cada una de las variables que intervienen en la determinación del número de curva, y la forma en que se superponen y establecen las relaciones necesarias para generar dicho mapa final.

3.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su aplicación para generar un mapa de estados erosivos

3.2.1. Marco teórico

Esta ecuación se desarrolló en EE. UU. hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA SCS; actualmente Natural Resources Conservation Service, NRCS).

La USLE expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea y año, t/ha/año).

La ecuación es la siguiente:

$$A=R*K*L*S*C*P$$

Donde:

-**A** es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por unidad de superficie por año (t/ha*año).

-**R** es el factor erosividad de la lluvia; es el producto acumulado para el período de interés (normalmente un año), con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias. Sus unidades son (Mj*mm/ha*año).

-**K** es el factor erosionabilidad del suelo; es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor erosividad de la lluvia, es decir Tn/ha por unidad de **R**, cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de una pendiente del 9% de gradiente y 22,1 m de longitud.

-**L** (adimensional) es el factor longitud de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.

-**S** (adimensional) es el factor gradiente de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con un determinado gradiente y el estándar de 9 %, a igualdad de los demás factores.

-**C** (adimensional) es el uso y gestión de suelos; es la relación de pérdidas por erosión entre un suelo con un determinado sistema de uso y gestión (rotación de cultivos, uso de los mismos, laboreo, productividad, gestión de residuos, etc.) y el mismo suelo puesto en las condiciones en que se definió K, a igualdad de los demás factores.

-**P** (adimensional) es el factor práctica mecánica de apoyo; la relación entre la pérdida de suelo con determinada mecánica (laboreo en contorno, en fajas, terrazas, etc.) y la que ocurre con laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

3.2.2. Esquema del proceso

En el presente trabajo vamos a obtener y analizar el riesgo de erosión de la cuenca aluvional Roca y el proceso que vamos a seguir para obtener cada uno de los factores que intervienen en la USLE es el siguiente:

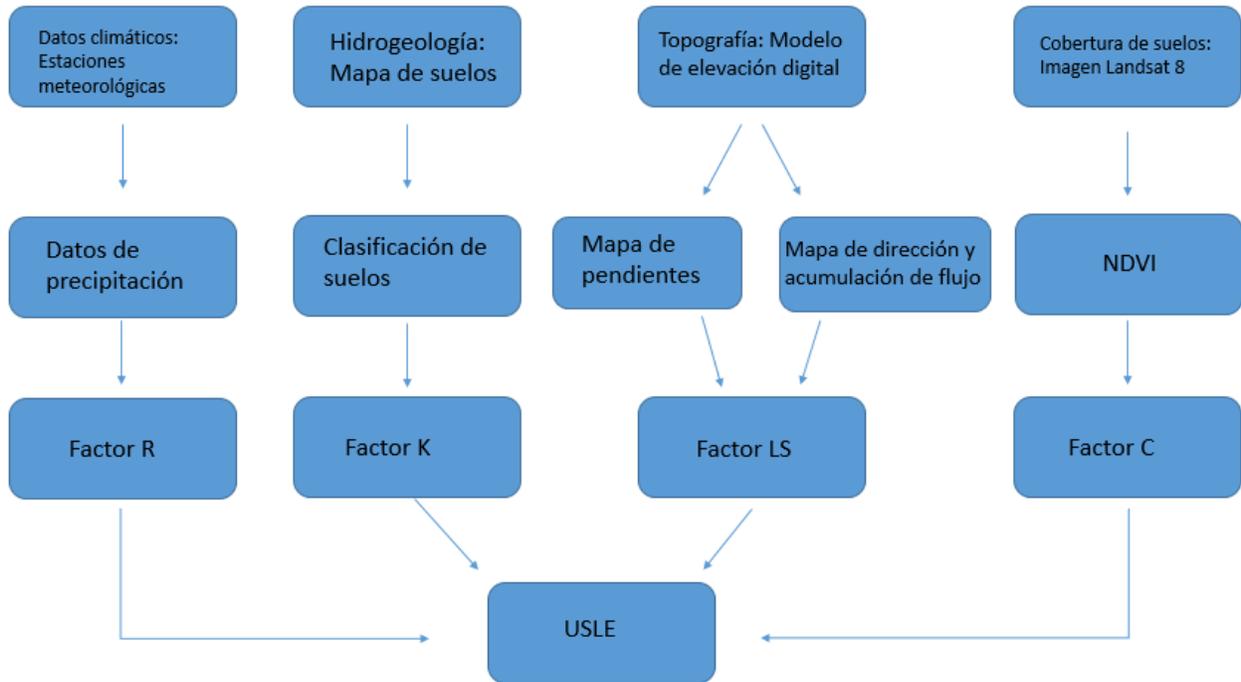
Factor R: contamos con los datos de precipitaciones de una serie de estaciones meteorológicas cercanas a nuestro ámbito de estudio. Calcularemos el Índice Modificado de Fournier (IMF) para estimar el factor de erosividad de la lluvia.

Factor K: disponemos del mapa de suelos de la República Argentina en formato shape file con el cual obtendremos la clasificación de los suelos de la zona de estudio y aplicando la fórmula propuesta por Williams 1995 obtendremos los valores de K.

Factor LS: a partir del DEM calcularemos de forma independiente la pendiente (factor S) y la longitud de ladera (factor L) para generar el factor de topografía LS.

Factor C: disponemos de una imagen Landsat 8 con la cual se generó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y posteriormente un análisis de regresión mediante el cual se obtienen los valores del Factor C.

Factor P: en nuestra zona no existen prácticas de manejo, de manera que asumiremos que el factor P es 1.



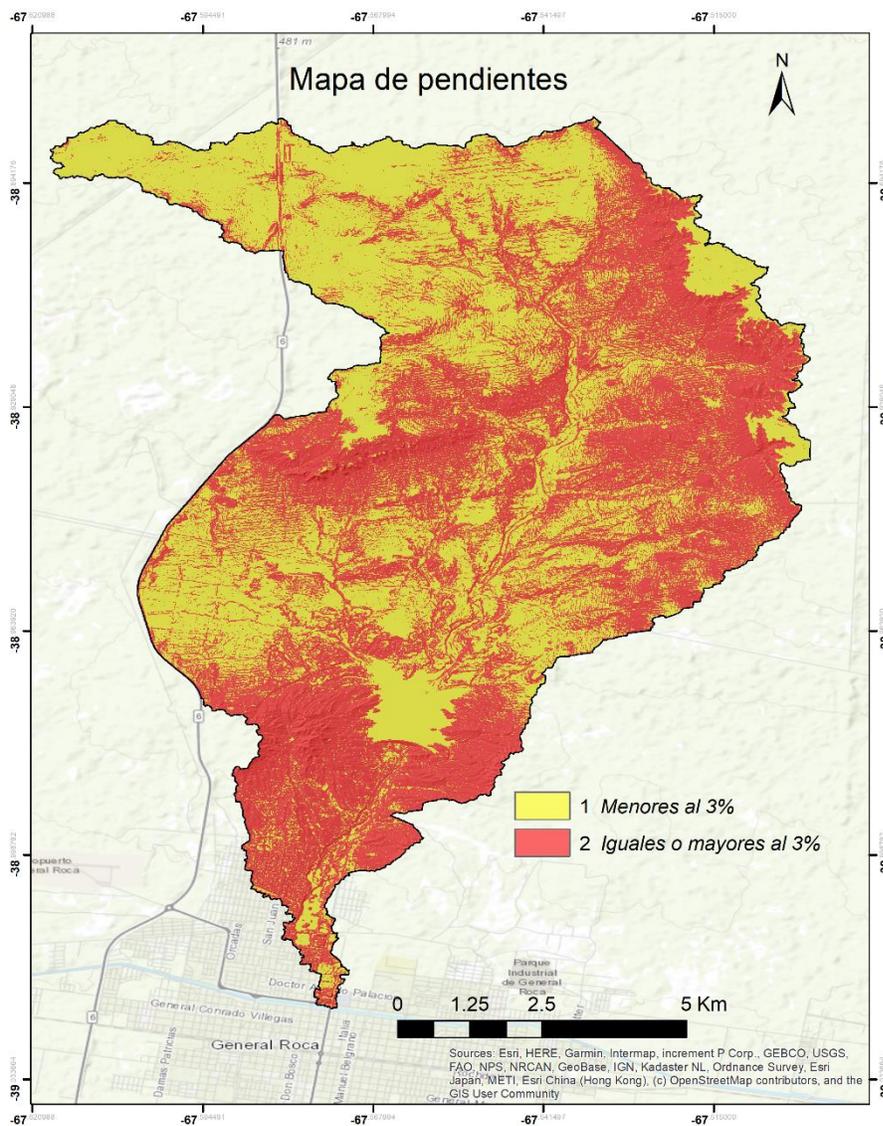
4. RESULTADOS

4.1. Número de Curva

4.1.1. Mapa de pendientes

Una de las variables necesarias para definir el número de curva es la pendiente, clasificada en dos grupos: menor del 3%, o mayor o igual al 3%.

Para la obtención del mapa de pendientes, se necesita un Modelo de Elevación Digital (DEM), en este caso se utilizó un Modelo de Elevación Digital con una resolución de 5



metros, descargado de la página del IGN (Instituto Geográfico Nacional) y mediante herramientas de análisis espacial se generaron las pendientes en porcentajes.

Una vez obtenido este mapa, se procede a reclasificarlo en los dos grupos mencionados anteriormente.

Se obtiene entonces un nuevo mapa (fig. 4.1.) con las siguientes categorías: 1 todas aquellas celdas del mapa de

Figura 4.1. Mapa de pendientes reclasificadas de la cuenca Roca.

pendiente menor al 3% y 2 para aquellas celdas con pendiente igual o mayor al 3%.

4.1.2. Características hidrológicas

La siguiente variable que se utiliza para la obtención del número de curva mediante las tablas propuestas por Témex (1978) es la característica hidrológica. Dicho autor la hace equivalente a la forma de cultivar la tierra. En este caso al no tener cultivos en la zona de estudio, se tomó en cuenta la vegetación.

Se divide en dos grupos: N, el cultivo sigue las curvas de nivel, y R, el cultivo sigue la línea de máxima pendiente. Los valores del número de curva asociados a cada tipo no se diferencian mucho, por lo que en muchos casos se considera que toda el área de estudio tiende a cultivarse de una misma manera, a no ser que se tengan datos específicos.

4.1.3. Mapa de tipo de suelos

Otra variable necesaria para determinar el número de curva es el mapa de tipos de suelo o Grupo Hidrológico de suelo. Este mapa debe estar clasificado en los cuatro grupos que establece el SCS. Para esto se disponía del mapa de Suelos de la República Argentina en formato Shape File, descargado desde la página web de GeoINTA, del cual se generó un recorte para acotarlo a la zona de estudio (fig. 4.2.). Se identificaron 2 tipos de suelos, Entisoles y Aridisoles; y un complejo indiferenciado localizado sobre el casco urbano de la ciudad. Se procedió a agruparlos según las clases A, B, C y D del SCS, según los criterios de las tablas recopiladas en MOPT (1992) y Porta et al. (1994), de la siguiente manera:

- Entisoles, constituidos por aluviones, y el complejo indiferenciado forman el grupo de suelos A.
- Aridisoles constituidos por suelos secos, con sales y yeso, forman el grupo D.

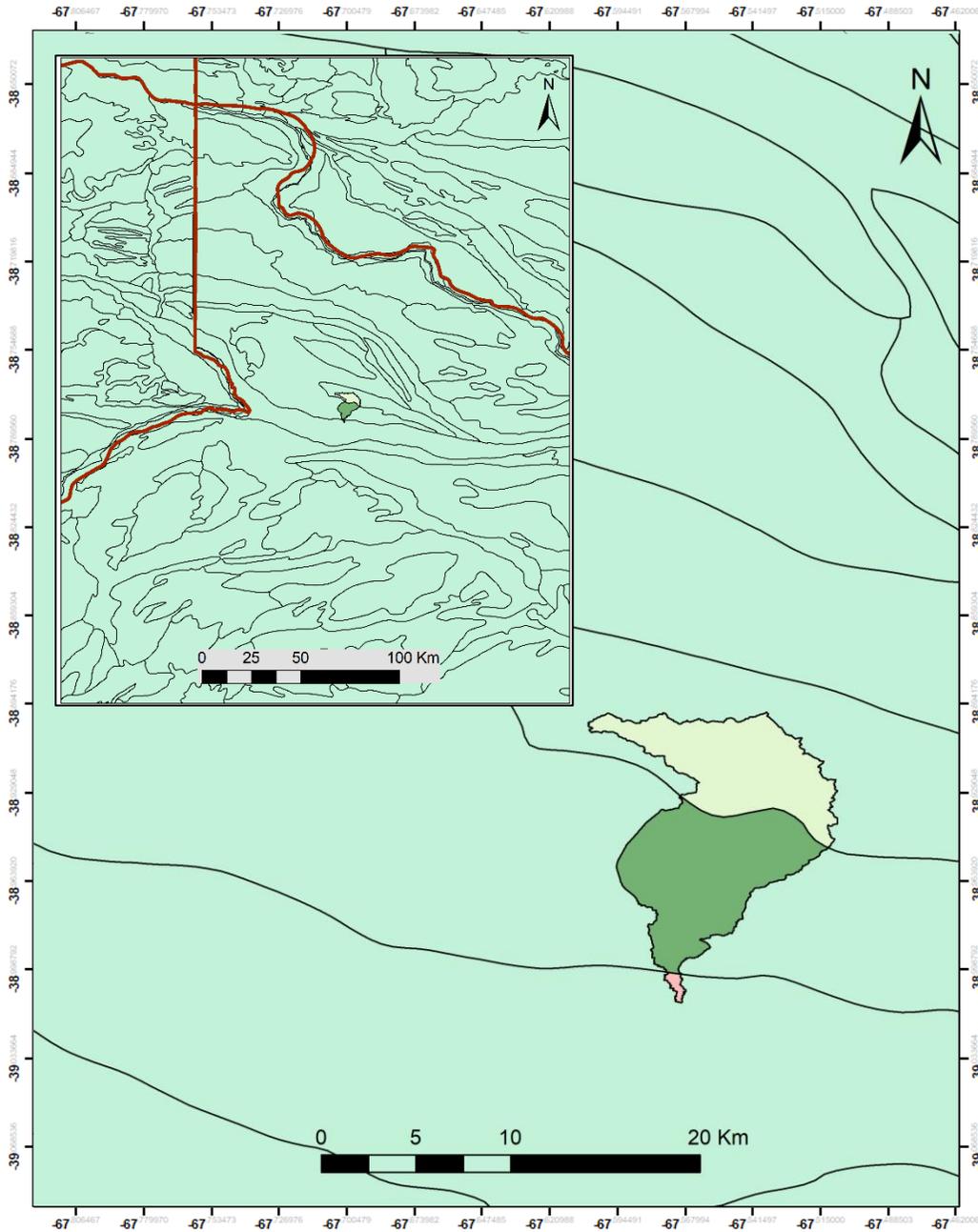


Figura 4.2. Mapa de suelos de la República Argentina y shape de la zona de estudio donde se identificaron 3 tipos de suelos: Aridisoles (zona norte), Entisoles (centro) y un complejo indiferenciado (extremo sur; casco urbano de la ciudad).

4.1.4. Mapa de uso de suelos

En muchos estudios la fuente de información de esta variable es el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del área. En este caso se utilizó el mapa de Cobertura del suelo de la

República Argentina en formato Shape File, descargado del geoportal IDESA (Infraestructura de datos espaciales de la Provincia de Salta). Al igual que la variable de Tipo de Suelos, se realizó el recorte de la zona de estudio para un mejor manejo de los datos (fig.

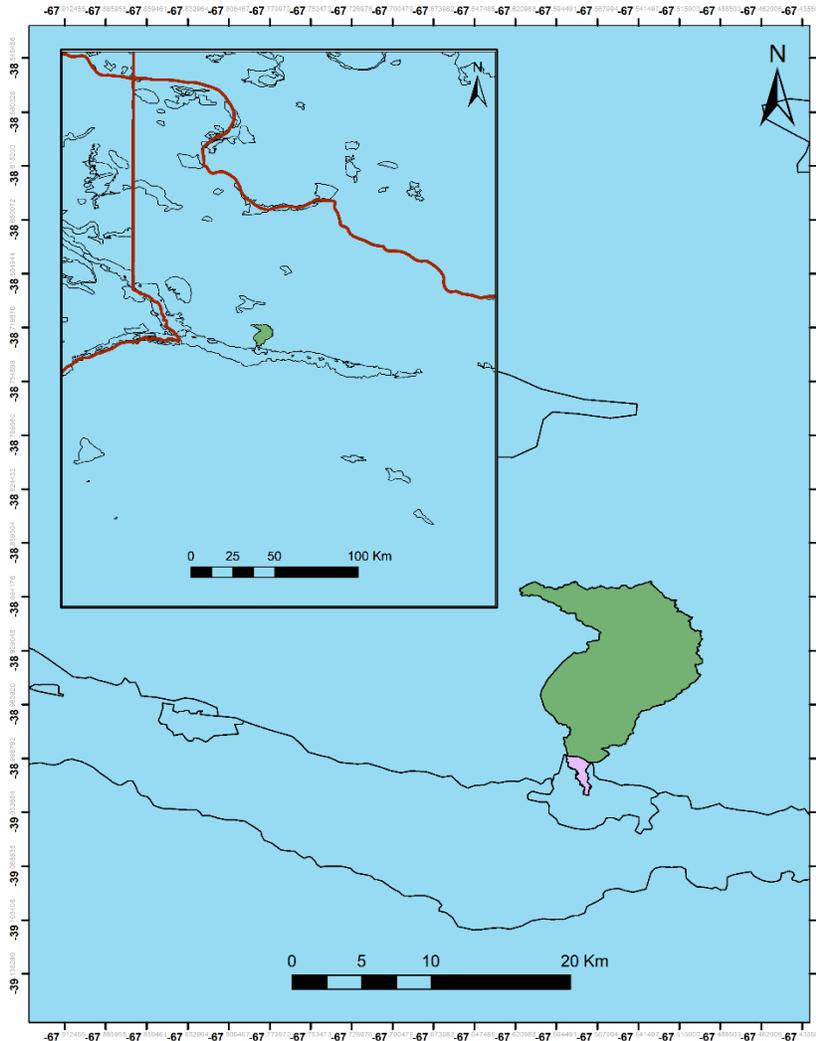


Figura 4.3. Mapa de cobertura de suelos de la República Argentina y shape del área de estudio donde se identificaron 2 tipos de cobertura: Arbustal abierto (centro y norte) y Áreas urbanas de densidad media (extremo sur).

4.3.). Dentro de ella se identificaron dos tipos de coberturas:

- Arbustal abierto: El pastizal se corresponde a los pastos de las zonas semiáridas y áridas, por lo que la cobertura vegetal no es muy elevada.

- Áreas urbanas de densidad media.

Luego de esto se buscó una equivalencia a cada tipo de cobertura dentro de la clasificación de usos del suelo propuestos por el SCS para determinar el número de curva.

La clasificación quedó de la siguiente manera:

- Arbustal abierto = Pradera pobre
- Áreas urbanas densidad media = Rocas impermeables

Cabe destacar que las escalas de los mapas disponibles de Uso y cobertura de suelos no son las más adecuadas para la escala de trabajo de la cuenca.

4.1.5. Mapa del Número de Curva

La metodología seguida se basa en el uso de número primos, debido a sus características, el producto de ellos siempre dará un número distinto. Por lo tanto a cada una de las variables que interviene en la obtención del número de curva se le asignó un número primo (Tabla 4.1.), menos a las Características Hidrológicas, ya que se consideró un único valor. Los mapas de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores (fig. 4.4.), excepto el de pendientes, ya que sus valores coincidían con los números primos 1 y 2. De esta manera, si se multiplican los mapas de usos de suelo, pendiente y tipos de suelo, dará un resultado diferente por cada combinación de tres números primos (Tabla 4.2.).

CARACTERÍSTICA	NUMERO PRIMO
Pendiente < 3 %	1
Pendiente >= 3 %	2
Litología A	3
Litología B	5
Litología C	7
Litología D	11
Barbench R	13
Cultivos en hilera R	17
Cereales de invierno R	19
Rotación de cultivos pobre R	23
Rotación de cultivos densos R	29
Predera pobre	31
Predera media	41
Predera muy buena	43
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	47
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	53
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	59
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy clara	61
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) clara	67
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) media	71
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) espesa	73
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy espesa	79
Rocas permeables	83
Rocas impermeables	89

Tabla 4.1. Números primos asignados a cada variable de pendiente, tipo de suelo y usos de suelo.

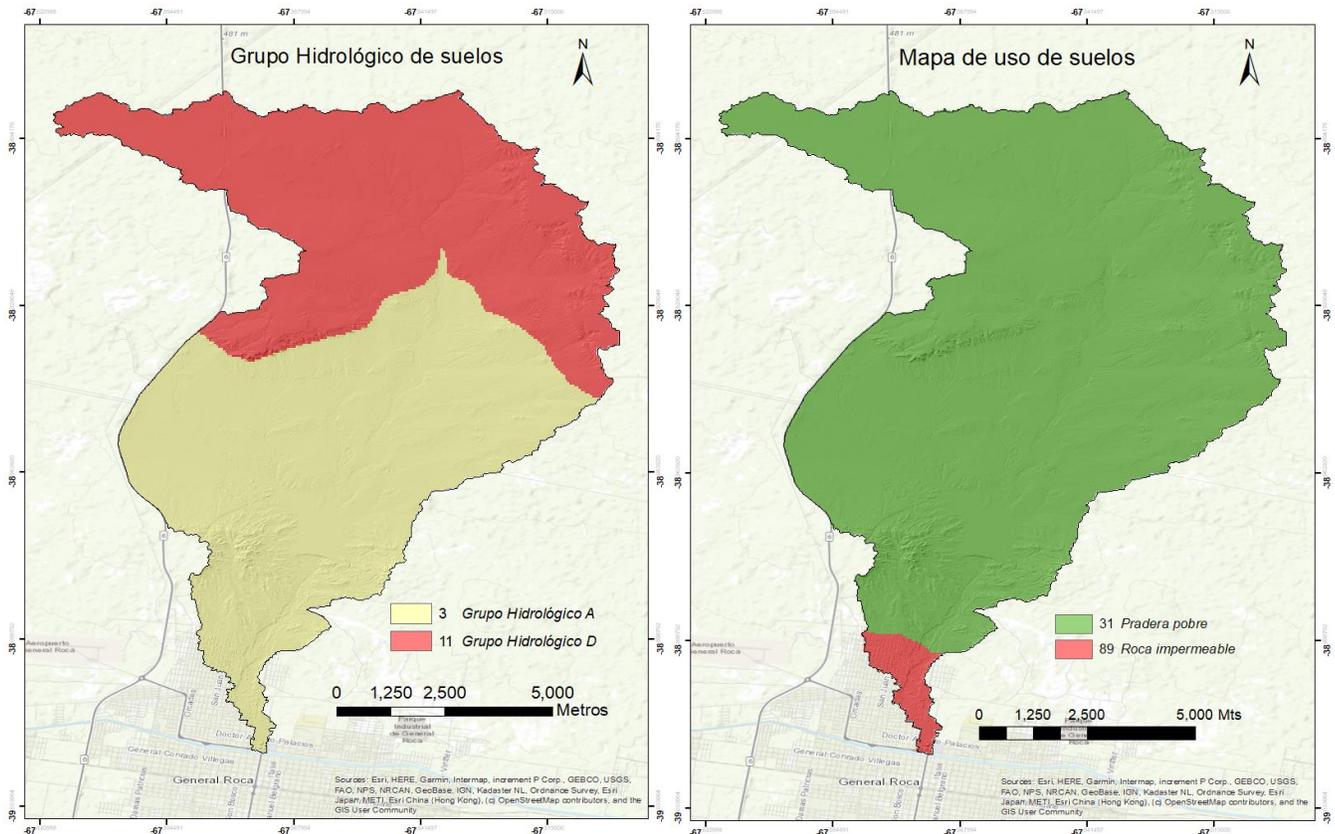


Figura 4.4. Mapa de suelos reclasificado según las clases A, B, C y D del SCS y Mapa de uso de suelos reclasificado según lo propuesto por el SCS y ambos con sus números primos correspondientes.

De esta manera, conociendo el resultado del producto se puede saber de qué características de uso, tipo de suelo y de pendiente se tratan y se podrá encontrar su número de curva (Tabla 4.2.). Estos valores del número curva pueden verse modificados según sean las condiciones de humedad del suelo anteriores al evento estudiado. Los valores presentados en la Tabla 3.1 corresponden a unas características de humedad medias.

USO DE LA TIERRA	Pendiente	Prod. N° primos				CN			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Barbecho R	≥ 3	78	130	182	286	77	68	89	93
Barbecho R	< 3	39	65	91	143	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	≥ 3	102	170	238	374	69	79	86	89
Cultivos en hilera R	< 3	51	85	119	187	64	73	78	82

Cereales de invierno R	>= 3	114	190	266	418	63	75	83	86
Cererales de invierno R	< 3	57	95	133	209	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	>= 3	138	230	322	506	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres R	< 3	69	115	161	253	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	>= 3	174	290	406	638	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos R	< 3	87	145	203	319	52	67	76	79
Pradera pobre	>= 3	186	310	434	682	68	78	86	89
Pradera media	>= 3	246	410	574	902	49	69	78	85
Pradera muy buena	>= 3	258	430	602	946	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	93	155	217	341	46	67	81	88
Pradera media	< 3	123	205	287	451	39	59	75	83
Pradera muy buena	< 3	129	215	301	473	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	>= 3	282	470	658	1034	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	>= 3	318	530	742	1166	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	>= 3	354	590	826	1298	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	141	235	329	517	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	159	265	371	583	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	177	295	413	649	25	50	67	76
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy clara		183	305	427	671	56	75	86	91
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) clara		201	335	469	737	46	68	78	83
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) media		213	355	497	781	40	60	69	76
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) espesa		219	365	511	803	36	52	62	69
Masa forestal (bosques; monte bajo ...) muy espesa		237	395	553	869	29	44	54	60
Rocas permeables	>= 3	498	830	1162	1826	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	249	415	581	913	91	91	91	91
Rocas impermeables	>= 3	534	890	1246	1958	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	267	445	623	979	93	93	93	93

Tabla 4.2. Producto de número primos y equivalente número de curva.

Cada clase de las variables de pendiente, usos y tipos de suelo, se reclasificó con una tabla de números primos (Tabla 4.1.), y se multiplicaron las tres capas. El mapa resultante (4.5.a) se reclasificó según la correspondencia entre el producto de números primos y el valor del número de curva asociado, originando el mapa del número de curva (4.5.b).

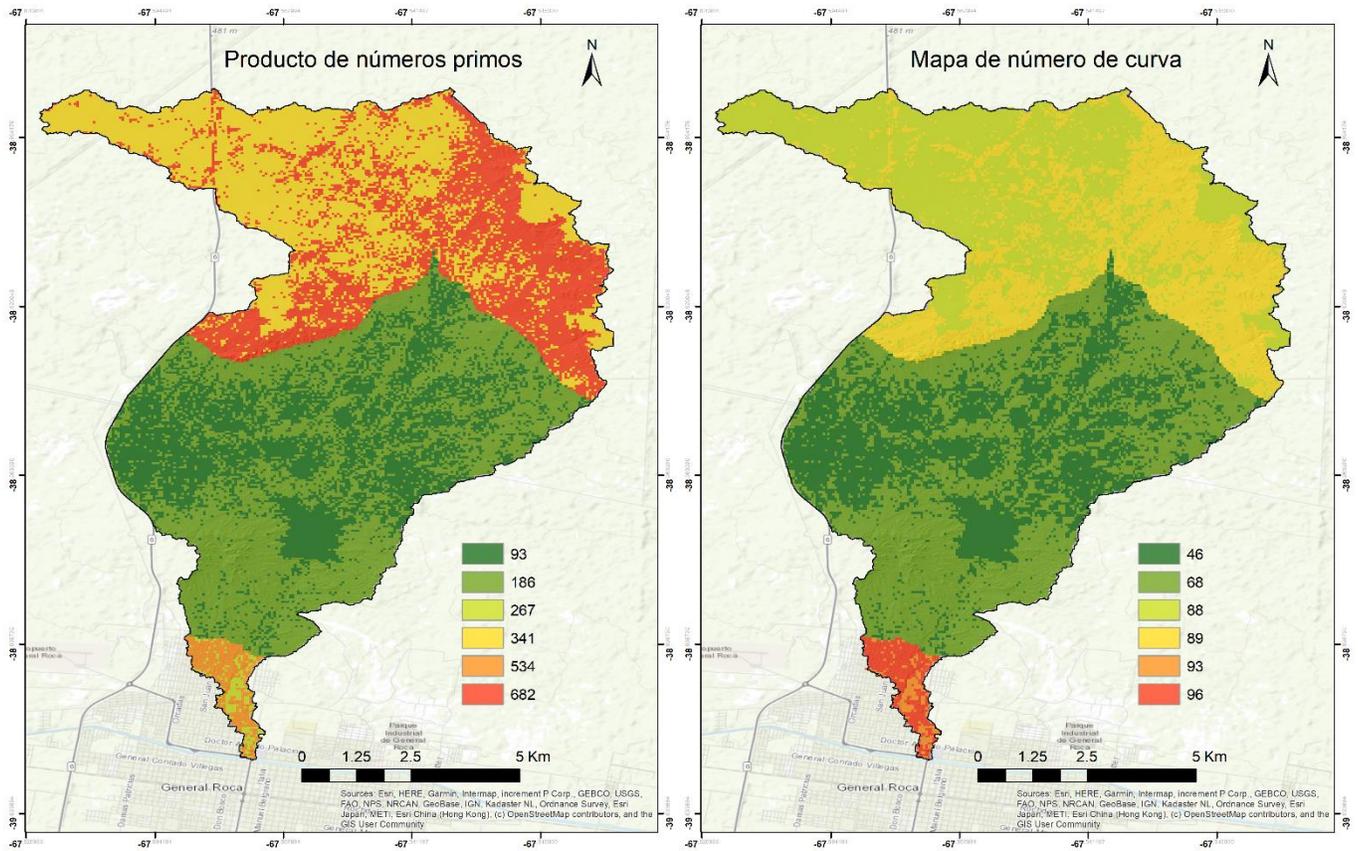


Figura 4.5.a) Mapa producto de número primos. b) Mapa de número de curva. (CN).

4.2. Estimación de parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y aplicación

4.2.1. Factor R

La Erosividad de la lluvia se puede definir como su agresividad sobre el suelo. Representa la energía con que las gotas de lluvia que caen a una determinada intensidad pueden romper los agregados superficiales en partículas de tamaño transportable.

El índice propuesto por USLE para cuantificar este efecto erosivo de las lluvias debido a su intensidad presenta la siguiente expresión:

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30}$$

Donde:

-R: representa el Índice de Erosividad de la lluvia.

-n: es el número de aguaceros del periodo considerado.

-I30: es la intensidad máxima en 30 minutos para cada evento [mm/h].

-E: es la energía cinética del aguacero que se estima mediante las siguientes fórmulas [MJ/ha]:

- Si $I \leq 76$ mm/h $\rightarrow E = 0.119 + 0.0873 \log I$
- Si $I > 76$ mm/h $\rightarrow E = 0.283$

Para realizar estos cálculos se debe disponer de la información muy detallada de las precipitaciones ya que se debe contar con un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante los diferentes aguaceros. Por este motivo diversos autores han intentado relacionar el factor R con parámetros más fáciles de obtener y calcular. Con este propósito, Fournier (1960) estableció el índice de agresividad climática o Índice de Fournier (IF) cuyo cálculo se realiza a partir de los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas representativas, según la siguiente ecuación:

$$IF = \frac{P_{max}^2}{P}$$

Donde:

-IF: Índice de agresividad climática

- P_{max} : Precipitación del mes más lluvioso (mm)

-P: Precipitación media anual (mm)

Sin embargo, éste índice únicamente considera el mes de mayor precipitación por lo que debe ser utilizado con cautela, especialmente en aquellas zonas que presentan un régimen pluvial con más de un pico mensual de precipitación, o donde los valores pluviométricos son en general elevados.

Por este motivo la FAO en 1980 propone una modificación del Índice de Fournier para considerar no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto

de los meses. Este Índice de Modificado de Fournier (IMF) caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula de la siguiente forma:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde:

- IMF: Índice de agresividad climática
- P_i : Precipitación media mensual (mm)
- P_t : Precipitación media anual (mm)

Para este trabajo se utilizó la segunda ecuación ya que considera la media mensual de todos los meses del año.

Para el cálculo se dispuso de la información de precipitaciones de cuatro estaciones pluviométricas para un periodo aproximado de 10 años en cada una. Las estaciones que fueron analizadas son las siguientes (tabla 4.3.):

X	Y	Sitio	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual	Periodo
623352,5	5679483,2	G.Roca	20,10	14,70	21,30	19,00	18,50	23,00	17,40	11,10	25,50	22,30	12,10	14,20	206,10	1997,2011
615430,8	80528,3	Allen	16,72	14,81	11,18	18,14	24,98	10,44	16,37	5,99	19,64	30,50	10,19	5,29	184,25	2006,2018
580779,1	5700042,9	C. Saltos	12,40	13,13	8,14	28,45	22,58	8,01	15,41	6,94	16,10	53,03	14,00	5,70	203,88	2012,2019
663710,4	5667551,7	Regina	28,40	17,51	24,71	28,78	22,56	11,07	18,87	10,58	17,33	38,98	18,11	12,80	249,69	2011,2019

Tabla 4.3. Estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis, con sus promedios mensuales y anuales para el periodo descripto.

- General Roca: Estación meteorológica ubicada en la planta potabilizadora de la ciudad, cuyo procesamiento estuvo a cargo del DPA.
- Contralmirante M. Guerrico, Allen: Estación meteorológica automática EEA-INTA Alto Valle.
- Cinco Saltos: Estación meteorológica automática EEA-INTA Alto Valle, ubicada en la Facultad de Ciencias Agrarias – UNCO.
- Villa Regina: Estación meteorológica automática EEA INTA Alto Valle.

Para que el análisis regional sea consistente solo se utilizó aquellas estaciones donde el periodo de muestreo se encuentre dentro de un mismo rango de tiempo. Para cada estación se dispuso de las precipitaciones mensuales de cada año, por lo tanto se calcularon en Excel los promedios mensuales y anuales ilustrados en la tabla 4.3.

Ya con estos datos se procede a calcular el índice de agresividad climática, es decir nuestro Factor R para la ecuación de perdida de suelos (Tabla 4.4).

Sitio	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Factor R	Periodo
Allen	1,45	0,76	0,62	3,06	2,64	0,44	1,59	0,19	1,37	7,28	0,91	0,19	20,51	2011_2019
C. Saltos	0,75	0,84	0,32	3,97	2,50	0,31	1,17	0,24	1,27	13,79	0,96	0,16	26,29	2012_2019
Regina	3,23	1,23	2,45	3,32	2,04	0,49	1,43	0,45	1,20	6,08	1,31	0,66	23,88	2011_2019

Tabla 4.4. Factor R calculado para cada estación meteorológica.

Una vez obtenido el Factor R se procedió a volcar las ubicaciones de dichas estaciones en el entorno SIG y de ésta manera poder visualizar la distribución espacial de las mismas y determinar un mapa de distribución del Factor R (figura 4.6.). El siguiente paso es interpolar las estaciones pluviométricas para generar un raster del Factor R (fig. 4.7.). Ya generado el raster extraemos solamente la zona de estudio (fig. 4.8.).

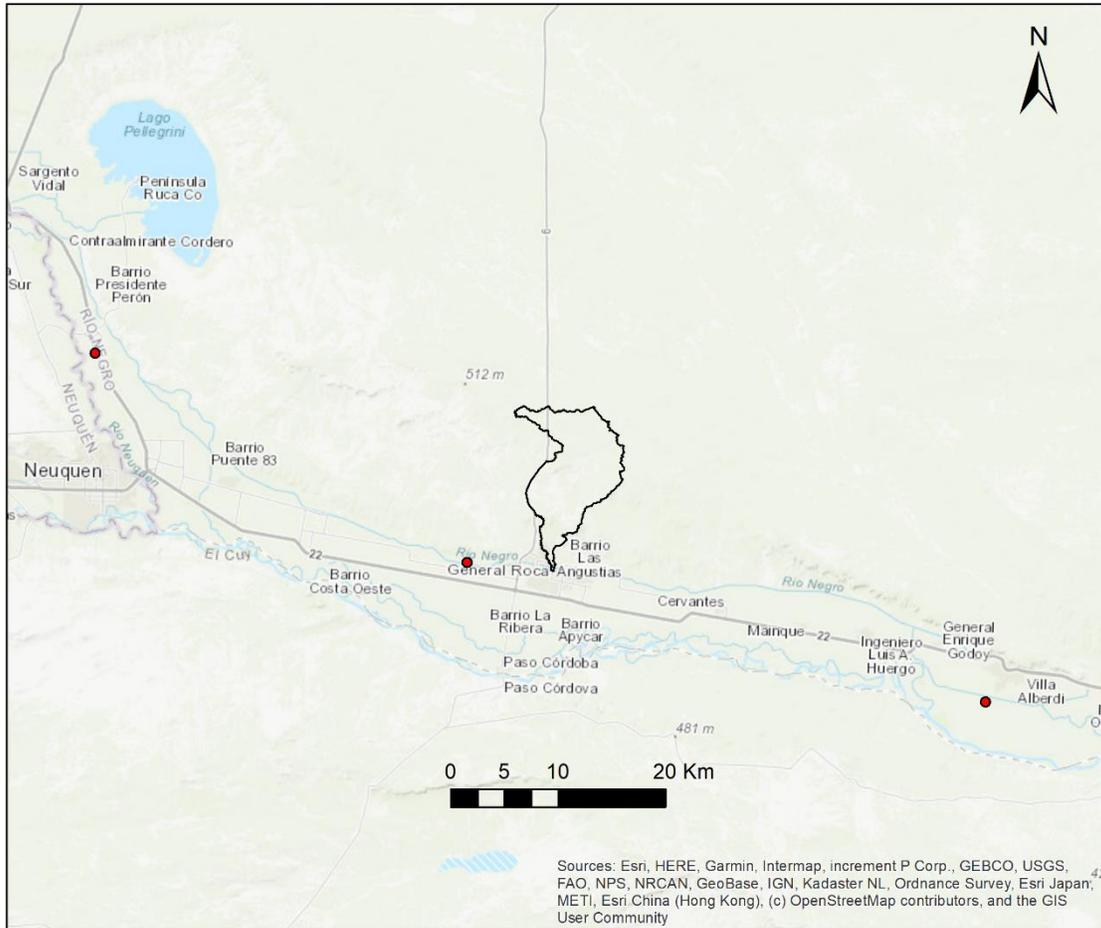


Figura 4.6. Ubicación de las estaciones pluviométricas (puntos rojos) y zona de estudio.

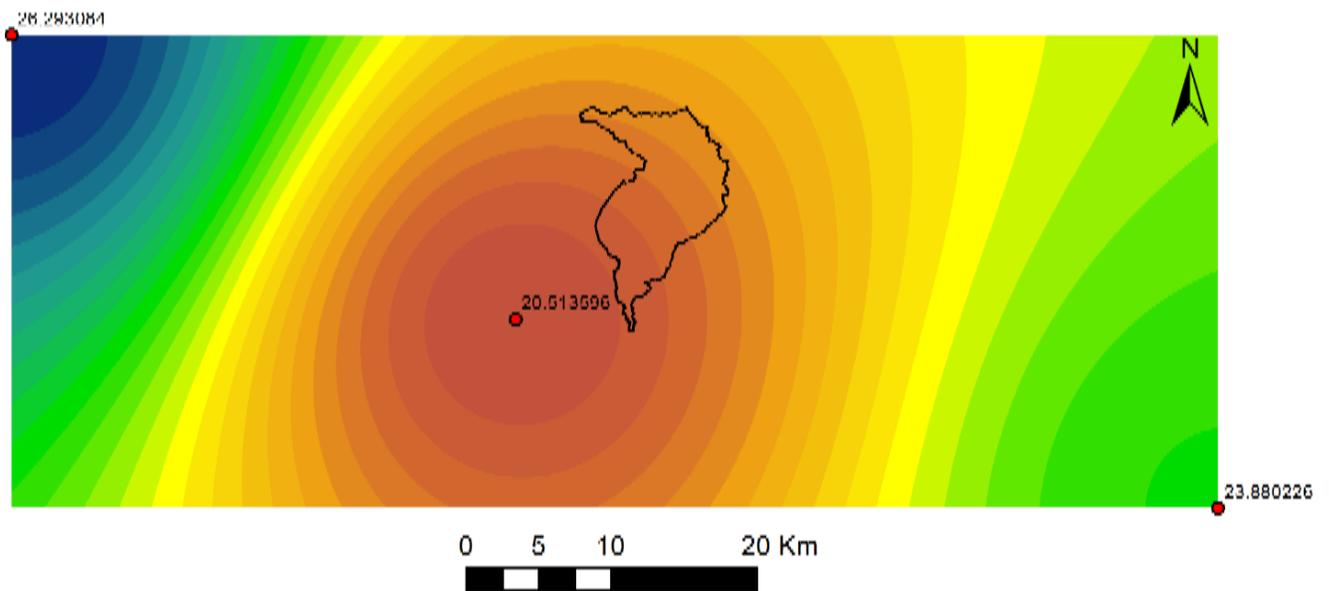


Figura 4.7. Interpolación del Factor R entre las estaciones pluviométricas analizadas.

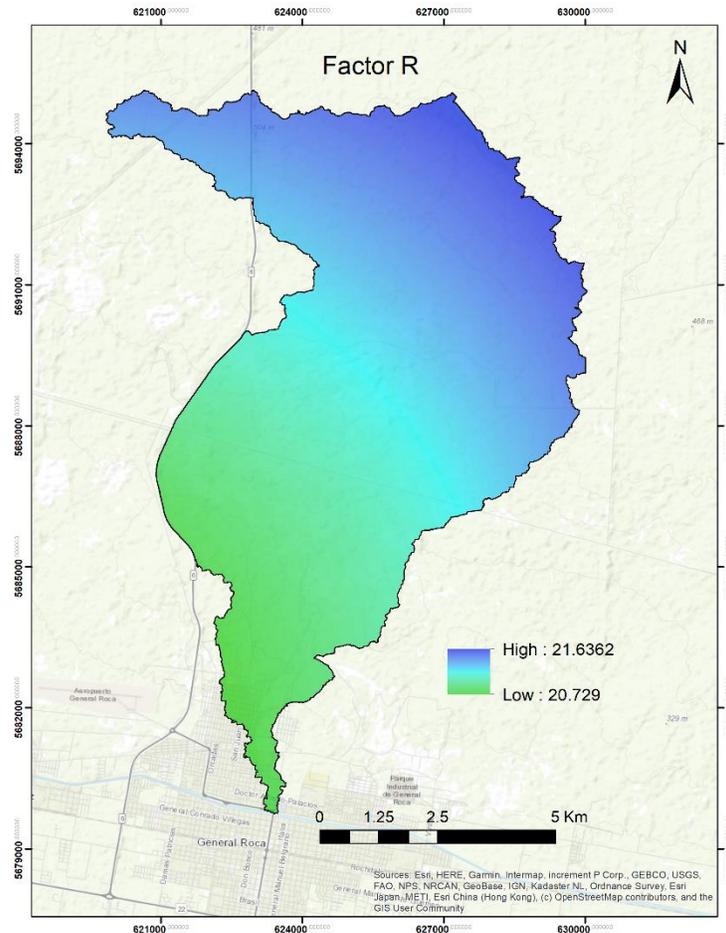


Figura 4.8. Factor R para la zona de estudio.

4.2.2. Factor K

El factor K representa tanto la susceptibilidad del suelo a la erosión como la tasa de escorrentía, medida bajo las condiciones de una parcela estándar unitaria.

Para el cálculo del Factor K partimos de la fórmula que propone Williams (1995):

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand}$$

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp [3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right)$$

Donde:

K: Factor de erosionabilidad del suelo

m_s : contenido de arena en %

m_{silt} : contenido de limo en %

m_c : contenido de arcilla en %

orgC: contenido de carbono orgánico en %

Para la obtención de los datos descriptos se dispuso del mapa de suelos de la República Argentina en formato Shape file (fig. 4.2.), en el cual se identificaron dentro de la zona de estudio 2 tipos de suelos, que se presentan en la tabla 4.5.

Suelo	Textura	% arena	% limo	% arcilla	% C orgánico
Aridisol	Franco arenosa	65	25	10	0,4
Entisol	Arcillo limosa	5	50	45	0,4

Tabla 4.5. Tipos de suelos y % de arena, limo, arcilla y C orgánico.

Identificados los datos necesarios se procede a ingresarlos en la fórmula para calcular en Factor K para cada tipo de suelo (tabla 4.6).

Suelo	Textura	F_{csand}	F_{cl-si}	F_{orgc}	F_{hisand}	K_{usle}
Aridisol	Franco arenosa	0,286	0,964	0,992	0,981	0,268
Entisol	Arcillo limosa	0,481	0,710	0,992	1,000	0,339

Tabla 4.6. Valor del Factor K para cada tipo de suelo.

Posteriormente en ArcGis se agregan estos valores de K a la tabla de atributos del extracto del mapa de suelos de la República Argentina. Con estos datos elaboramos el raster del Factor K (fig. 4.9.).

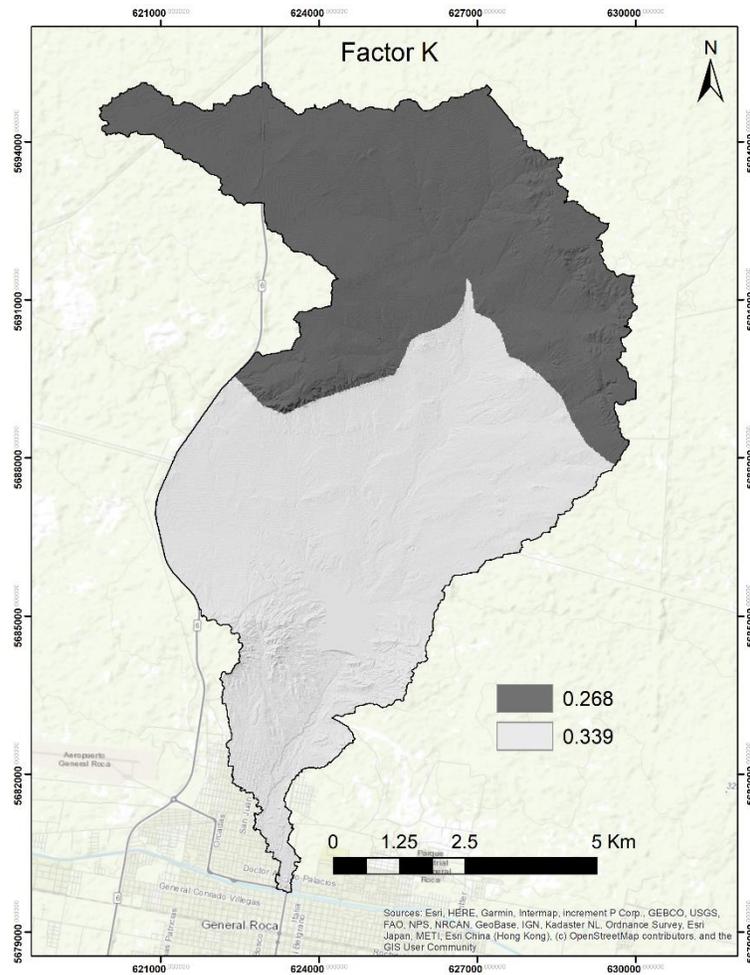


Figura 4.9. Factor K para la zona de estudio.

4.2.3. Factor LS

El factor de topografía LS es el producto de dos factores: El Factor L que caracteriza a la longitud y el Factor S que caracteriza a la pendiente. Es la distancia horizontal desde el punto más alto, donde se origina el flujo superficial al punto más bajo donde comienza la deposición que fluye por escorrentía a un canal.

Para calcular el Factor L, Foster en 1977, propone la siguiente fórmula:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Podemos observar el parámetro λ (longitud en el tramo que se analiza), el parámetro m que depende de β que es la pendiente que se tiene en el sitio analizado. Teniendo en cuenta que el terreno es irregular, en función de la dirección del flujo podríamos establecer en un mismo sitio una variedad de pendientes.

Con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el 2008 Velazquez, sobre la base de los estudios de Desmet y Gover, propone la siguiente fórmula utilizada en este trabajo.

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m}$$

Donde:

- A es la acumulación del flujo a nivel del pixel.
- D es el tamaño del pixel.
- x es el factor de corrección de forma (x=1 para sistemas pixelados)

Para el cálculo del factor S se utilizara la siguiente fórmula propuesta por McCool (1987).

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Donde:

- β es la pendiente a nivel del pixel (ya que ArcGis no reconoce grados decimales sino radianes, debemos multiplicar la pendiente en grados por 0,01745).

Entonces con la ayuda de ArcGis realizamos los siguientes pasos:

- 1- Establecer un mapa de pendientes para determinar β .
- 2- Calcular el parámetro F en función de la pendiente.
- 3- Calcular el parámetro m .
- 4- Determinar D.
- 5- Calcular acumulación del flujo.

6- Con los datos anteriores elaborar el raster L mediante la aplicación de la fórmula propuesta por Velazquez (2008).

1. Para la elaboración del mapa de pendientes lo primero que hacemos es rellenar los sumideros del DEM con las herramientas de hidrología en el análisis espacial de ArcGis.

Un sumidero es una celda o un conjunto de celdas conectadas espacialmente a la que no se le puede asignar una dirección de flujo, por lo tanto para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos hay que realizar el relleno de sumideros.

A partir del nuevo raster corregido vamos a elaborar el mapa de pendientes en grados (fig. 4.10).

2. Para calcular en parámetro F y su raster correspondiente utilizamos la calculadora raster. Esta es una opción que nos permite generar rasters a partir de operaciones matemáticas. Ingresamos la fórmula del parámetro F y obtenemos su raster (fig. 4.11.a).

3. Con la ayuda del parámetro anterior y con la misma opción en la calculadora raster generamos el raster del parámetro m (fig. 4.11.b).

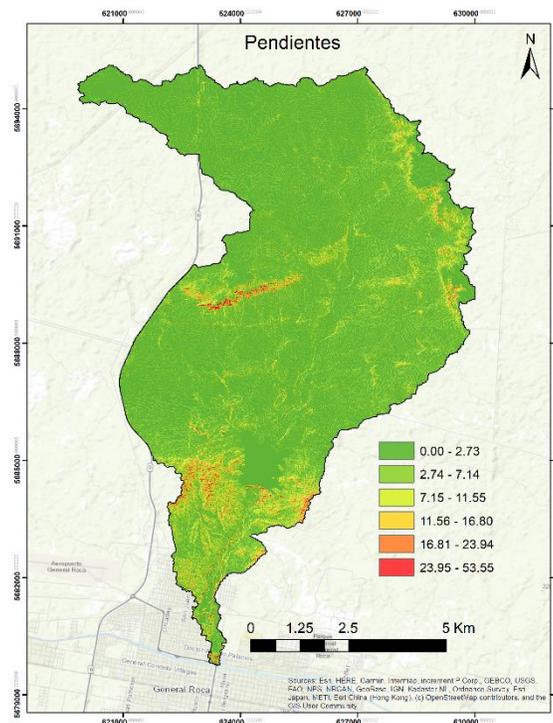


Figura 4.10. Mapa de pendientes (Beta).

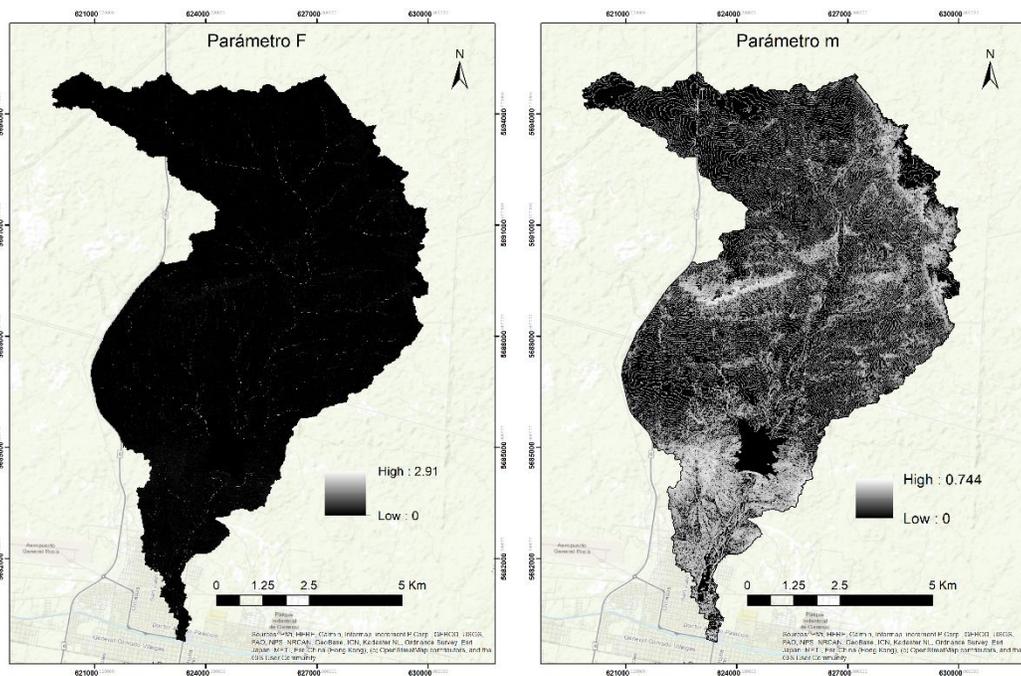


Figura 4.11. a) parámetro F. b) parámetro m.

4. El tamaño del pixel (D) lo determinamos como indicamos en un principio en base al tamaño de pixel de DEM, en este caso 5 metros.

5. Para calcular la acumulación del flujo, primero a partir del DEM corregido vamos a calcular la dirección del flujo utilizando las herramientas de hidrología dentro de las herramientas de análisis espacial. De esta manera se obtiene la dirección que seguirá el flujo y se le asigna un valor concreto en función de la dirección que presenta. Los valores del mapa (figura 4.12.a) representan las 8 direcciones posibles que puede tomar una celda.

A partir del raster de dirección del flujo vamos a calcular la acumulación del flujo, herramienta que se encuentra también dentro del apartado de hidrología. El mapa de acumulación de flujo permite conocer cuáles son las celdas en las que se acumula el agua al fluir desde las celdas con mayor valor de altitud (figura 4.12.b).

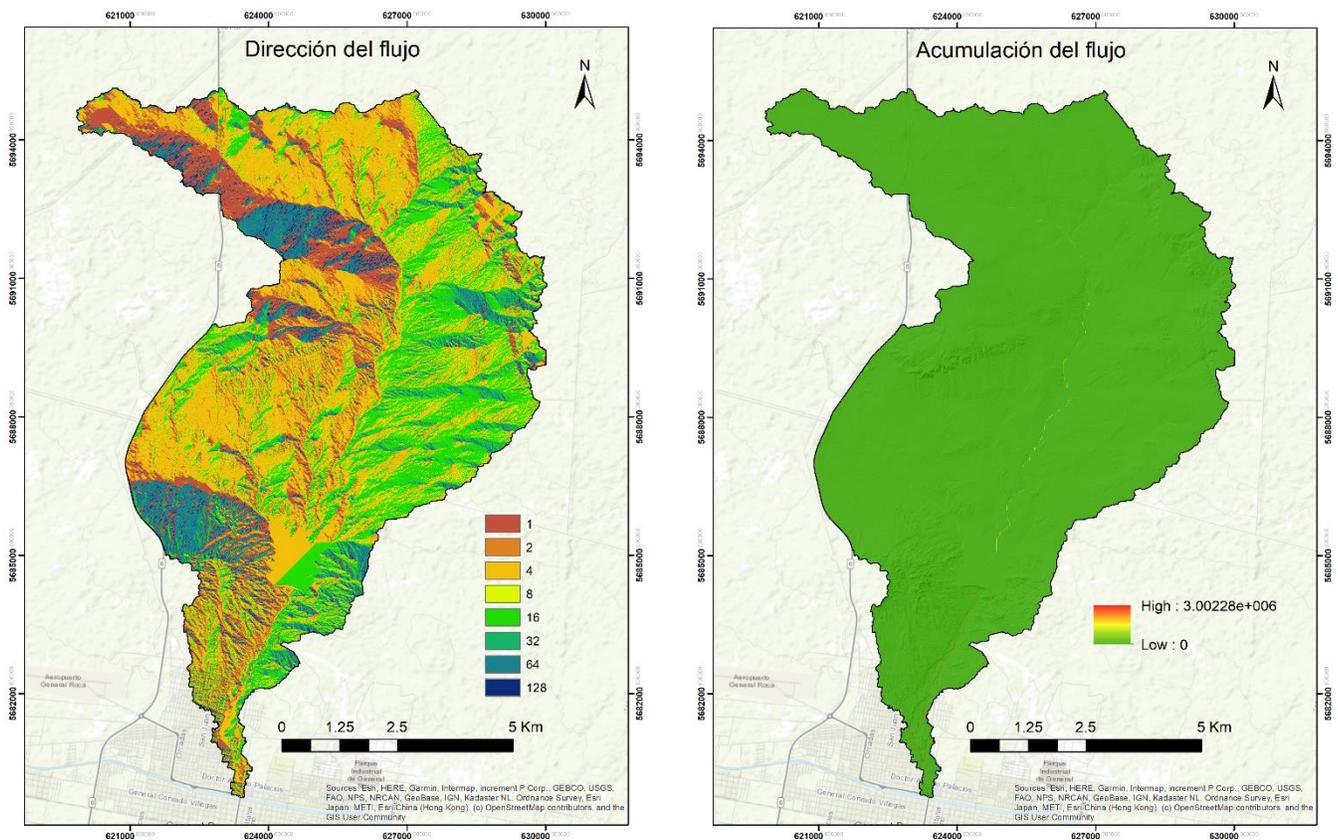


Figura 4.12.a) Mapa de dirección del flujo. b) Mapa de acumulación del flujo.

6. Ya tenemos todos los parámetros necesarios para calcular el factor L ingresando la fórmula en la calculadora raster.

Una vez generado en raster del Factor L (fig. 4.12.a), pasamos a calcular en Factor S (fig. 4.12.b) mediante la fórmula propuesta por McCool (1987).

En ésta fórmula se utiliza la expresión condicionante, en la cual si la tangente de la pendiente es menor a 0,09 el factor se calcula como 10,8 por el seno de la pendiente más 0,03; de lo contrario si la tangente de la pendiente es igual o mayor a 0,09 el factor se calcula como 16,8 por el seno de la pendiente menos 0,5.

Finalmente para obtener el factor de topografía multiplicamos los dos factores obtenidos (L y S) y así elaboramos nuestro raster del Factor LS (fig. 4.13).

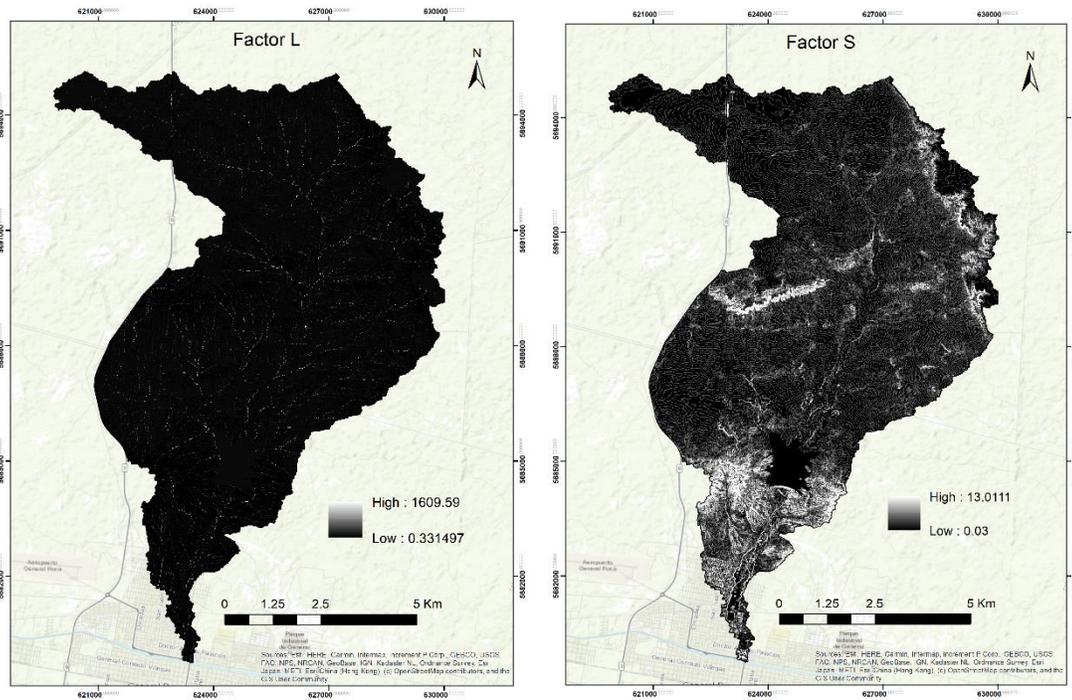


Figura 4.12.a) Mapas del factor L. b) Mapa del Factor S.

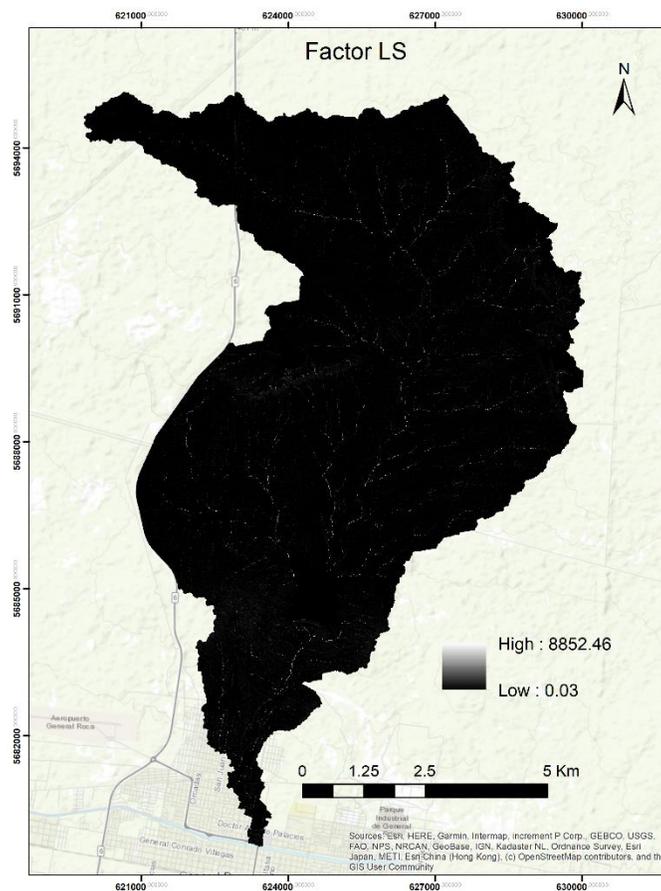


Figura 4.13. Mapa del Factor LS.

4.2.4. Factor C

Para el cálculo del factor C de cobertura vegetal, se generó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por su acrónimo en inglés) a partir de las bandas 4 y 5 de una imagen Landsat 8 (LC08_L1TP_230087_20200512_20200526_01_T1, descargada del servidor de Land Viewer: <https://eos.com/landviewer/>). Un NDVI se utiliza sobre todo para medir el vigor de la biomasa vegetal en estudios relacionados a comportamientos de cultivos. Su uso difundido se da especialmente por la sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación (entre -1+1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. En este estudio se utilizó el NDVI para hacer un análisis de regresión mediante el cual se obtienen los valores del Factor C, que en este estudio representa cobertura vegetal en vez de manejo de cultivos.

Las cifras originales del modelo USLE para “C” se expresan en un rango de 0-1, donde los valores cercanos a “0” corresponden a suelo cubierto, y los cercanos a “1” representan suelo desnudo.

El NDVI identifica áreas vegetadas y no vegetadas en base a la reflectancia de las plantas en las regiones rojo e infrarrojo del espectro electromagnético y sus valores van entre -1 a +1, siendo los valores negativos los que denotan cuerpos de agua, nieve, suelo desnudo o zonas urbanas, en tanto que los valores positivos o cercanos a la unidad asemejan áreas vegetadas.

Para el NDVI se utiliza la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

Donde:

- NIR: Banda infrarroja (Banda 5 en Landsat 8).
- red: Banda roja (Banda 4 en Landsat 8).

En ArcGis existe la opción de calcular el NDVI de forma automática, pero es importante revisar antes que nuestra imagen Landsat 8 las bandas correspondan a las descritas en la fórmula anterior.

Tras este paso, se aplicó una operación condicional al NDVI mediante la calculadora raster para dejar el rango de valores del índice en positivo (entre 0 y 1). Esta operación se expresa de la siguiente manera:

$$NDVI(\text{valores rectificados}) = ("NDVI", 0, "NDVI", "value \leq 0")$$

Luego se aplica la ecuación de regresión propuesta por Patil y Sharma (2013) y Karaburun (2010) utilizando el NDVI corregido (cuyo rango va 0 y 0.31).

$$Factor\ C = 1.02 - 1,21 * NDVI$$

El resultado de esto arroja un rango valores entre 0.63 y 1.02, se ejecutó una última operación condicionante para que el rango de valores coincidiera con el corresponde al factor C que ronda entre 0 y 1. Esta operación viene expresada de la siguiente forma:

$$Factor\ C\ final = ("factor\ C", 1, "factor\ C", "value \geq 1")$$

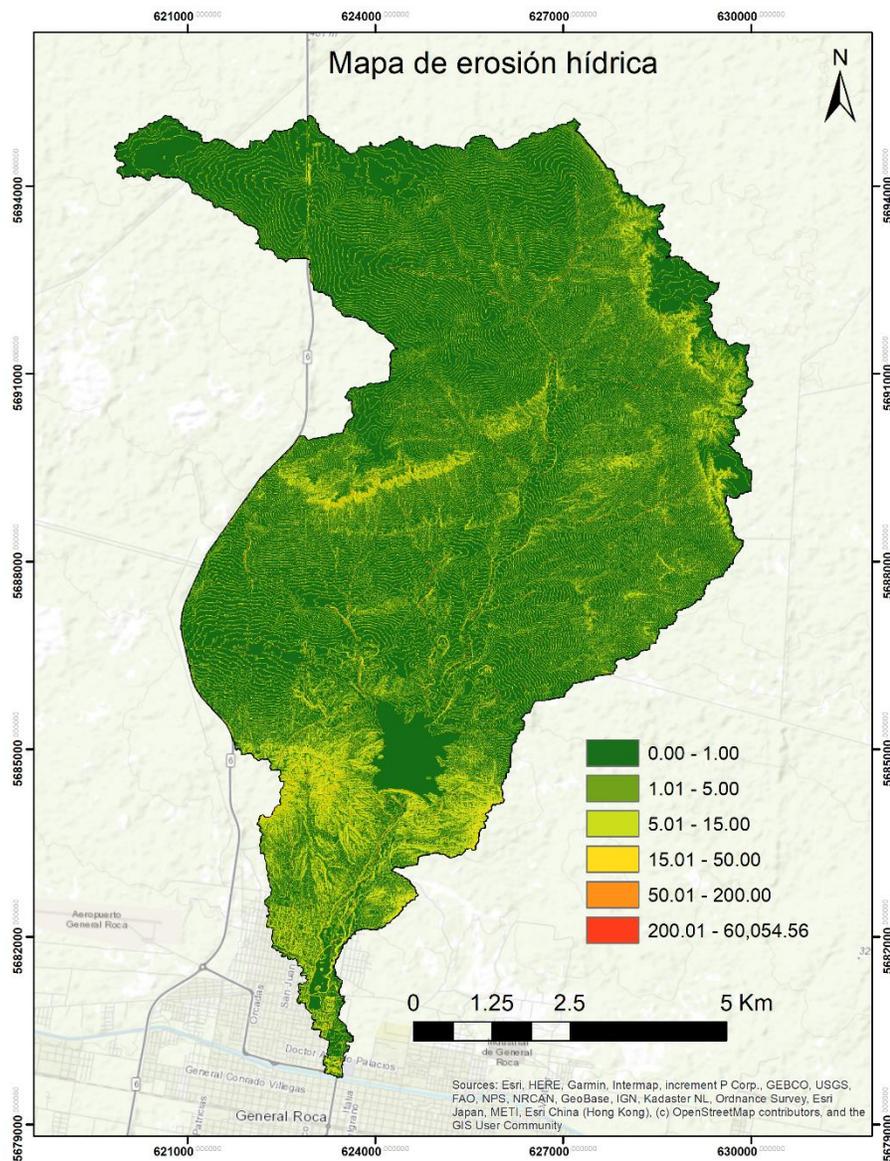


Figura 4.15. Mapa de Erosión Hídrica del suelo

Los valores del raster de erosión hídrica fueron reclasificados según lo propuesto por la FAO para los diferentes tipos de erosión, como se muestra en la tabla 4.7.

Nivel	Pérdida de suelo (Tn/ha/año)	Tipo de erosión
1	< 0,5	Normal
2	0,5 - 5	Ligera
3	5 - 15	Moderada
4	15 - 50	Severa
5	50 - 200	Muy severa
6	> 200	Catastrófica

Tabla 4.7. Tipos de erosión propuestos por la FAO.

5. URBANIZACIÓN Y RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA

Una vez determinadas las zonas con mayor sensibilidad a la erosión hídrica (fig. 4.15) se puede observar el riesgo geológico al que se expone la población al avanzar con la urbanización hacia la barda Norte de la ciudad de General Roca. Teniendo en cuenta que el riesgo geológico como proceso se entiende como la probabilidad de ocurrencia de un evento natural en un tiempo determinado y dentro de un área específica, combinado con la vulnerabilidad del medio, es decir el grado de daños o pérdidas potenciales ya sean sociales, estructurales y/o económicas se puede evidenciar la presencia de un potencial riesgo en el extremo Sur de la Cuenca Roca, donde año a año las construcciones particulares avanzan cada vez más sobre la barda Norte.

En las figuras 5.1 y 5.2 se exponen los avances en las construcciones hacia la barda Norte de General Roca, imágenes de Google Earth del año 2006 y 2020 respectivamente. Esto representa un riesgo geológico potencial ya que la urbanización avanza en dirección al área donde el fenómeno erosivo fue mapeado con intensidad severa (fig. 5.3) y con mayor Numero de Curva, sumado a que el aumento de construcciones generan en el suelo una disminución de la capacidad de infiltración aumentando por lo tanto la escorrentía superficial y como consecuencia una mayor intensidad en la erosión.

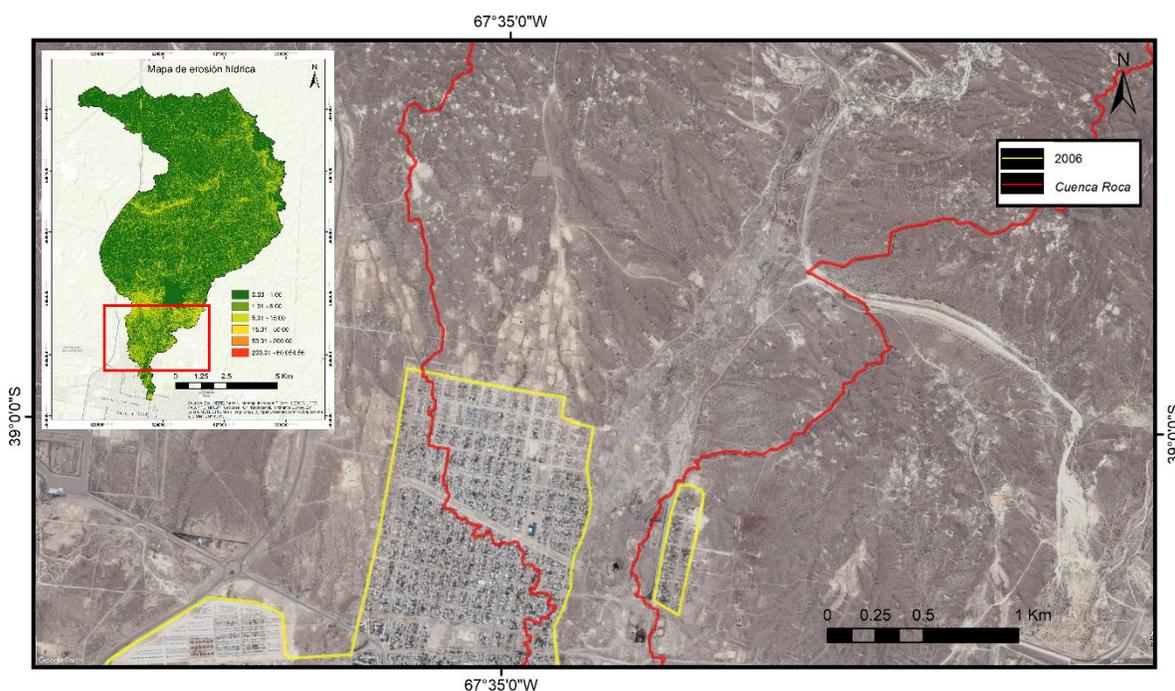


Figura 5.1. Zonas urbanizadas hacia la barda Norte de General Roca, año 2006.

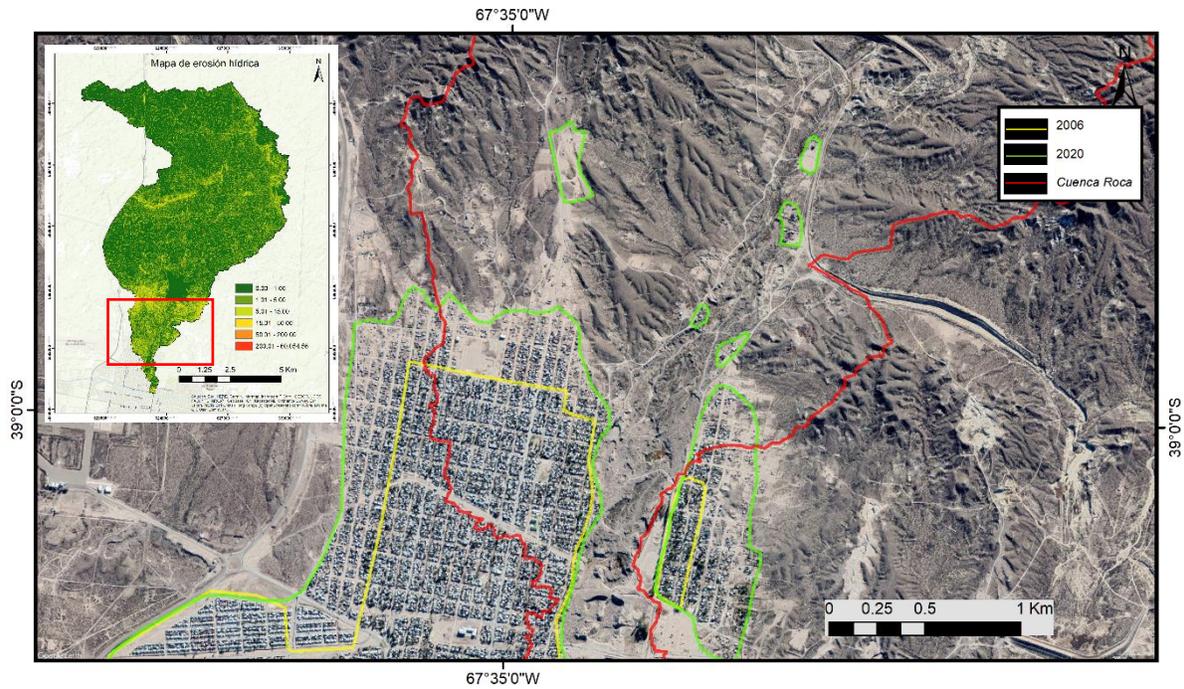
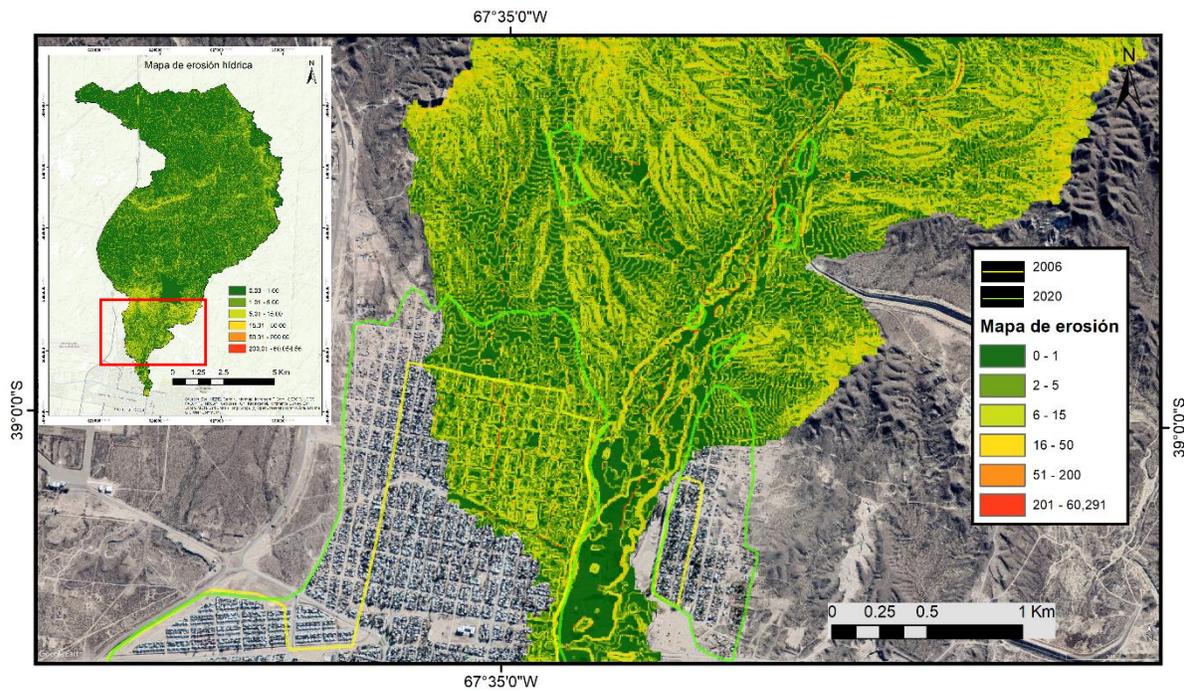


Figura 5.2. Aumento de las zonas urbanizadas hacia la barda norte de General Roca, año 2020.



6. CONCLUSIONES

El parámetro hidrológico CN, que se obtiene en función de diversas variables relacionadas a características físicas de la cuenca, forma parte de una de las metodologías más extendidas y experimentadas para la cuantificación de la escorrentía, fenómeno que ha afectado en el pasado a la ciudad de General Roca en forma de inundaciones y aluviones extraordinarios. Con la finalidad de poder caracterizar debidamente los posibles impactos, preservar y fortalecer las obras de infraestructura ya realizadas (Diques de contención) y disponer de elementos que apoyen la toma de decisiones en cuanto a la implementación de medidas de control y planes de manejo de cuenca se presenta el método utilizado en este trabajo ya que cuenta con una serie de ventajas: la relación entre las variables es tabular, facilitando su aplicación mediante sistemas de información geográfica. Una vez que la información forma parte del SIG la generación del mapa de CN es un proceso rápido y económico, comparado con tener que realizar la superposición manual de las capas de información, además de ser más preciso y su actualización solo supone el cambio de los valores en algún mapa de variables.

La aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo permitió la elaboración de una cartografía de estados erosivos (fig. 4.15) que deja en evidencias las zonas con mayor sensibilidad a la erosión. Se puede observar un nivel de erosión severa (entre 15 y 50 toneladas por hectárea por año) en los sectores que coinciden con las mayores pendientes de la cuenca, con las zonas que representan suelos desnudos (según el Factor C, valores cercanos a 1) y una correlación menor con el índice de erosividad de la lluvia (Factor R) que aumenta su valor de Este a Oeste. Se espera que la identificación de estas áreas de mayor vulnerabilidad a la erosión sea una herramienta para mejorar los modelos hidrológicos de la cuenca, para la implementación de medidas de mitigación de riesgo, la conservación de suelos ya sea para disminuir la escorrentía superficial generada durante tormentas extraordinarias como también disminuir el nivel de pérdida de suelos por año pensando en el crecimiento y expansión de los asentamientos, ya sean de particulares como de empresas, hacia la barda norte de la ciudad de General Roca.

Se propone mejorar la información utilizada de base, precisamente los mapas de suelos y cobertura del suelo, como también los datos de precipitaciones de General Roca con el objetivo de ajustar localmente estas variables a las escalas adecuadas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera A. L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Fascículo 1, tomo II, segunda Edición. Editorial ACME S.A.C. T.
- Hugo, C.A. y Leanza, H. A. 2001. Hoja Geológica 3969IV, General Roca. Provincias de Río Negro y Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 308, 65 p. Buenos Aires.
- Laya, H.A. 1980. Determinación de la clasificación hidrológica de los suelos y valores de CN en diversas cuencas de del valle medio superior del Río Negro. Depto. Provincial de Aguas, Río Negro y Centro Regional Andino, INCYTH.
- Lema, S.J. 2016. Rediseño del canal de desagüe del sistema de protección pluvio-aluvional de la ciudad de General Roca, pcia. De Río Negro. Universidad Nacional del Litoral -Facultad de Ciencias Hídricas Proyecto Final de Carrera.
- McCuen, R.H. 1982. A Guide to Hydrologic Analysis using SCS Methods. Prentice-Hall. 110 pp.
- Mongil, J., Navarro, J., 2012. Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). Cuadernos de Investigación Geográfica, 38(1): 131-153.
- Temez, J.R. 1978. Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales. MOPU.
- Velásquez, S. 2008. Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Coronado, Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. P. 909-1000. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Foster, G. R., Meyer, I. D. y Onstad, C. A., 1977: «A RunoffErosivity Factor for Variable Slope Length Exponents for Soil Loss Estimates». Trans. American Society Agricultural Engineers: 20 (4): 683-687.
- McCool, D. K., Foster, G. R., y Weesies, G. A., 1989: «Slope Length and Steepness factors (15)». En: The Revised Universal Soil Loss Equation, Chapter 4. USDA-ARS Tucson, Arizona.
- Porta, J., Lopez-Acevedo, J., Roquero, C. (1994). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ed. MundiPrensa.
- Rodríguez, M.F., Leanza, H.A. y Salvarredy Aranguren, M. 2007. Hoja Geológica 3969-II, Neuquén, provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 370, 165 pp. Buenos Aires.

Marizza, M. S., Rapacioli, R. A. y Vives, L. 2010. La problemática aluvional en el Alto Valle de Río Negro, Argentina. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

USDA. 1972. SCS National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology (NEH-4). Washington, D.C.: Soil Conservation Service.

USDA, 1975. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Survey Staff Soil Taxonomy. Handbook 436, 754 págs.

COPADE, 1975. Evaluación de los daños en la zona de desastre de la provincia del Neuquén. Registro n°: 2268-172

Aronoff.1989. Geographic Information Systems: a mangement perspective. WDL Publications, 294 pp.

MOPT. 1992. Guía para la elaboración de estudios en el medio físico. MOPT.

FAO, 2006. Base de referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 103: 130 págs.

NRCS, 1995. National Soil Survey Handbook. <http://www.statlab.iastate.edu/soils/nssh>.