

# Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina

Juan Gaitán, María Fabiana Navarro, Leonardo Tenti Vuegen, María José Pizarro, Patricia Carfagno, Santiago Rigo



# **Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina**

**Juan Gaitán, María Fabiana Navarro, Leonardo Tenti Vuegen, María José Pizarro, Patricia Carfagno, Santiago Rigo**



**Ministerio de Agroindustria  
Presidencia de la Nación**

***Instituto de Suelos – Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN)  
Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias - INTA***

**2017**

Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina/  
Juan Gaitán...[et al.]; editado por Juan Gaitán, María Fabiana Navarro, Patricia Carfagno,  
Leonardo Tenti Vuegen. – 1ª. ed. – Buenos Aires: Ediciones INTA,  
2017.

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-521-857-4

1. Erosión Hídrica. 2. Nuevas Tecnologías. 3. USLE. I Juan Gaitán  
CDD 333.5

© 2017, Ediciones INTA

Libro de edición argentina

Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial, la distribución o la transformación de este libro, en ninguna forma o medio. Ni el ejercicio de otras facultades reservadas sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes vigentes.

## PRÒLOGO

Uno de los desafíos más significativos que afronta la humanidad está representado por la degradación de los recursos naturales y principalmente la degradación de los suelos cultivados. Alrededor de 2000 millones de hectáreas están deterioradas en forma irreversible y de las 1500 millones en uso actualmente, una tercera parte poseen procesos degradatorios de moderados a graves, que afectan anualmente entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierra productiva. No se termina de comprender en su verdadera dimensión, que la vida sobre la tierra depende en gran medida de las diferentes funciones cumplidas por la delgada capa de suelos, que asegura la provisión de alimentos, el uso sustentable del agua, la conservación de la biodiversidad y el control del clima global.

Si bien la Argentina ha logrado avances relevantes en la difusión de tecnologías conservacionistas, la problemática es de una magnitud, vastedad y complejidad tal, que requiere políticas de estado que focalicen al recurso suelo como elemento estratégico del desarrollo regional y nacional. Alimentos, agua y bioenergía se transformarán en elementos vitales y estratégicos a escala mundial, especialmente teniendo en cuenta que más de 5000 millones de personas constituyen la población de los países en desarrollo, con proyecciones de crecimiento demográfico que plantean incertidumbre sobre la capacidad productiva de las tierras del planeta para abastecer semejante demanda de alimentos, creciente en cantidad y calidad.

En vastas regiones de nuestro país, se viene observando con preocupación una reactivación de los procesos de erosión producto principalmente de los cambios producidos en el uso del suelo, simplificación o falta de rotaciones y el sobrepastoreo en regiones secas. La variabilidad climática que se viene registrando, con incremento tanto de períodos de sequías extendidas, como de lluvias intensas, potencia la acción erosiva la lluvia y del viento. Según estimaciones de la FECIC, actualmente un 36 por ciento del territorio argentino está afectado por procesos de erosión hídrica y eólica lo cual representa unas 100 millones de hectáreas en total. Un análisis de los factores causales de los procesos erosivos de origen antrópico permite comprobar que los más importantes a nivel nacional son la simplificación de la rotación de cultivos y monocultivo, desmonte y expansión de la frontera agrícola, sobrepastoreo y el cambio de uso del suelo. En un segundo grupo, pero también de importancia para varias regiones se mencionan a los incendios de bosques y pastizales, las labranzas inadecuadas, la escasa adopción de tecnología conservacionista, y la actividad petrolera. A la luz de las tendencias mundiales, se considera que deberíamos priorizar el análisis de las políticas vigentes para expansión de la agricultura, particularmente en ambientes vulnerables. La agricultura mundial de las próximas décadas deberá tener productividad creciente a los efectos de poder satisfacer el aumento de la demanda de alimentos sin necesidad de recurrir a nuevas tierras, ya que esto implicaría

incrementar la degradación de los suelos y la desaparición de numerosas hectáreas con bosques con una enorme pérdida de biodiversidad. Esta situación generará una mayor presión sobre los recursos naturales y un conflicto con los fundamentos del uso sustentable.

En la Argentina, la agricultura también tendrá productividad creciente ya que continúa siendo muy grande la brecha existente entre la producción media por unidad de superficie y la producción obtenida por los agricultores que aplican tecnologías modernas. En el contexto analizado resulta claro que es imprescindible generar información de base que permita estimar a nivel nacional cuales son los riesgos de erosión del suelo, identificando las áreas críticas, y a partir de ello planificar el uso sustentable del suelo.

La obra que se presenta, constituye un aporte relevante en la dirección mencionada, al estimar las tasas de pérdida de suelo por erosión hídrica en todo el territorio nacional, definir las tolerancias de erosión para cada combinación de régimen de humedad y profundidad del suelo, generando mapas de erosión actual, erosión potencial y de las áreas con pérdidas de suelo que superan el límite de la tolerancia. A partir de esta evaluación los autores analizan el impacto económico de la erosión hídrica sobre la productividad de los suelos afectados en sus distintos grados, planteando además, el costo y posibilidades de prevenir la degradación por erosión mediante aplicación de prácticas

conservacionistas. Por lo tanto la información generada es de fundamental importancia para contribuir a la implementación de políticas públicas para la conservación y uso sustentable del suelo, principalmente a partir del conocimiento de la ubicación de las áreas críticas y de los riesgos de degradación por erosión.

El pasado brinda experiencias que constituyen la materia prima para el desarrollo del nuevo paradigma en la agricultura: la implementación del modelo requiere nuevas actitudes, nuevas políticas, nuevas tecnologías y la incorporación continua de nuevos conocimientos por parte de todos los actores involucrados. Debemos considerar que pese a todo lo que podemos pensar, decir, escribir y realizar, la conservación de la integridad y las funciones del suelo continuará siendo el principal factor relacionado con el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables.



Ing. Agr. Roberto R. Casas  
Director del Centro para la Conservación del  
Suelo y del Agua  
PROSA - FECIC

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
2. METODOLOGÍA.....	4
2.1. <i>Factores para el cálculo de la erosión hídrica</i> .....	5
2.1.1. <i>Factor R</i> .....	5
2.1.2. <i>Factor K</i> .....	8
2.1.3. <i>Factor LS</i> .....	9
2.1.4. <i>Factor C</i> .....	11
<i>Bosques naturales e implantados</i> .....	11
<i>Cultivos</i> .....	11
<i>Pastizales y arbustales naturales</i> .....	11
2.1.5. <i>Factor P</i> .....	15
2.1.6. <i>Integración de los Factores de la ecuación</i> .....	15
2.1.7. <i>Validación</i> .....	16
2.1.8. <i>Tolerancia a la pérdida de suelos</i> .....	18
3. RESULTADOS.....	19
4. CONSIDERACIONES FINALES.....	34
5. AGRADECIMIENTOS.....	35
6. BIBLIOGRAFÍA.....	35
7. ANEXO.....	41

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos que provocan una disminución de la capacidad productiva del suelo se denominan procesos de degradación, entre los cuales uno de los más importantes es la erosión (FAO, 1980). Del latín *erosio*, 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. La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por la acción del agua que disminuye la productividad de los suelos y afecta la salud de los ecosistemas. La erosión hídrica es el principal problema que compromete la sustentabilidad de todos los sistemas productivos. La estimación de las pérdidas de suelo por este fenómeno es una información de suma importancia para la planificación y toma de decisiones a diferentes niveles.

La erosión hídrica es un proceso complejo de preparación y separación del material en partículas individuales (arcilla, limo y arena) y pequeños agregados por acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. Las partículas desprendidas son arrastradas pendiente abajo por el escurrimiento superficial, lo cual produce, a su vez, el desprendimiento de nuevo material. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos) que se mueve con una velocidad mayor y es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos. Por

otro lado, en regiones montañosas, ambientes de altas pendientes, la sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está mojado (Michelena *et al.*, 2014). 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). Finalmente, se produce el depósito de las partículas del suelo por una disminución de la energía del escurrimiento (disminución de la pendiente, presencia de obstáculos que reducen la velocidad, etc.).

Por lo tanto el proceso de erosión hídrica involucra tres etapas:

1. Preparación del material (desprendimiento y remoción)
2. transporte
3. Sedimentación

En las tres etapas del proceso erosivo se producen daños importantes. En la etapa de preparación se produce una alteración de la estructura superficial del suelo, destrucción de agregados, formación de costras y sellos, alteración de la relación infiltración/escurrimiento y pérdida de fertilidad del suelo (pérdida de materia orgánica y de nutrientes). En la etapa de transporte se completa la pérdida de las partículas del suelo (materiales coloidales como materia orgánica y humus, y nutrientes), iniciada en la etapa anterior, se genera el escurrimiento superficial que produce distintas formas de erosión (laminar, en surcos y/o en cárcavas) y daños a la infraestructura. En la etapa de sedimentación,

el depósito del material puede destruir cultivos, dañar la infraestructura (caminos, vías férreas, etc.) y colmatar y reducir la capacidad de represas y embalses.

Muchos modelos han sido desarrollados para determinar las tasas de erosión del suelo (Wischmeier y Smith, 1978; Mitas y Mitasova, 1998; Flanagan y Nearing, 1995; Morgan *et al.*, 1998; Merritt *et al.*, 2003; Renard *et al.*, 1997). Se han desarrollado modelos cualitativos y cuantitativos; entre los primeros, 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 el terreno, por medición en parcelas de erosión o por la medición de variables, tales como sedimentos en el agua y los simuladores de lluvia, cuyos datos son extrapolados a zonas homogéneas. Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad; entre estos podemos distinguir entre modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos (Almorox *et al.*, 1994).

Los modelos empíricos se destacan por su amplia utilización, de ellos el más usado ha sido el de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), desarrollada en Estados Unidos por Wischmeier y Smith en 1965 y modificada en 1978. Esta Ecuación fue derivada por los autores, a partir del análisis estadístico de datos obtenidos de

10.000 parcelas, afectadas por lluvia natural y entre 1.000 y 2.000 parcelas/año con lluvia simulada. Esta ecuación, evalúa principalmente la erosión laminar o erosión “entre surcos” y la erosión en surcos en forma conjunta, no así a la erosión por escurrimiento o “flujo concentrado”, cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, 1988). Su bondad depende del rigor con que los factores que componen la ecuación, reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox *et al.*, 1994). La USLE considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado de la interacción de factores naturales (lluvia, suelo y topografía) y del impacto de factores influenciados por el hombre directamente (uso y manejo de la tierra).

La capacidad potencial que presenta un suelo para hacer frente a los procesos de erosión hídrica, está determinada por los factores predisponentes, los cuales pueden ser analizados y cuantificados por la USLE, que es un modelo matemático de tipo paramétrico que permite estimar cuantitativamente la erosión para determinadas condiciones de precipitación, suelo, relieve, cultivo y prácticas de manejo (Villanueva y Osinaga, 2004).

En la República Argentina, hasta el presente, el único estudio a nivel nacional (abarcando 18 provincias y el 82% del territorio del país) que presenta un mapa del estado de erosión hídrica fue realizado en 1988 (Prosa, 1988). De acuerdo a este estudio, la superficie afectada por erosión hídrica en el país era, en ese momento, de 25 millones de hectáreas. En las últimas décadas Argentina ha transitado un proceso de agriculturización favorecido por la



macroeconomía y la adopción de nuevas tecnologías como genética, agroquímicos y del sistema de siembra directa. En este contexto se produjo , especialmente en la región semiárida Pampeana y Chaqueña, mediante la incorporación de tierras al cultivo intensivo de granos y del monocultivo de soja, a expensas de tierras ocupadas por bosque natural (desmonte), o tierras bajo uso ganadero y pastizal natural (Viglizzo y Jobbágy, 2010). Este fenómeno afectó sensiblemente a muchas provincias del centro y norte del país, como La Pampa, San Luis, Córdoba, Santiago del Estero, Chaco, Tucumán y Salta, entre otras. Como resultado de esta transformación, el área cultivada de soja, se incrementó de 7,1 a 20,3 millones de hectáreas a nivel nacional, durante el período 1998/2016 (Bolsa de Comercio Rosario, 2016). Debido a estos cambios, se estima que los procesos de erosión hídrica en el país han tendido a agravarse en las últimas décadas. En este sentido, en un reciente estudio Casas y Albarracín (2015) estimaron que el 23% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica, lo cual representa 64,6 millones de hectáreas, lo que corresponde a 2,5 veces más que los estimado por Prosa en 1988.

De esto se desprende la necesidad de actualizar la cartografía del estado de erosión hídrica actual y potencial de los suelos a escala nacional, para lo cual la USLE ha sido utilizada por varios países (por ej. México, Montes-león *et al.*, 2011; Italia, Van der Knijff *et al.*, 1999; Sudáfrica, Le Roux *et al.*, 2008). En Argentina la metodología USLE se ha aplicado para estimar la erosión hídrica de los suelos a escala de lote con el desarrollo del software INTA USLE-RUSLE ARGENTINA (Gvozdenovich *et al.*,

2015); a escala de cuenca hidrográfica (por ejemplo, cuenca del Río Neuquén, Gaitán y Cappelletti, 2012; cuenca del Río Pilcomayo, Guanca, 2010; cuenca inferior del río Bermejo, Yapur, 2010; cuenca del arroyo Ventana, Gaspari *et al.*, 2009); y a escala provincial (por ejemplo, Buenos Aires, Irurtia *et al.*, 2007; Córdoba, Marelli, 2012; Misiones, Ligier *et al.*, 1993; Corrientes, Ligier *et al.*, 1998; Salta, Osinaga *et al.*, 2012; Neuquén, Irisarri y Dulfilho, 2015). Sin embargo, en estos estudios se han realizado diferentes adaptaciones metodológicas, haciendo que los resultados sean difícilmente comparables. En el presente estudio se realizará una adaptación estandarizada de la USLE y se aplicará para estimar y cartografiar la erosión hídrica actual y potencial de los suelos a nivel nacional.

### **1.1. Objetivo General**

Estimar el riesgo de erosión hídrica, a escala nacional, con la finalidad de contribuir al ordenamiento y manejo sustentable de los suelos

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Estimar los factores intervinientes en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para la estimación de la erosión hídrica.
- Integrar todos los factores que intervienen en la ecuación, mediante Sistemas de Información Geográfico (SIG).

- Obtener el mapa con la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica para la totalidad del territorio de la República Argentina.
- Utilizar el mapa de pérdida de suelo obtenido como un claro indicador a escala nacional que permita identificar las áreas más susceptibles a presentar este tipo de problemas.
- Transferir la información a los organismos que gestionan el uso del territorio con la finalidad de contribuir a generar políticas públicas tendientes al ordenamiento y al manejo sustentable de los suelos.

## 2. METODOLOGÍA

Para la estimación de la erosión hídrica de los suelos se empleó el modelo USLE. La USLE es un método para predecir la tasa de pérdida de suelo en cualquier combinación de suelo, topografía, clima, cobertura y prácticas de manejo. El método se fundamenta en la capacidad que poseen las lluvias para provocar erosión y en la resistencia natural de la tierra (Wischmeier y Smith, 1978). Es un método que se puede aplicar en cualquier región, de allí el término universal, ya que considera los principales factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (precipitaciones, suelo, relieve, coberturas y prácticas de conservación). Permite predecir la erosión actual y realizar simulaciones con diferentes escenarios.

El modelo USLE utiliza seis factores: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo

(K), longitud y gradiente de la pendiente (LS), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P), para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, generalmente un año:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

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

**R:** es el factor de erosividad de las lluvias, representa los factores de lluvia y escurrimiento; corresponde a un número de unidades del índice de erosión pluvial (EI), por año o en un período de tiempo considerado. Se calcula a partir de la sumatoria anual de la energía de la lluvia en cada evento ( $E_c$ ) (correlacionado al tamaño de las gotas), multiplicado por su máxima intensidad en 30 minutos ( $I_{30}$ ).

**K:** es el factor susceptibilidad del suelo frente a la erosión ( $t \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ), representa la susceptibilidad del suelo y reconoce que sus propiedades físicas están estrechamente relacionadas a las tasas de erosión. Cuantifica el carácter cohesivo de un tipo de suelo y su resistencia a desprenderse y ser transportado debido al impacto de las gotas de lluvia y al flujo superficial de agua. Es la tasa de pérdida de suelo por unidad de EI para un suelo específico, medido en una porción de terreno estándar (22.13 m de largo, 9% de pendiente, en barbecho y labranza continua).

**LS:** es el factor topográfico (adimensional) y establece la influencia del relieve en la erosión hídrica. Está conformado por el factor de largo de la pendiente (L) y el factor de gradiente de la pendiente (S). El factor L es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m). El factor S es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.

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

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

El principal factor es el de erosividad (factor R); que mide la potencialidad de las lluvias para provocar erosión. Su acción es regulada en función de las características del relieve (longitud y grado de la pendiente, factor LS), de las propiedades del suelo (erodabilidad del suelo, factor K), del tipo de cobertura (factor C) y de las prácticas conservacionistas (factor P). El valor de los tres primeros factores dependen netamente de las condiciones naturales del lugar, en cambio, el valor de los factores C y P pueden ser manipulados por la acción del hombre. Los tres primeros factores (R, K y LS) determinan la **Erosión Hídrica**

**Potencial**, si a estos se agregan los factores C y P proporcionan la **Erosión Hídrica Actual**.

## 2.1. Factores para el cálculo de la erosión hídrica

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

### 2.1.1. Factor R

Se calcula a partir de un valor "E" que es la energía cinética liberada por las lluvias y un valor "I" que corresponde a la máxima intensidad de la precipitación en un intervalo de 30 minutos.

$$EI_{30} = (Ec) \cdot (I_{30})$$

En donde:

$EI_{30}$  = Índice de erosividad para un evento (MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>)

c = Energía cinética de la lluvia (MJ.ha<sup>-1</sup>)

$I_{30}$  = Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia (mm. h<sup>-1</sup>)

Con la suma de todos los  $EI_{30}$  de cada uno de los eventos del año. Se obtiene el índice de erosividad anual (R). Entonces:

$$R = \sum_{j=1}^n (EI_{30 j})$$

En donde:

R = Erosividad de la lluvia

n = Número de eventos durante el año

$EI_{30}$  = Índice de erosividad para un evento

Este factor es difícil de calcular dado que para ello se necesitan registros pluviográficos confiables que no siempre están disponibles, por lo que se utilizan aproximaciones de ese factor.

En el presente estudio se optó por la metodología descrita a continuación.

Se recopilaron datos del Factor R para 75 localidades de la República Argentina, calculados por Codromaz de Rojas *et al.* 1976, Codromaz de Rojas y Conde, 1985 y Codromaz de Rojas y Saluso, 1988 de acuerdo a la

metodología original. Además para cada localidad se obtuvo la precipitación media anual (PMA) del “Atlas climático digital de la República Argentina” (Bianchi y Cravero, 2010) (Tabla 1).

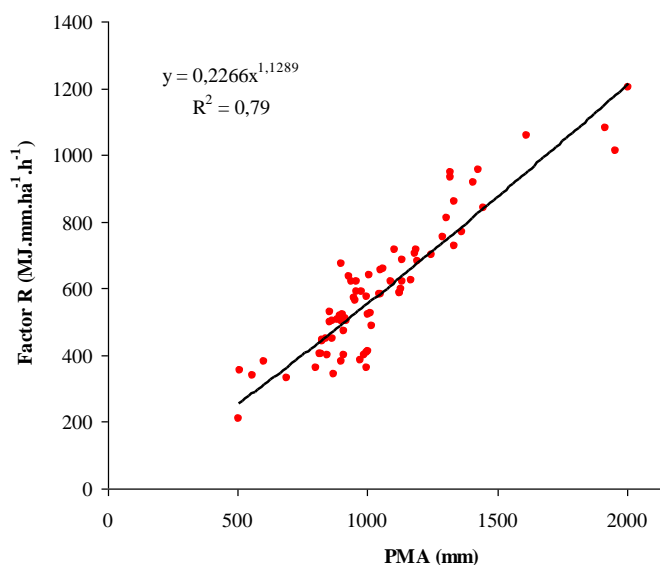
**Tabla 1.** Factor de erosividad de las lluvias (R) y precipitación media anual (PMA) para 75 localidades de la República Argentina.

<b>Localidad</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Factor R (<math>mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.año^{-1}</math>)</b>	<b>PMA (mm)</b>
La Banda	-27,733	-64,243	354	510
Campo Gallo	-26,584	-62,850	380	602
Formosa	-26,189	-58,224	956	1427
Las Lomitas	-24,705	-60,601	638	801
Bella Vista	-28,507	-59,042	858	1338
Corrientes	-27,490	-58,797	1059	1616
Mercedes	-29,185	-58,074	917	1408
Monte Caseros	-30,253	-57,637	840	1448
Cerro Azul	-27,635	-55,497	1201	2007
Iguazú	-25,597	-54,579	1013	1958
Posadas	-27,362	-55,901	1081	1918
Ceres	-29,882	-61,946	637	930
Rafaela	-31,253	-61,492	575	999
Reconquista	-29,147	-59,652	809	1305
Rosario	-32,944	-60,651	591	977
Casilda	-33,045	-61,165	589	961
Venado Tuerto	-33,749	-61,970	570	949
Sauce Viejo	-31,772	-60,836	581	1045
Córdoba	-31,420	-64,189	363	803
Laboulaye	-34,129	-63,391	379	902
Marcos Juárez	-32,698	-62,106	520	907
Río Cuarto	-33,123	-64,349	445	826
Gral Cabrera	-32,811	-63,871	440	829
Sacanta	-31,664	-63,047	500	856
Ballesteros	-32,543	-62,982	503	868
Alejo Ledesma	-33,606	-62,624	501	920
Olaeta	-33,045	-63,906	400	848
Rosales	-34,172	-63,154	400	911
Canals	-33,562	-62,886	472	910
Noetinger	-32,364	-62,312	517	897

Laborde	-33,152	-62,856	502	900
Ordoñez	-32,840	-62,865	505	886
Oncativo	-31,913	-63,682	404	820
Baldissera	-33,123	-62,302	510	915
Monte Buey	-32,914	-62,455	510	900
Villa del Rosario	-31,556	-63,536	450	840
Manfredi	-31,846	-63,748	403	817
Azul	-36,775	-59,854	406	1000
Dolores	-36,315	-57,675	383	974
Junín	-34,589	-60,950	520	1003
Las Flores	-36,014	-59,099	360	997
9 de Julio	-35,444	-60,885	488	1016
Cnel. Suarez	-37,459	-61,933	343	869
Pehuajó	-35,811	-61,899	412	1001
Pergamino	-33,891	-60,575	524	1013
Gral. Pico	-35,659	-63,758	449	867
Comechingones	-33,294	-66,273	210	506
Famailá	-27,056	-65,402	717	1106
Tucumán	-26,808	-65,218	619	938
Orán	-23,128	-64,322	528	857
Salta	-24,782	-65,423	330	691
Tartagal	-22,517	-63,806	563	956
Rivadavia	-24,186	-62,884	340	560
San Salvador de Jujuy	-24,186	-65,299	401	987
La Paz	-30,786	-59,639	705	1182
Paraná	-31,741	-60,512	621	1090
Diamante	-32,070	-60,638	581	1050
Gualeguay	-33,150	-59,310	584	1126
Gualeguaychú	-33,008	-58,511	596	1132
Concepción del Uruguay	-32,485	-58,232	624	1170
Colón	-32,225	-58,145	682	1194
San Salvador	-31,603	-58,571	716	1191
Concordia	-31,391	-58,017	728	1334
Federación	-30,985	-57,920	768	1365
Feliciano	-30,386	-58,751	755	1293
Federal	-30,951	-58,785	700	1247
Villaguay	-31,868	-59,027	684	1136
Tala	-32,336	-59,369	620	1137
Nogoyá	-32,391	-59,792	586	1125
Colonia Benítez	-27,331	-58,948	946	1321
Las Breñas	-27,089	-61,084	621	961
Roque Sáenz Peña	-26,791	-60,440	656	1051
Resistencia	-27,466	-58,998	933	1320
Castelli	-25,950	-60,617	673	900
Villa Ángela	-27,576	-60,714	657	1061

Para estas 75 localidades se encontró que la PMA es un buen estimador del factor R (Figura 1). Por lo tanto, se utilizó el siguiente modelo para obtener el mapa de Factor R para todo el país a partir del mapa de PMA (Bianchi y Cravero, 2010):

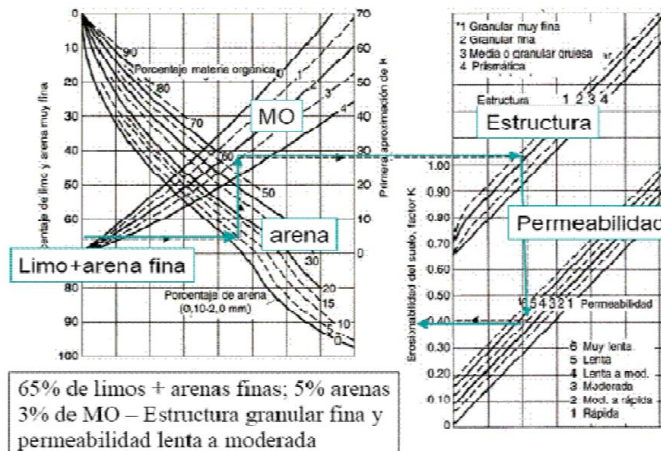
$$\text{Factor R} = 0,2266 \bullet \text{PMA}^{1,1289}$$



**Figura 1.** Relación entre la precipitación media anual (PMA) y el factor de erosividad de las lluvias (R) para 75 localidades de la República Argentina.

### 2.1.2. Factor K

Para la obtención del factor K, la metodología original propone la utilización del nomograma de erodabilidad (Wishmeier et al. 1971) que considera el porcentaje de limos+arenas finas, arenas, materia orgánica y estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo (Figura 2).



**Figura 2.** Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K). Adaptado por Foster et al. (1981).

Dado que la información de suelos disponible a escala nacional que se utilizó como base en el presente estudio (Atlas de Suelos de la República Argentina, escala 1:500.000 y 1:1.000.000; INTA, 1990) no cuenta con todos los datos necesarios para obtener el factor K aplicando el nomograma de Wischmeier, fue necesario realizar una adaptación a la metodología.

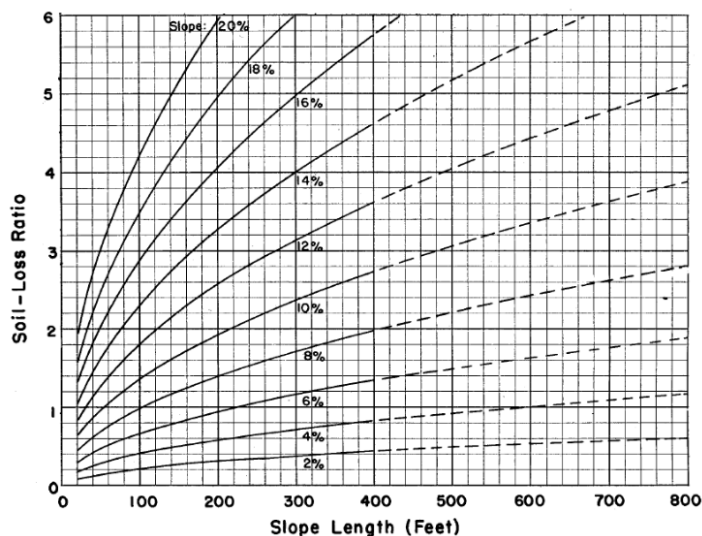
Se utilizó como base el mapa digital del Atlas de Suelos de la República Argentina y se generó una base de datos con los valores de materia orgánica y textura del horizonte superficial de los suelos que componen cada unidad cartográfica (UC), además se estimó la proporción que ocupa cada suelo en base a la descripción de las UC. Los valores del factor K para cada suelo se obtuvieron de acuerdo a la Tabla 2. El factor K para cada UC se calculó como un promedio ponderado del valor de K para cada suelo por la proporción relativa que ocupa en dicha unidad cartográfica.

**Tabla 2.** Factor de erodabilidad del suelo (Factor K) de acuerdo al contenido de materia orgánica y textura del horizonte superficial (Stewart et al. 1975)

Clase textural	Materia orgánica (%)			
	0,5	2	4	8
Arenoso	0,05	0,03	0,02	0,05
Arenoso fino	0,16	0,14	0,10	0,07
Arenoso muy fino	0,42	0,36	0,28	0,19
Areno-franco	0,12	0,10	0,08	0,06
Areno-franco fino	0,24	0,20	0,16	0,12
Areno-franco muy fino	0,44	0,38	0,30	0,20
Franco-arenoso	0,27	0,24	0,19	0,12
Franco-arenoso fino	0,35	0,30	0,24	0,19
Franco-arenoso muy fino	0,47	0,41	0,33	0,24
Franco	0,38	0,34	0,29	0,24
Franco-limoso	0,48	0,42	0,33	0,23
Limoso	0,60	0,52	0,42	0,30
Franco-arenoso arcilloso	0,27	0,25	0,21	0,14
Franco-arcilloso	0,28	0,25	0,21	0,16
Franco-limo arcilloso	0,37	0,32	0,26	0,18
Arcillo-arenoso	0,14	0,13	0,12	0,11
Arcillo-limoso	0,25	0,23	0,19	0,14

### 2.1.3. Factor LS

La influencia del relieve en la erosión hídrica se expresa en la ecuación USLE a través del factor topográfico, resultante de la combinación del gradiente de la pendiente (S) con la longitud de la pendiente (L) (Figura 3).



**Figura 3.** Efecto de la pendiente y su longitud en la pérdida de suelo por erosión hídrica (Wischmeier et al., 1965).

A partir de los avances tecnológicos y la disponibilidad de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de la superficie terrestre, la ecuación original para el cálculo del Factor LS de Wischmeier y Smith (1978) ha sido modificada con la incorporación del impacto de la acumulación o convergencia de flujo (Moore et al. 1991, Desmet y Govers 1996). En este trabajo, el método empleado para la determinación del Factor LS fue el de Moore et al. 1991 (Figura 4). Se obtuvo con el módulo Índices Topográficos del Análisis del Terreno (Terrain Analysis) del programa SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses). La variable hidrológica incorporada a la ecuación original enriquece la ecuación en tanto, incluye el área de contribución pendiente arriba como nuevo término de la ecuación del factor de longitud de la pendiente.

Ecuaciones de Moore *et al.* (1991)

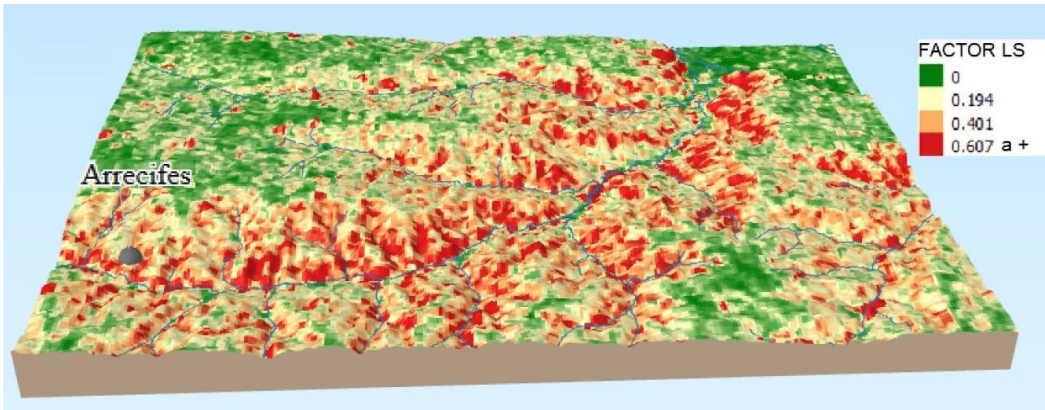
$$L = 1.4 \left( \frac{As}{22,13} \right)^{0,4}$$

$$S = \left( \frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^{1,3}$$

En donde:

As = Área de contribución específica

$\beta$  = Angulo de la pendiente



**Figura 4.** Factor LS (adimensional) en Pampa Ondulada (Río Arrecifes) basado en el área de contribución específica. Exageración vertical de 50.

La pendiente y el área de contribución específica se calcularon a partir del MDE-Ar del IGN (Instituto Geográfico Nacional) y con una resolución espacial de 250 metros. Si bien para este trabajo se contaba con el MDE-Ar de 45 m, en este caso se optó por trabajar a la escala espacial propuesta teniendo como base dos aspectos: i) el excesivo cúmulo de información (datos) que conlleva una superficie tan extensa como el de la República Argentina y que tornó imposible su análisis con el equipamiento disponible; ii) a mayor resolución espacial, el MDE es más sensible a elementos presentes en

la superficie (árboles, cultivos, construcciones, etc.), que se traducen en el mismo como barreras para el escurrimiento superficial. Particularmente en zonas llanas el efecto se torna considerable debido a la mayor diferencia entre la escasa pendiente que registra el terreno y los saltos abruptos que provoca en el MDE la vegetación o cualquier elemento de la superficie que no hace a la topografía del terreno (Thomas *et al.* 2015), incorporando en muchos casos un "ruido" no deseado.



### 2.1.4. Factor C

Para la estimación del factor C se consideraron tres tipos principales de cobertura del suelo, los cuales fueron extraídos del “Mapa de cobertura de suelo de la República Argentina – Año 2007” (Volante *et al.*, 2009): bosques naturales e implantados, cultivos, pastizales y arbustales naturales

#### **Bosques naturales e implantados**

A las áreas cubiertas de bosques naturales densos y bosques implantados se les asignó un factor C de 0,0001 (FAO, 1980; Clérico y Préchac, 2001). A las áreas con bosques naturales abiertos se les asignó un factor C de 0,010.

#### **Cultivos**

Dado que no se cuenta con mapas por tipo de cultivo a nivel nacional, a las áreas agrícolas del mapa de Volante *et al.* (2009) se les asignó un factor C de 0,102. Este valor resulta del promedio del factor C para las principales rotaciones de cultivos bajo siembra directa, que es el sistema de labranza más ampliamente difundido en el país (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores de factor C para diferentes rotaciones de cultivos bajo el sistema de siembra directa (Marelli *et al.*, 2012).

<b>Cultivo - Secuencia</b>	<b>Factor C</b>
Trigo – Soja 2ª	0,09
Soja 1ª - Trigo	0,07
Soja - Maíz	0,10
Soja - Soja	0,15
Girasol - Girasol	0,10
<b>Promedio</b>	<b>0,102</b>

### **Pastizales y arbustales naturales**

Para estimar el factor C de las áreas cubiertas por pastizales y arbustales naturales se utilizó como *proxy* el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; Tucker, 1979). En diversos estudios se han hallado relaciones significativas entre este índice y aspectos claves de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, entre ellos la cobertura vegetal (Gaitán *et al.*, 2013).

En el presente estudio se utilizaron imágenes de NDVI del producto MOD13Q1 derivados del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que orbita a bordo del satélite TERRA. El satélite TERRA recorre la superficie terrestre diariamente y registra la reflexión de la Tierra en 36 porciones del espectro electromagnético. Para el cálculo del NDVI se utilizan las bandas correspondientes a la porción del rojo (IR, 620-670 nm) y del infrarrojo cercano (IRc, 841-876 nm) del espectro electromagnético, de acuerdo a la siguiente relación:

$$NDVI = (IR - IRc) / (IR + IRc)$$

Las imágenes del producto MOD13Q1 tienen una resolución espacial de 250 metros (tamaño de pixel: 6,25 hectáreas) y comprenden el período desde febrero de 2000 hasta la actualidad con una resolución temporal de 16 días (23 imágenes por año). Se calculó la integral anual del NDVI (NDVI-I) de cada año, desde 2000 hasta 2015, como la sumatoria de los productos de los 23 valores de NDVI por la fracción del año que comprende cada mosaico.

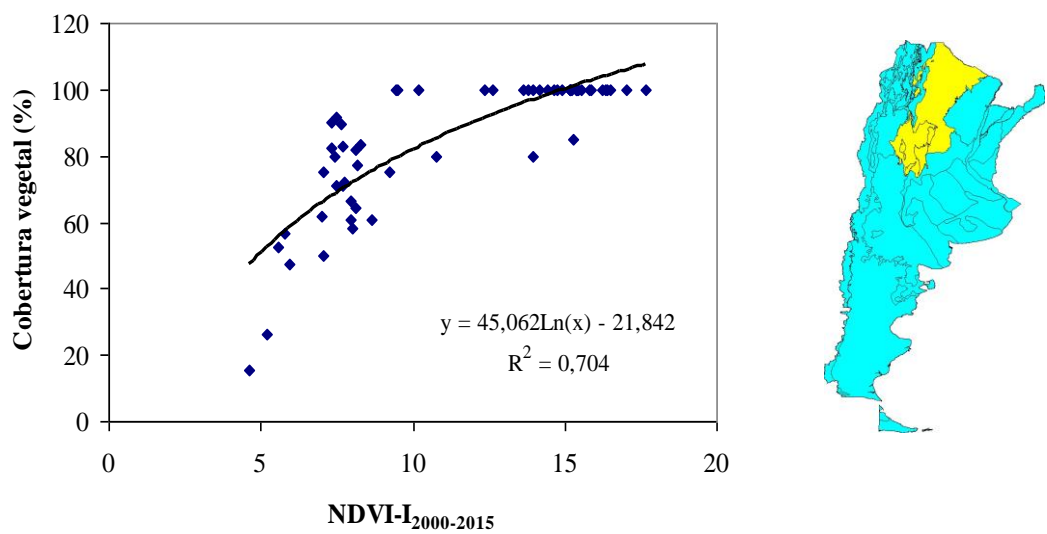
Posteriormente se calculó la media de las integrales anuales del NDVI (NDVI-I<sub>2000-2015</sub>).

Se analizó la relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo. Para ello se recopilaron datos, de diversas fuentes, de aproximadamente 1100 sitios ubicados en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas-secas (Tabla 4). Para los pastizales y arbustales naturales de zonas húmedas se asumió una cobertura vegetal del 100%.

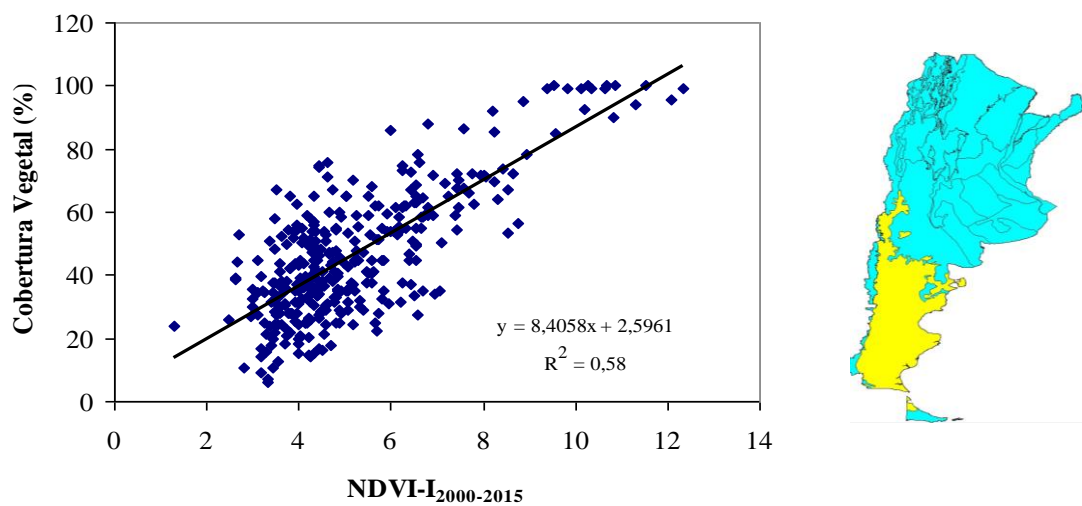
Para cada ecorregión, o grupo de ecorregiones con características relativamente similares, se analizó la relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo. Los modelos ajustados se utilizaron para estimar la cobertura vegetal y realizar mapas continuos de esta variable, utilizando NDVI-I<sub>2000-2015</sub> como variable predictora. En la Figura 5 se muestra el modelo que relaciona NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal para las ecorregiones Chaco árido, Chaco semiárido y Chaco Serrano, en la Figura 6 para la Estepa patagónica, en la Figura 7 para el Monte de llanuras y mesetas y la porción sur del Espinal, en la Figura 8 para el Monte de sierras y bolsones y en la Figura 9 para la Puna, Altos andes y los Pastizales de neblina.

**Tabla 4.** Número de sitios, por ecorregión, para los cuales se contó con datos de cobertura vegetal.

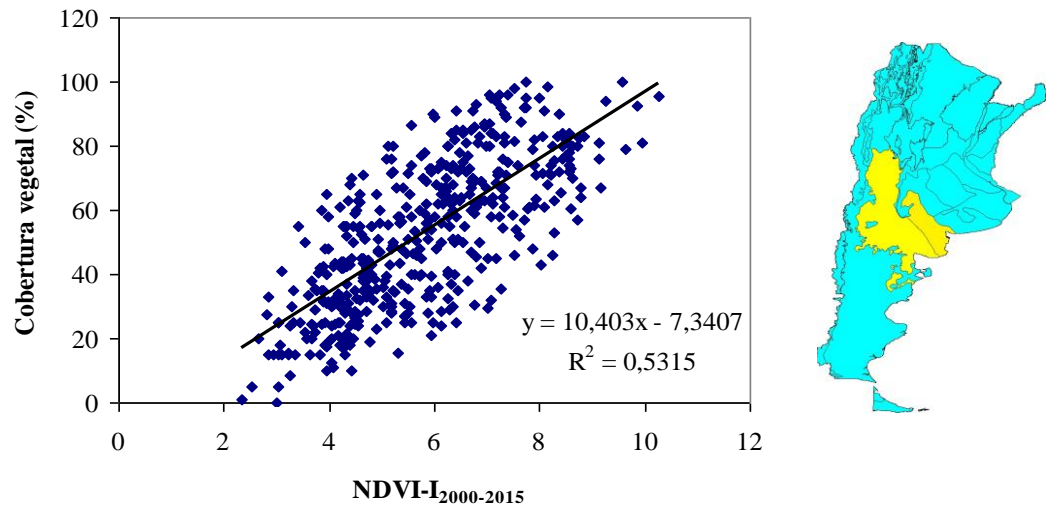
<b>Ecorregión</b>	<b>N° de sitios con datos de cob. vegetal</b>	<b>Referencia</b>
Altos andes	9	Baldassini (2010)
Chaco árido	5	Camardelli (inédito)
	10	Gatica (2015)
	7	Presente estudio
Chaco semiárido	31	Camardelli (inédito)
	2	Gatica (2015)
	3	Presente estudio
Espinal	4	Torres Robles <i>et al.</i> (2015)
	3	Red MARAS (Oliva <i>et al.</i> , 2011)
Estepa patagónica	2	Torres Robles <i>et al.</i> (2015)
	40	Gaitán, Siffredi y Ayesa (inédito)
	264	Red MARAS (Oliva <i>et al.</i> , 2011)
	41	Soria (2016)
Monte de llanuras y mesetas	44	Torres Robles <i>et al.</i> (2015)
	25	Gaitán, Siffredi y Ayesa (inédito)
	53	Gatica (2015)
	52	Red MARAS (Oliva <i>et al.</i> , 2011)
	4	Presente estudio
	287	Soria (2016)
Monte de sierras y bolsones	46	Presente estudio
	5	Aranda-Rickert (inédito)
	12	Soria (2016)
Puna	170	Baldassini (2010)



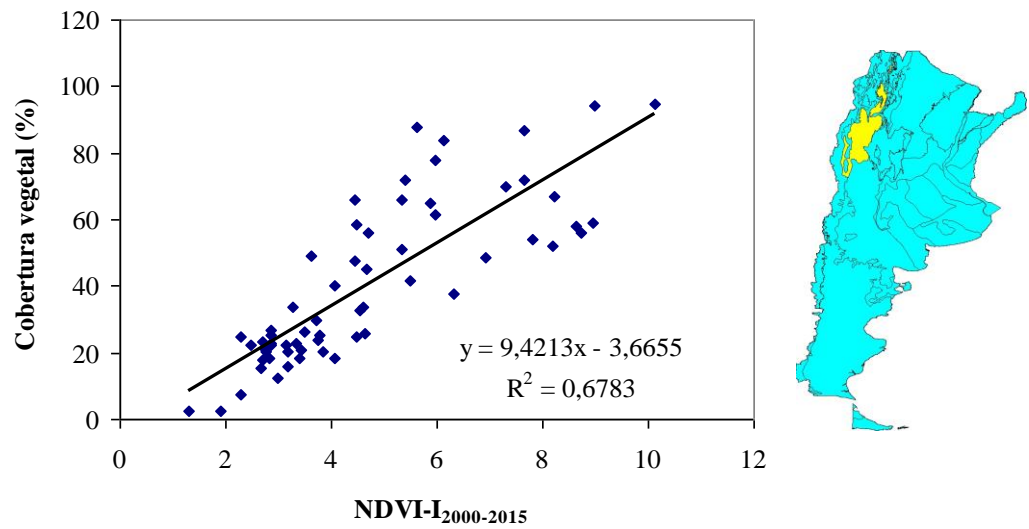
**Figura 5.** Relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo en las ecorregiones de Chaco árido, Chaco semiárido y Chaco Serrano.



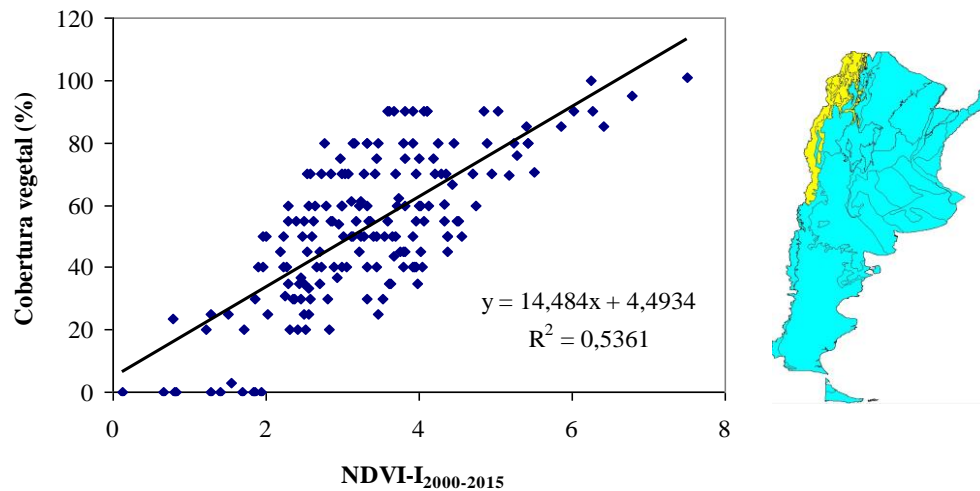
**Figura 6.** Relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo en la ecorregión Estepa patagónica.



**Figura 7.** Relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo en la ecorregión Monte de llanura y mesetas y en el sector sur de la ecorregión del Espinal.

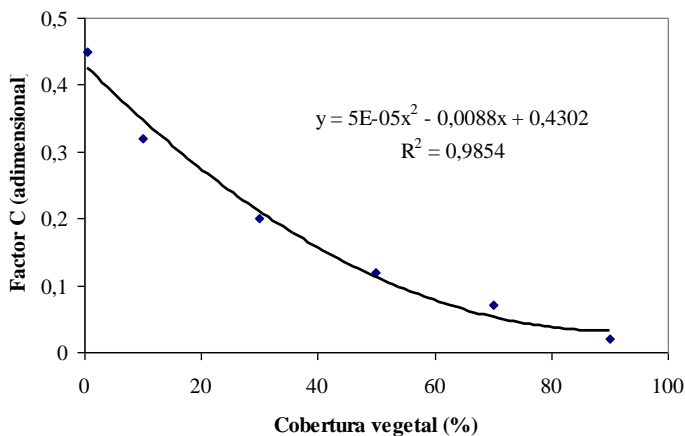


**Figura 8.** Relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo en la ecorregión Monte de sierras y bolsones.



**Figura 9.** Relación entre NDVI-I<sub>2000-2015</sub> y la cobertura vegetal estimada o medida a campo en las ecorregiones de Puna, Altos andes y Pastizales de neblina.

Una vez obtenidos los mapas de cobertura vegetal para cada ecorregión se calculó el factor C, de acuerdo al siguiente modelo (FAO, 1980; Figura 10).



**Figura 10.** Modelo que relaciona la cobertura vegetal en pastizales naturales y el Factor C (FAO, 1980).

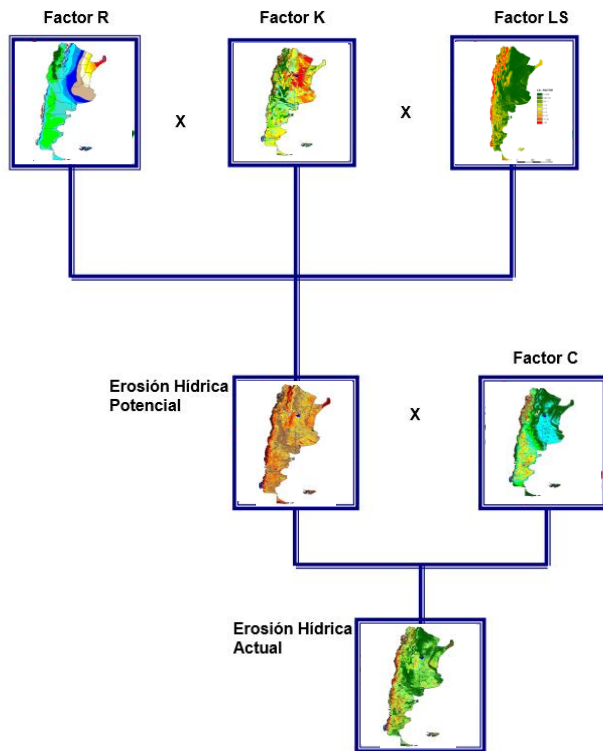
### 2.1.5. Factor P

El Factor P hace referencia a prácticas de manejo conservacionistas en áreas principalmente agrícolas tales como cultivos en terrazas, curvas de nivel, etc. Dado que no se cuenta con un mapa, a escala nacional, que muestre las áreas donde existen este tipo de prácticas de manejo, este factor de la ecuación no fue considerado.

### 2.1.6. Integración de los Factores de la ecuación

Mediante el modulo "Modeler" del software ERDAS Imagine 9.2 se realizó el producto de los distintos factores de la USLE a fin de obtener los mapas de Erosión Hídrica Potencial y de Erosión Hídrica Actual (Figura

11).



**Figura 11.** Diagrama de la integración de los factores de la USLE para la obtención de los mapas de Erosión Hídrica Potencial y de Erosión Hídrica Actual.

### 2.1.7. Validación

La cantidad de sedimentos en suspensión (CSS) que transportan los cursos de agua es un indicador de la erosión de los suelos de las cuencas hidrográficas (Owens *et al.*, 2005). Por lo tanto, como una forma de validar nuestro mapa de erosión hídrica de los suelos, se podría analizar la relación entre la tasa de erosión media en varias cuencas del país y la cantidad de sedimentos que transportan los ríos de dichas cuencas. Lamentablemente no

contamos con datos medidos *in situ* de CSS. Sin embargo, varios estudios han utilizado datos de sensores remotos como indicadores de CSS (por ej. Ritchie y Schiebe, 2000; Miller y McKee, 2004; Gin *et al.*, 2003; Ma y Dai, 2005; Doxaran *et al.*, 2002). Esto es posible dado que los sedimentos en suspensión provocan una elevación de la reflectividad del agua (principalmente en las regiones Visible e Infrarrojo Cercano -IRC- del espectro electromagnético). De esta manera, varios estudios han hallado fuertes correlaciones positivas entre CSS y la reflectancia en el IRC obtenida de imágenes satelitales como Landsat ETM+ (por ej. Ritchie *et al.*, 1990). Además, el cociente de bandas de la región del Visible y del IRC también han mostrado relaciones significativas con CSS, por ejemplo, Bhatti *et al.* (2008) propusieron el cociente  $(\text{Rojo} + \text{IRC}) / (\text{Rojo} / \text{IRC})$  como un buen indicador de CSS.

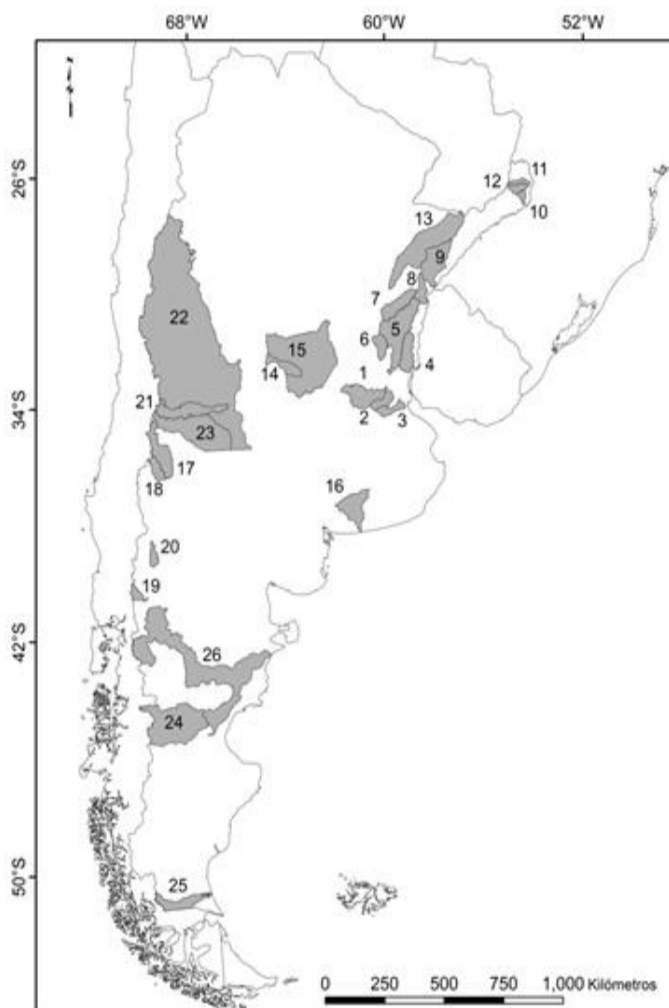
Se utilizó la plataforma Google Earth Engine para elaborar un mosaico de imágenes satelitales libre de nubes del territorio de la República Argentina del sensor Sentinel 2, que cuenta con una resolución espacial de 10 metros. El mosaico se elaboró con imágenes comprendidas entre el 1 de julio de 2015 (fecha de inicio de la misión Sentinel 2) y el 30 de abril de 2017; está conformado por la mediana de la reflectancia de las bandas 2 (porción del azul del espectro electromagnético), 3 (verde), 4 (rojo), 5 (Borde rojo 1), 6 (Borde rojo 2), 7 (Borde rojo 3) y 8 (IRC). Sobre este mosaico se identificaron 26 ríos y en cada uno de ellos se ubicaron 10 puntos (pixeles) sobre el cauce de los cuales se extrajeron los datos de reflectancia del agua de las bandas mencionadas

anteriormente. Se utilizó el mapa de cuencas hidrográficas de la República Argentina (Instituto Nacional del Agua, 2010) para definir la cuenca de cada uno de los 26 ríos (Figura 12).

Se calculó un índice de erosión hídrica (IEH) de cada cuenca mediante la ponderación de cada clase del mapa de erosión por la proporción relativa que ocupa la clase en la cuenca:

$$\text{IEH} = 1 \times \text{proporción clase 1} + 2 \times \text{proporción clase 2} + 6 \times \text{proporción clase 6}$$

Se analizó la relación, mediante análisis de regresión, entre el IEH y la reflectancia del agua de las distintas bandas del mosaico de imágenes Sentinel. Se hipotetiza que una mayor tasa de erosión de los suelos de la cuenca (valores elevados de IEH) produce una mayor CSS en los ríos, lo cual resulta en altos valores de reflectancia del agua en las bandas del visible y IRC.



**Figura 12.** Cuencas Hidrográficas. 1: Río Arrecifes. 2: Río Areco. 3: Río Luján. 4: Río Gualeguaychú. 5: Río Gualeguay. 6: Río Nogoyá. 7: Río Feliciano. 8: Río Mocoretá. 9: Río Tuyu-Ne. 10: Río Soberbio. 11: Río Piray Mini. 12: Río Piray Guazú. 13: Río Corrientes. 14: Río Cuarto. 15: Río Tercero. 16: Río Quequén. 17: Río Grande. 18: Río Barrancas. 19: Río Limay. 20: Río Catan Lil. 21: Río Diamante. 22: Río Desaguadero. 23: Río Atuel. 24: Río Senguer. 25: Río Gallegos. 26: Río Chubut.

### **2.1.8. Tolerancia a la pérdida de suelos**

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

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

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

El clima se clasificó en 5 clases de acuerdo al índice de aridez (IA), definido como

el cociente entre las precipitaciones y la evapotranspiración potencial: Árido (IA < 0,20), Semiárido (IA 0,20 – 0,5), Subhúmedo-seco (IA 0,5 – 0,65), Subhúmedo-húmedo (IA 0,65 – 1,0), Húmedo (IA > 1).

La profundidad del suelo se clasificó en las siguientes 5 clases, que se obtuvo de la profundidad del suelo dominante de las Unidades Cartográficas del Atlas de Suelos de la República Argentina, escala 1:500.000 y 1:1.000.000, 1990): menor a 25 cm, 25 – 50 cm, 50 – 100 cm, 100 – 150 cm, mayor a 150 cm.

En la Tabla 5 se muestran los valores de tolerancia de pérdida de suelo considerados en este estudio, de acuerdo al régimen climático y la profundidad del suelo. Con estos valores de tolerancia se elaboró un mapa que muestra las áreas que poseen una tasa de pérdida de suelo estimada superior a dicha tolerancia.



**Tabla 5.** Tolerancia de pérdida de suelo (t/ha/año) de acuerdo al régimen climático y la profundidad del suelo.

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

### 3. RESULTADOS

El factor R de erosividad de las precipitaciones mide la potencialidad de las lluvias para provocar erosión. Se observa un patrón general de disminución del R de este a oeste en el centro-norte del país y un patrón inverso en la región de la Patagonia (Figura 13).

El factor K de erodabilidad de los suelos en la República Argentina se muestra en la Figura 14. En general, los valores más elevados del factor K corresponden a suelos de texturas intermedias (limosos, franco-limosos, franco-arenoso muy finos, areno-franco muy finos y arenosos muy finos) y con bajo contenido de materia orgánica (menor al 2%). Estos suelos, cuyo factor K es mayor a 0,40, representan el 22,3% del territorio nacional y se concentran en las provincias de Santa Fe, Córdoba, Formosa, Chaco, Buenos Aires y Entre Ríos. Los suelos de texturas intermedias son más erodables que los suelos de texturas gruesas (donde tiende a predominar la infiltración del agua en el perfil del suelo) y que los de texturas finas (dado el rol de

la fracción arcilla como estabilizador de la estructura del suelo). Además, el contenido de materia orgánica cumple un rol importante ya que también contribuye a proporcionar mayor estabilidad a la estructura del suelo, y por lo tanto a mayor contenido de materia orgánica el suelo es más resistente al impacto de las gotas de lluvia. Por otra parte, este mapa permite identificar los suelos, que al ser más erodables, necesitan mayor protección ya sea manteniéndolos cubiertos, con prácticas que propicien el aumento del contenido de materia orgánica o mediante la sistematización de tierras como por ejemplo el cultivo en terrazas.

El 68,5% de la superficie del país corresponde a bajas pendientes, en longitud y grado, con valores del factor topográfico LS inferiores a 1, indicando que son zonas planas (Figura 15). Los valores más bajos de LS se concentran en la llanura pampeana y en la ecorregión del Chaco, mientras que los valores más elevados se encuentran en la cordillera de los Andes y otros sistemas serranos.

El factor C de cobertura y manejo de cultivos y residuos, es un factor adimensional, que proporciona la pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua. En el mapa del factor C (Figura 16) se observa que el 35% de la superficie del país se encuentra por debajo de 0,10 de factor C, lo cual indica alta cobertura del suelo. Estas áreas se corresponden, fundamentalmente, con bosques y pastizales naturales de las regiones húmedas y subhúmedas del país. Cabe destacar que algunas de esas zonas como la Selva Misionera y la Selva de Yungas que se encuentran con alta cobertura vegetal (bajos valores del factor C) coinciden con valores elevados de R (700 a 1000 en Yungas y 1000 a 1500 en Selva Misionera) y de LS (mayores a 20 en Yungas y de 5 a 10 en Selva Misionera) y valores moderados de K (rango de 0,30 a 0,40) con lo

cual es necesario conservar esos niveles de cobertura ya que afectando el factor C, se podrían desencadenar procesos graves de erosión hídrica. Esto se puede visualizar mediante la comparación de los mapas de Erosión Actual y Erosión Potencial (Figuras 17 y 18, respectivamente) donde se observa que estas regiones presentan, en la mayor parte de su superficie, bajos valores de erosión actual (menor a 2 t/ha/año) y muy altos valores de erosión potencial (mayor a 500 t/ha/año). Por otra parte, los valores más elevados del factor C se encuentran en las regiones áridas y semiáridas del país (principalmente las ecorregiones de Estepa Patagónica, Puna, Monte de llanuras y mesetas y Monte de sierras y bolsones), donde debido a la escasez de agua, la vegetación no cubre totalmente el suelo.

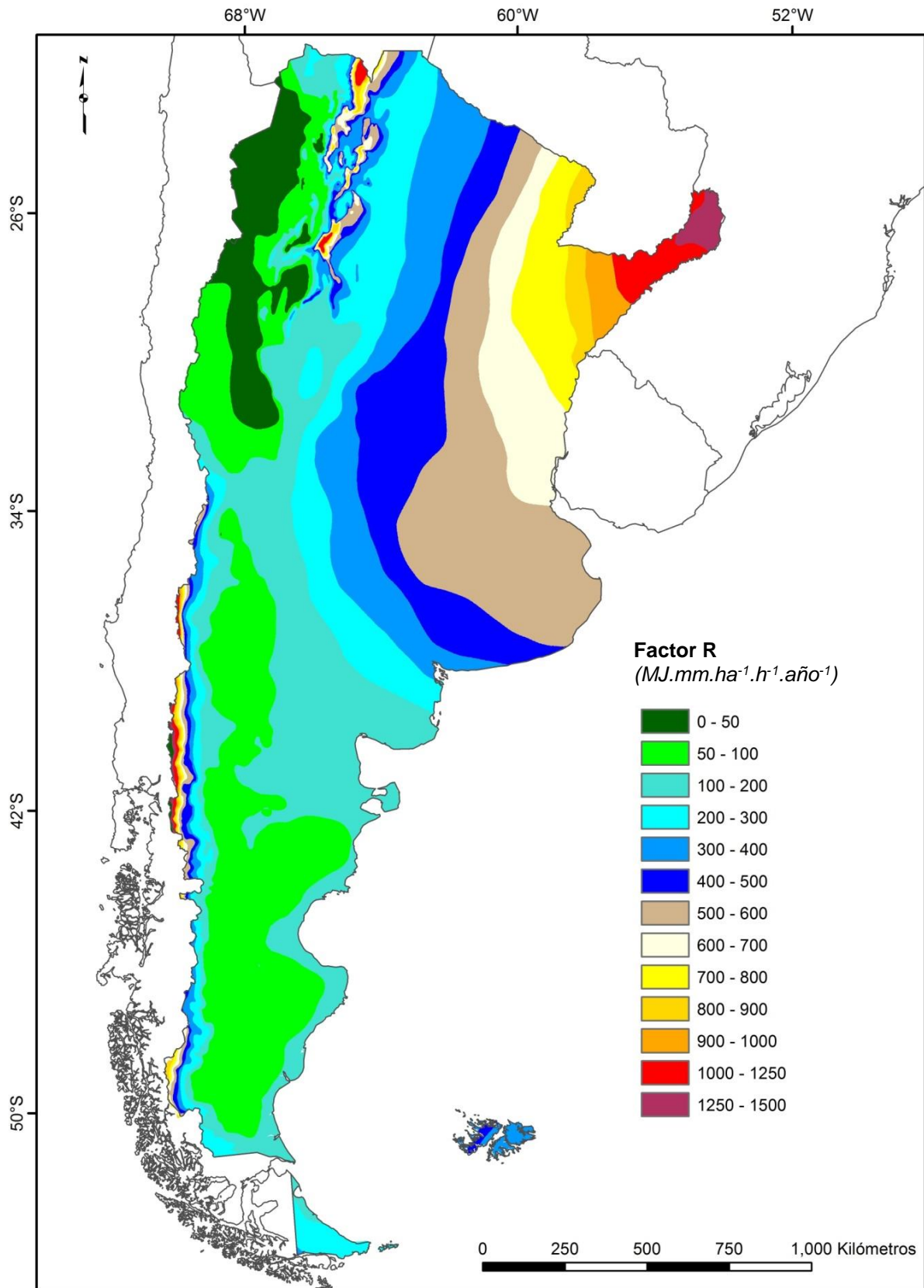


Figura 13. Factor de erosividad de las lluvias (R) en la República Argentina.

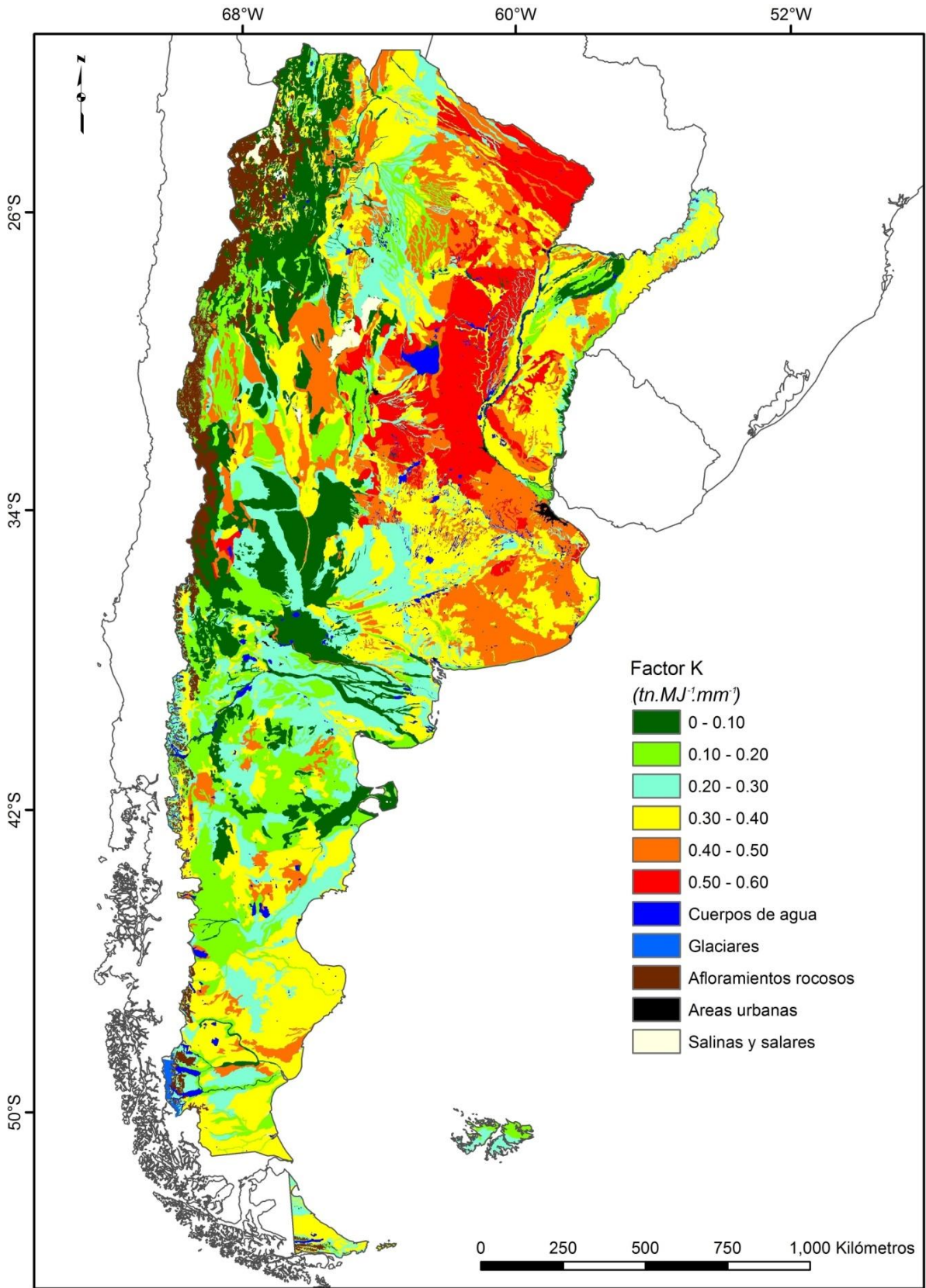
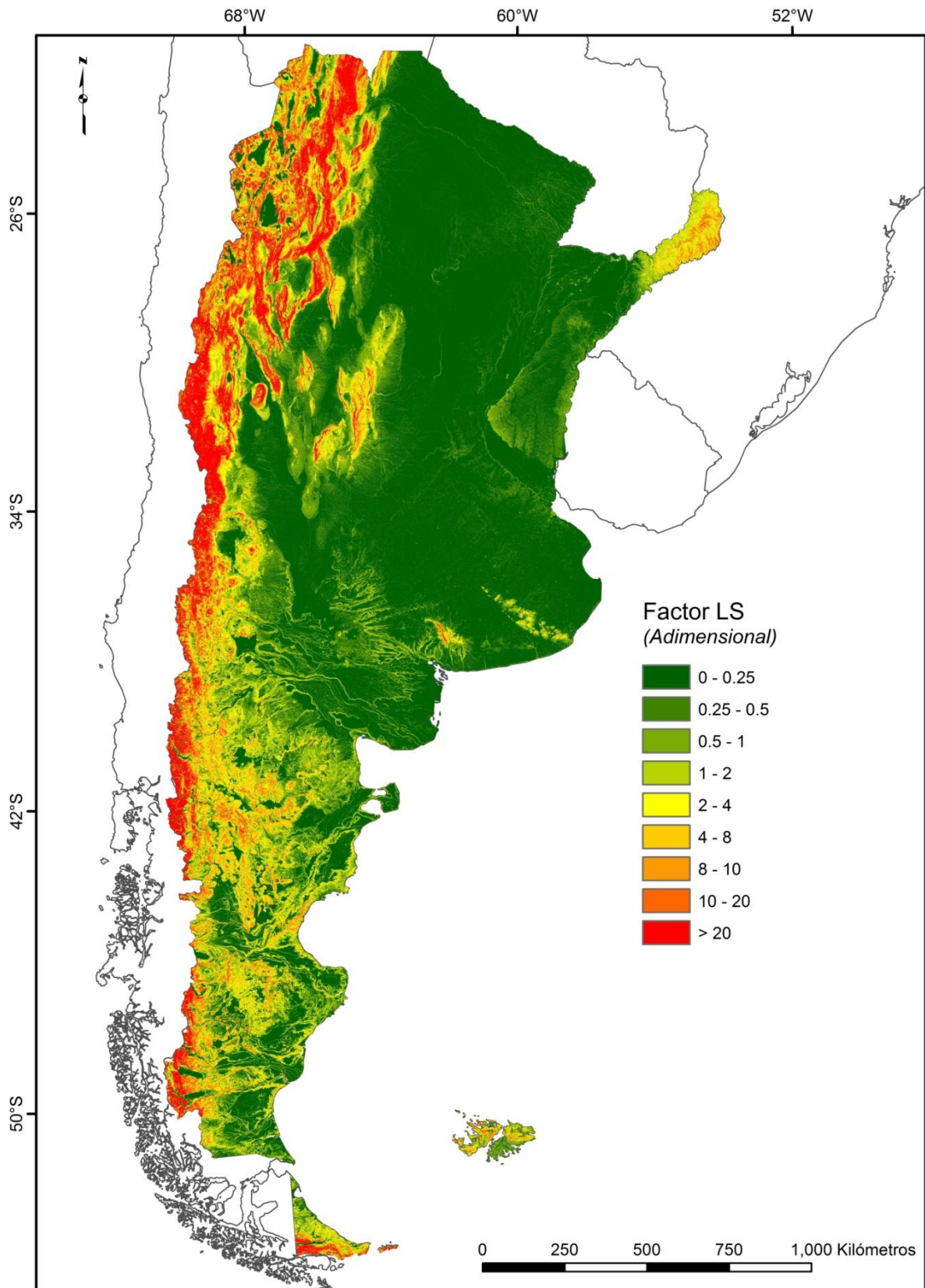


Figura 14. Factor de erodabilidad del suelo (K) en la República Argentina.



**Figura 15.** Factor topográfico (LS) en la República Argentina.

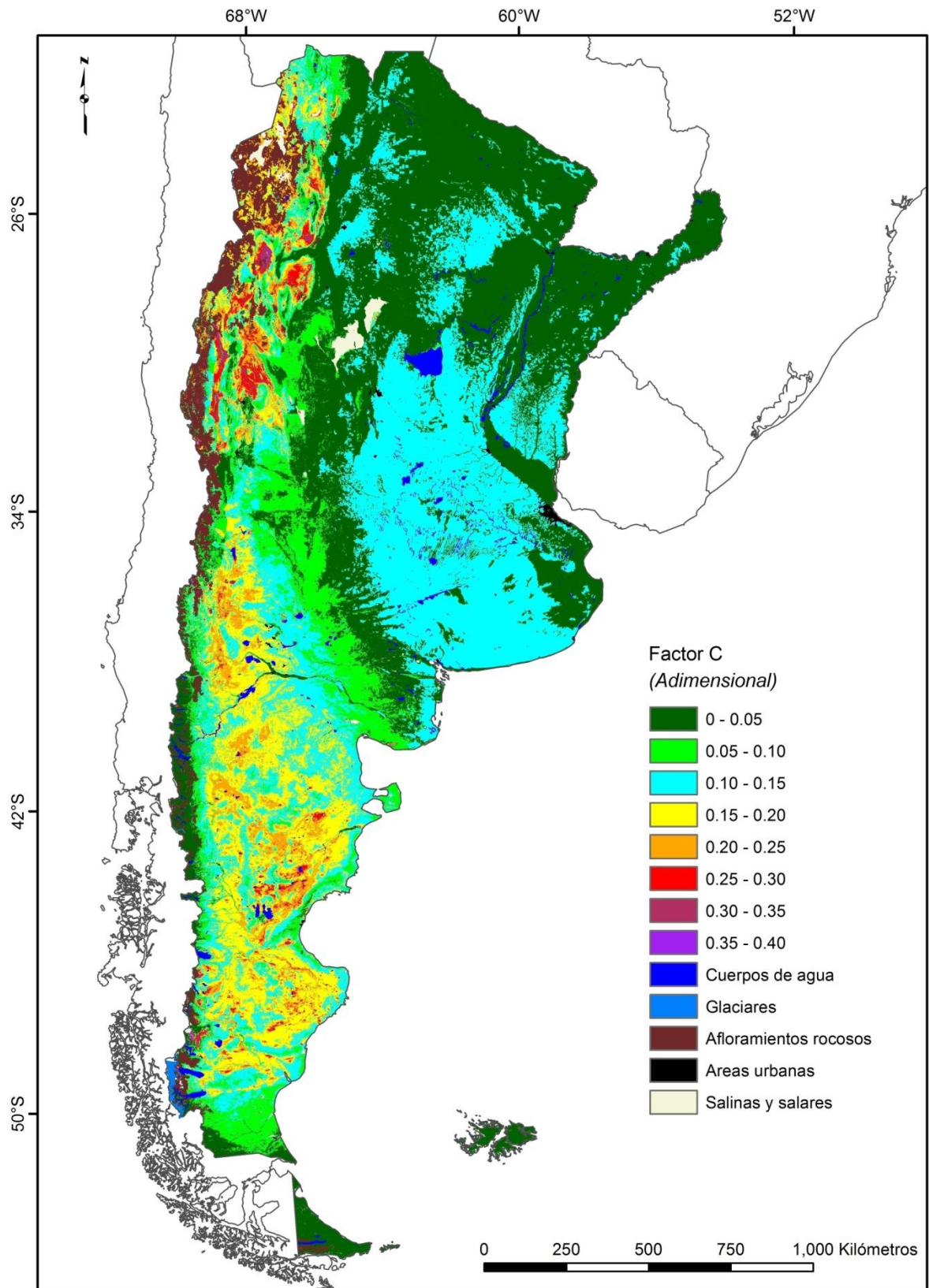


Figura 16. Factor de cobertura del suelo (C) en la República Argentina.

En la Figuras 17 y 18 se presentan los mapas de Erosión Hídrica Actual y Erosión Hídrica Potencial, respectivamente.

La tasa media de erosión hídrica actual para el territorio nacional se calculó en 6,2 t/ha/año, lo cual equivale a una pérdida de una capa de aproximadamente 0,5 milímetros de suelo por año (considerando una densidad aparente promedio de 1,2 t/m<sup>3</sup>). Dado que la superficie de la República Argentina es de aproximadamente 278 millones de hectáreas, dicha tasa equivaldría a una pérdida de 1725 millones de toneladas o 1490 millones de metros cúbicos de suelo por año. Aproximadamente un 60% de la superficie del país presenta bajas tasas de erosión (menor a 2 t/ha/año), la mayor parte de estas áreas se corresponden con áreas húmedas/subhúmedas del país con alta cobertura vegetal: los bosques de la región chaqueña y los bosques andinopatagónicos, las selvas Misionera y de Yungas, los pastizales naturales de Corrientes, la cuenca del Río Salado y del delta del Paraná. Aproximadamente un 12% de la superficie del país presenta tasas altas de erosión (mayor a 10 t/ha/año), las cuales se concentran en zonas áridas/semiáridas con fuertes pendientes y baja cobertura vegetal de la Patagonia, Cuyo y el NOA. En las regiones húmedas/subhúmedas se encuentran áreas con altas tasas de erosión en las zonas con mayores pendientes: sierras de Tandilia y Ventania y la Pampa Ondulada en la provincia de Buenos Aires, las sierras de Córdoba, el sur de Entre Ríos y áreas desmontadas de Misiones.

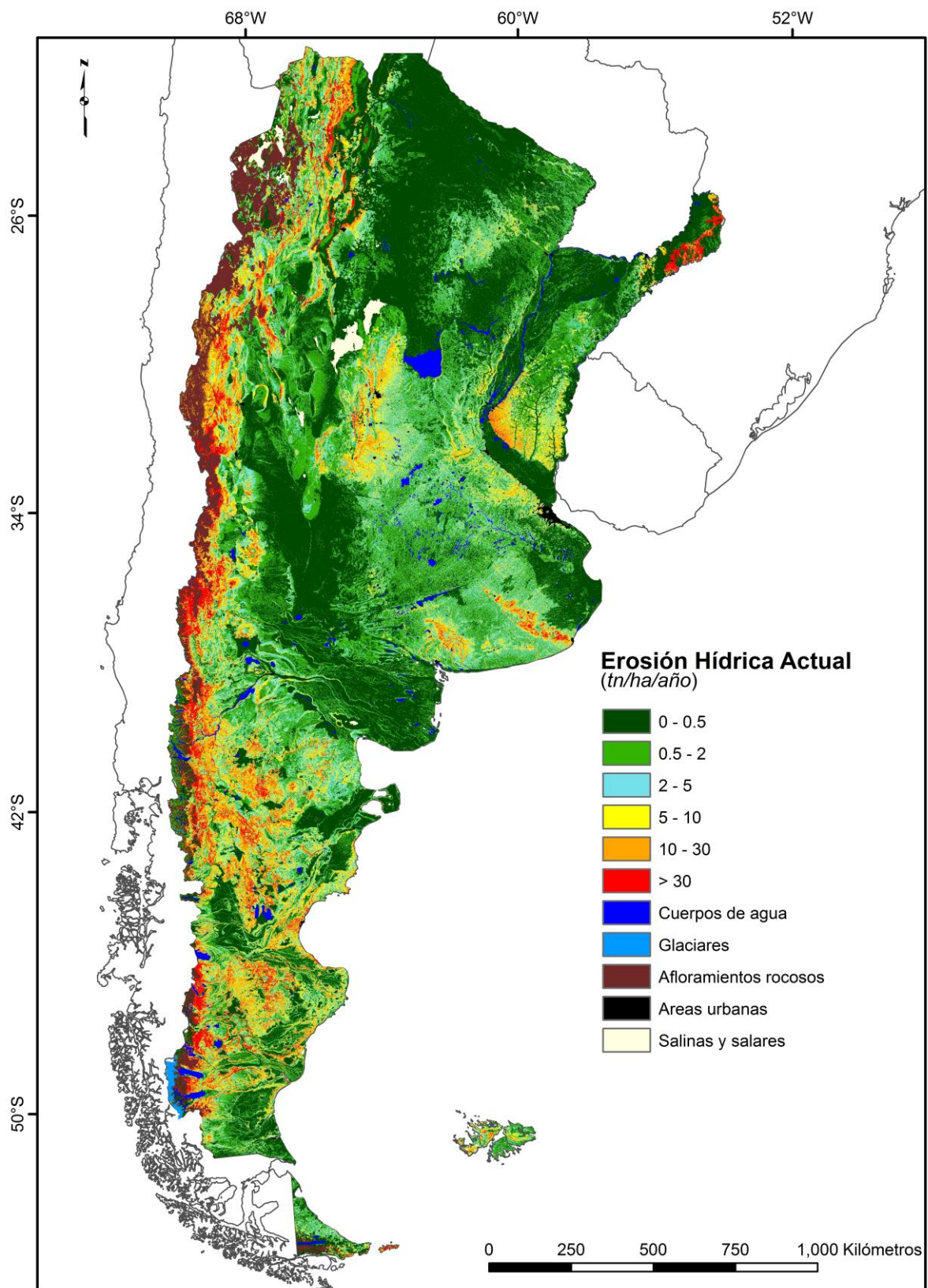
La erosión potencial estima la máxima tasa de pérdida de suelo que ocurriría si se elimina la totalidad de la cobertura vegetal. La

tasa media de erosión hídrica potencial para el territorio nacional se calculó en 166 t/ha/año, lo cual equivaldría a una pérdida de una capa de aproximadamente 1,2 centímetros de suelo por año (considerando que debido a la pérdida de vegetación la densidad aparente promedio aumenta a 1,4 t/m<sup>3</sup>). De acuerdo a la clasificación de FAO (1980) (Tabla 6), casi un 40% de la superficie del país presenta una tasa de erosión hídrica potencial leve (menos 10 t/ha/año). Estas áreas se encuentran en zonas planas y con precipitaciones medias a bajas: Chaco semiárido y zonas planas de la ecorregión del Monte y de la estepa Patagónica. Mientras que alrededor de un 10% del territorio presenta tasas de erosión potencial muy altas (mayores a 200 t/ha/año) (Tabla 6). Las áreas con mayor erosión potencial se ubican en zonas con fuertes pendientes y altas precipitaciones: provincia de Misiones, zonas próximas al sector sur de la cordillera de los Andes, la región de la selva de Yungas y los sistemas serranos de Córdoba, San Luis y Buenos Aires.

**Tabla 6.** Porcentaje de la superficie de la República Argentina de acuerdo a la clase de erosión hídrica potencial según FAO (1980).

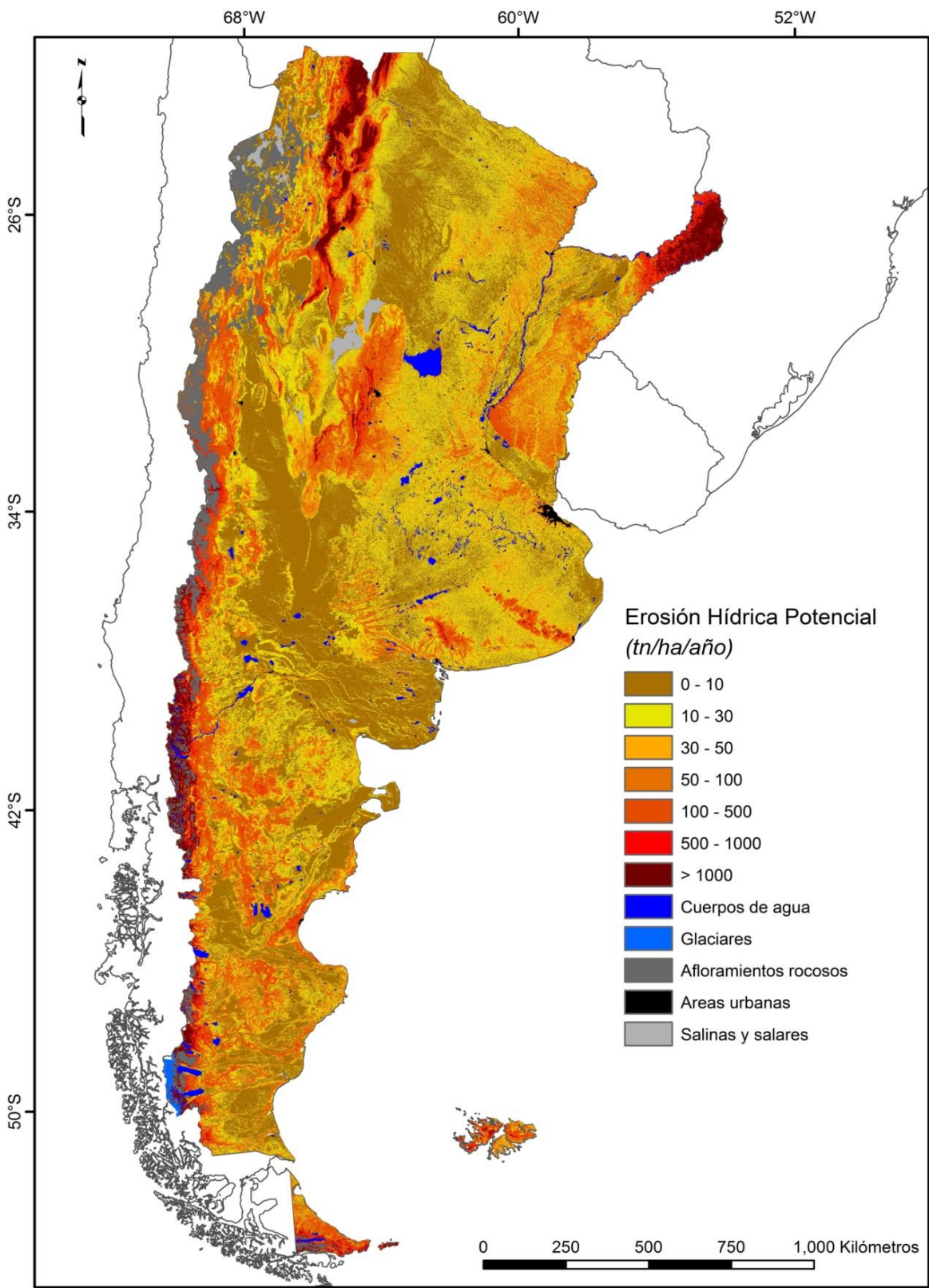
<b>Grado de erosión</b>	<b>t/ha/año</b>	<b>% de la superficie nacional</b>
Leve	10	39,7
Moderada	10 - 50	33,9
Alta	50 - 200	17,3
Muy alta	> 200	9,1

En el Anexo se presentan los mapas de erosión hídrica actual y potencial para cada provincia.



**Figura 17.** Erosión hídrica actual calculada con la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en la República Argentina.





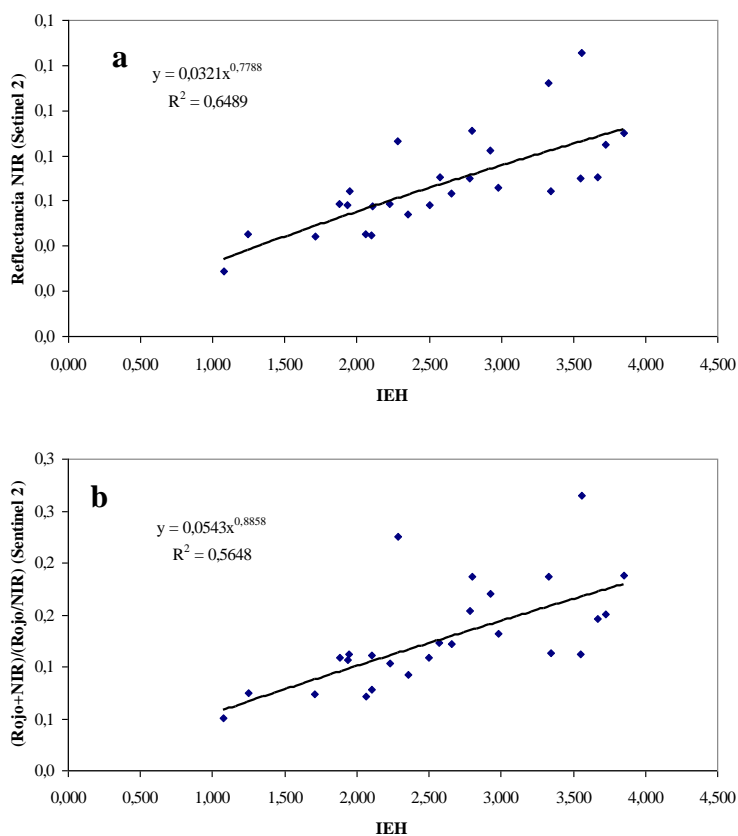
**Figura 18.** Erosión hídrica potencial calculada con la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en la República Argentina

## Tolerancia a la pérdida de suelo

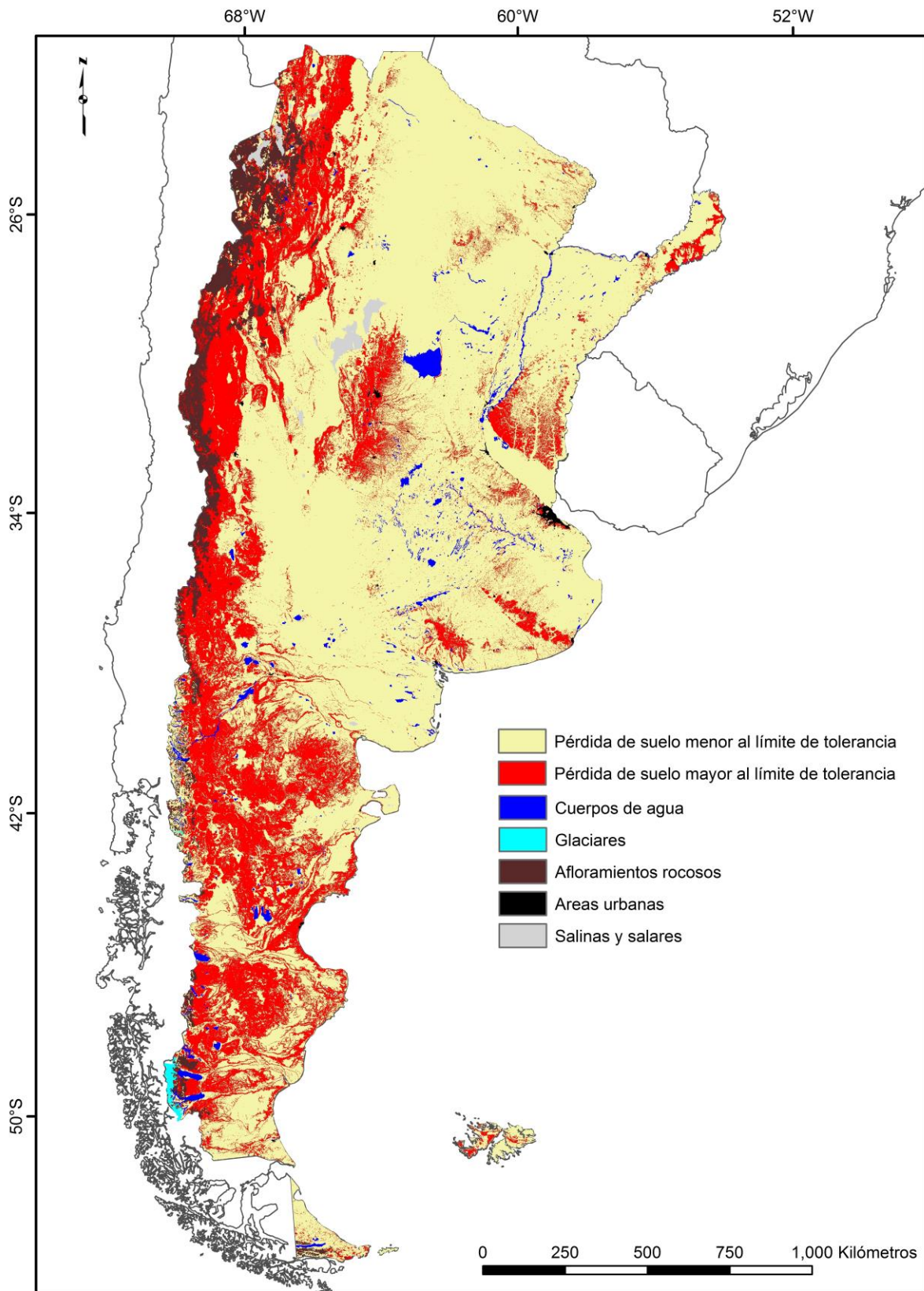
En el mapa de la Figura 19 se muestran las áreas con una tasa de pérdida de suelo estimada que supera el límite de tolerancia definido en la Tabla 5 en función del régimen de humedad y de la profundidad del suelo. De acuerdo a este mapa el 25,9% del territorio nacional (alrededor de 72 millones de hectáreas) presenta tasas de erosión hídrica que superan los valores tolerables. Este valor es similar al 23,2% de la superficie nacional que está afectado por procesos de erosión hídrica según Casas (2015).

## Validación

Se hallaron relaciones positivas entre el Índice de Erosión Hídrica (IEH) de las cuencas y la reflectancia del agua de los ríos en la banda infrarrojo cercano (IRC) (Figura 20a) y con la relación entre las bandas (Rojo+IRC)/(Rojo/IRC) (Figura 20b). Esto indica que a mayor pérdida de suelo estimada en las cuencas, mayor es la carga de sedimentos en suspensión que transportan los ríos. Esto permitiría inferir que el mapa de erosión hídrica elaborado en el presente estudio es un buen estimador de la pérdida de suelos.



**Figura 20.** Relación entre el Índice de Erosión Hídrica (IEH) y la reflectancia del agua de los ríos en la banda Infrarrojo cercano (IRC) (a) relación de bandas (Rojo+IRC)/(Rojo/IRC) (b) (sensor Sentinel 2) en 26 cuencas de la República Argentina.



**Figura 19.** Áreas con erosión hídrica que supera el límite de tolerancia (en rojo).

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

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

Se puede medir el impacto económico de la degradación de los suelos analizando diferentes aspectos: a) pérdida por disminución de la productividad a nivel predial; b) costo asociado a la mitigación, restauración o recuperación del predio y c) costo social del daño fuera del predio (involucra al estado).

Una aproximación para estimar la pérdida económica debido a la disminución de la productividad del suelo a causa de la erosión es determinar la tasa de erosión del suelo, la disminución del rendimiento de los cultivos por unidad de pérdida de suelo y, finalmente, ponderar la pérdida de rendimiento por el precio de los granos (Cotler *et al.*, 2011).

Irurtia y Mon (2000) evaluaron el rendimiento de soja, maíz y trigo en 184 sitios de muestreo y observación y con diferente nivel de pérdida del horizonte superficial debido a la erosión hídrica en la región de la Pampa Ondulada. De acuerdo a sus resultados la soja disminuye su rendimiento en 95 kg/ha por cada centímetro de suelo perdido, el rendimiento de maíz disminuye 273 kg/ha/cm y el de trigo 71 kg/ha/cm.

La tasa media de erosión hídrica actual en el área de cultivos agrícolas de Argentina (Fig. 21), de acuerdo a nuestro estudio, es

equivalente a 3,91 t/ha/año. Tomando como referencia para toda el área agrícola una densidad aparente media de 1,2 t/m<sup>3</sup> (valor considerado para región Pampeana), esta tasa se correspondería con la pérdida de una capa de 0,033 cm de suelo por año, de acuerdo a los cálculos mostrados a continuación:

$$\begin{aligned} 3,91 \text{ t/ha/año} \div 1,2 \text{ t/m}^3 &= 3,258 \text{ m}^3/\text{ha/año} \\ 3,258 \text{ m}^3/\text{ha/año} \times 1\text{ha}/10000 \text{ m}^2 &= \\ 3,258 \cdot 10^{-4} \text{ m/año} &\Rightarrow 0,033 \text{ cm/año} \end{aligned}$$

Considerando los valores precedentes, el impacto de la erosión hídrica sobre el rendimiento de los principales cultivos podría ser estimado mediante:

$$R = A \times B$$

donde,

R=disminución rendimiento

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

B= pérdida de suelos por erosión (cm)

Así, la pérdida de rendimiento para cada cultivo sería:

Soja = 3,14 kg/ha/año

Maíz = 9,00 kg/ha/año

Trigo = 3,34 kg/ha/año

Teniendo en cuenta la superficie sembrada en la campaña 2015/2016 de estos tres cultivos: 19.500.000 has, 5.350.000 has y 5.550.000 has (soja, maíz y trigo respectivamente) (Ministerio Agroindustria, 2017), y la pérdida de rendimiento por hectárea

para cada cultivo, la pérdida de producción resultaría en:

Soja = 19.500.000 has × 3,14 kg/ha/año = 61.230 toneladas

Maíz = 5.350.000 has × 9,00 kg/ha/año = 48.150 toneladas

Trigo = 5.550.000 has × 3,34 kg/ha/año = 18.550 toneladas

Al considerar para la soja un valor de 340 U\$/t; para maíz un valor de 130 U\$/t y para trigo un valor de 150 U\$/t (según Bolsa de Cereales, septiembre de 2017), la pérdida en términos económicos ascendería a:

Soja = 61.230 toneladas × 340 U\$/t = U\$S 20.820.000

Maíz = 48.150 toneladas × 130 U\$/t = U\$S 6.260.000

Trigo = 18.550 toneladas × 150 U\$/t = U\$S 2.785.000

**Pérdida Total = 29,9 millones U\$/año**

Tomando como referencia este valor, y a iguales condiciones de precios y superficies sembradas, las pérdidas económicas acumuladas al término de 10 años ascenderían a **U\$S 1.645 millones**

En ciertas zonas de la región agrícola del país, el grado y longitud de las pendientes hace necesaria la construcción de terrazas como una práctica de manejo adecuada para reducir las pérdidas ocasionadas por la erosión hídrica. Esta práctica surge a partir del concepto que al acortar el largo de la pendiente del terreno, el

agua que escurre no alcanza la velocidad y energía cinética necesaria para remover y transportar partículas de suelo. La sistematización de tierras por terrazas, divide a la cuenca en paños. Cada paño es un sector del terreno donde el agua escurre hacia una terraza. La superficie del paño conforma el área de captación de la terraza.

A continuación se presenta un cálculo estimado para identificar aquellas áreas donde sería factible recuperar la inversión realizada en la construcción de terrazas, a valores actuales y en un plazo de 10 años. Considerandos:

- El costo de las terrazas asciende a 136 U\$/ha, considerando un costo promedio de 4 quintales de soja por hectárea.

- Costo de oportunidad del capital invertido del 3% anual, similar a la tasa de interés ofrecida por el Banco de la Nación Argentina por plazos fijos en dólares.

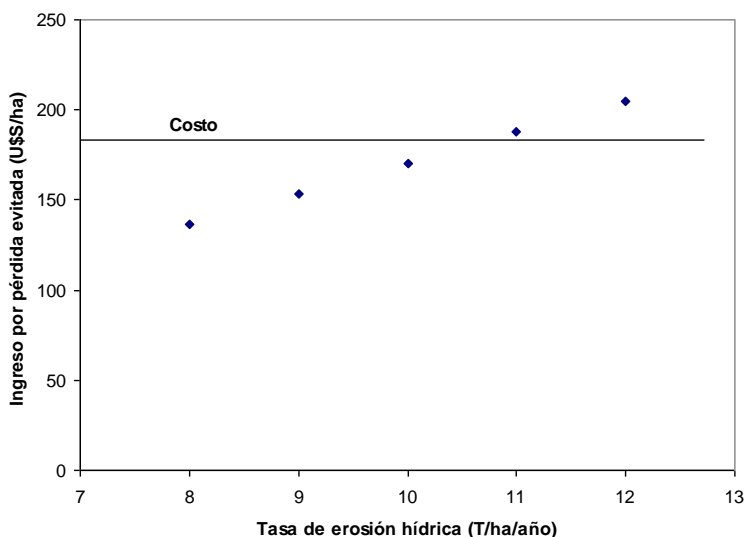
- Rotación de cultivos en el plazo de 10 años: 3 años de trigo/soja, 1 año de maíz, 3 años de trigo/soja, 1 año de maíz, 2 años de trigo/soja.

- Reducción de la tasa de erosión en un 90% por sistematización en terrazas.

Tomando la pérdida de rendimiento de los cultivos y los precios actuales de los granos, se calculó el ingreso que se obtendría al reducir las pérdidas por erosión y se comparó con el costo de la inversión. De acuerdo a estos cálculos, a partir de una tasa de erosión de 11 t/ha/año se recuperaría la inversión en un plazo de 10 años (Figura 20). El área agrícola con tasas que superan las 11 t/ha/año se muestra en la Figura 21 y comprende aproximadamente 4 millones

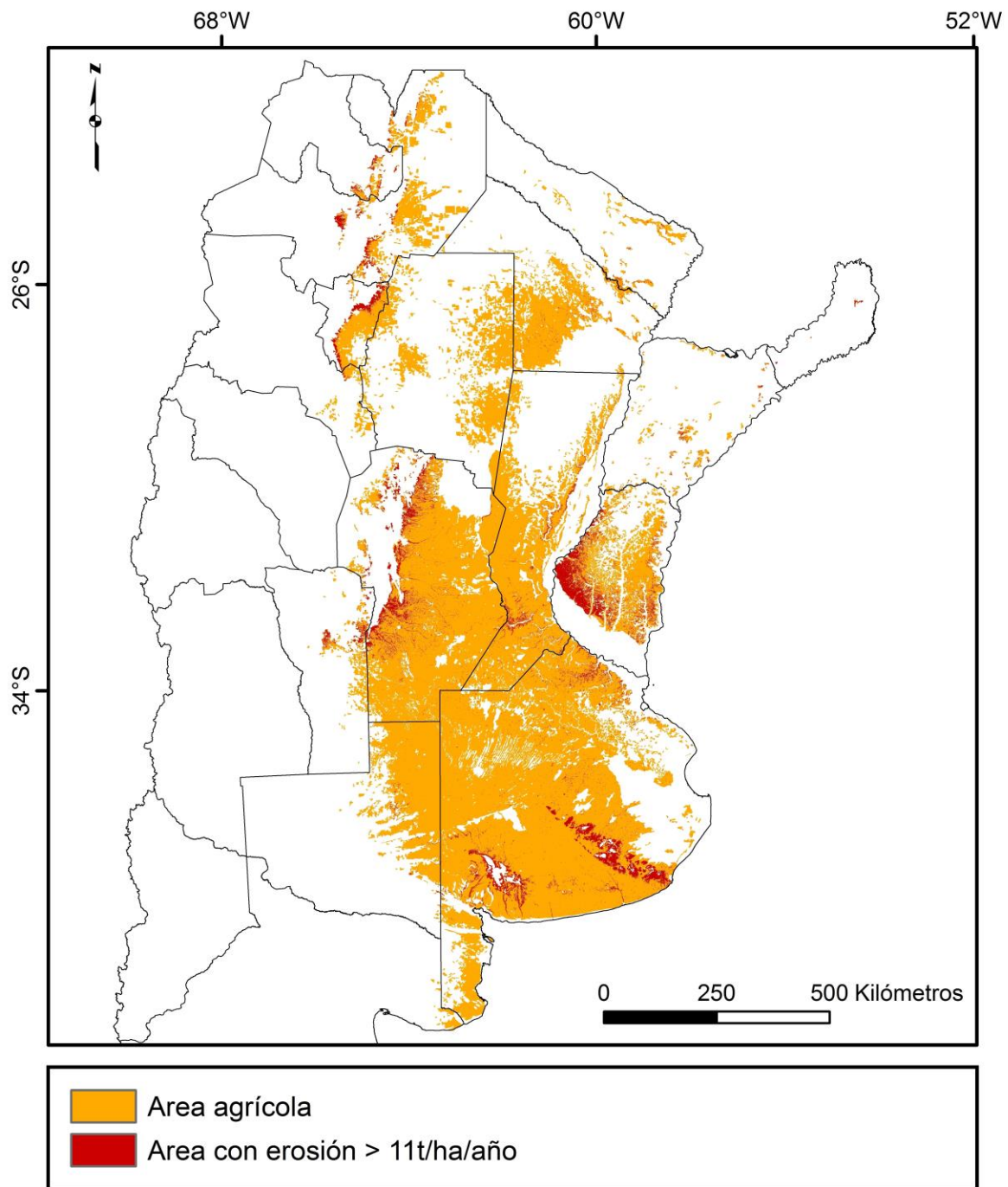
de hectáreas, donde sería recomendable la realización de cultivos en terrazas. Según Panigatti (2015), en el área agrícola analizada habrían 760.000 has sistematizadas, de las cuales 350.000 has corresponden a Salta, 270.000 has a Entre Ríos, 100.000 a Córdoba y 38.400 has sistematizadas a Jujuy. Esta cifra, no oficiales, puede considerarse como una subestimación por no estar contar con datos de la provincia de Buenos Aires. A pesar de esto, aún se estaría muy lejos de alcanzar las 4 millones de has que sería recomendable sistematizar para controlar los procesos de erosión.

sistematización de tierras tiene importancia y función no solo en la conservación de suelo y agua, sino en la biodiversidad de los ecosistemas, dado que hábitats lineales como bordes y terrazas, constituyen ambientes favorables para el desarrollo de poblaciones de artrópodos, anfibios y pequeños mamíferos, además de aumentar la diversidad de especies vegetales especialmente en las terrazas no sembrables.



**Figura 20.** Ingreso obtenido (U\$/ha), en 10 años, por disminución de las pérdidas de rendimiento de los cultivos debida a la erosión hídrica al realizar cultivos en terrazas La línea horizontal muestra el costo de la inversión, considerando un costo de oportunidad del capital del 3% anual durante 10 años.

Además de disminuir las pérdidas económicas, la reducción de la erosión hídrica influiría directa y positivamente sobre varios servicios ambientales, entre otros, regulación hídrica y secuestro de carbono. La



**Figura 21.** Áreas con tasas de erosión hídrica actual superiores a 11 t/ha/año (en rojo) dentro de la superficie agrícola del país (en anaranjado; según Volante *et al.*, 2009).

#### 4. CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para estimar la erosión hídrica actual y potencial de los suelos de la República Argentina. El estudio tiene una serie de limitaciones, dado que para aplicar la metodología original de la USLE a escala nacional, a menudo faltan los datos necesarios. Debido a esto, para calcular los factores que intervienen en la ecuación se han realizado diferentes aproximaciones. Por ejemplo, el factor de erosividad de las precipitaciones, cuyo cálculo preciso requiere datos de intensidad de las lluvias, se estimó a partir de la precipitación media anual. Esto puede subestimar la erosividad de las precipitaciones en zonas donde son frecuentes los eventos de lluvia de tipo torrencial, generalmente en las zonas áridas y semiáridas (como por ejemplo, la ecorregión del Monte). Otra limitación es que los datos del Atlas de Suelos, que se utilizaron para estimar el factor K, fueron relevados, en su mayor parte, hace más de 40-50 años. Por lo tanto, es de esperar que el contenido de materia orgánica de los suelos actualmente sea menor, principalmente en los suelos agrícolas. Esto haría que los valores actuales de K sean menores a los estimados, y por lo tanto, la tasa de erosión en los suelos agrícolas estaría subestimada (alrededor de un 5-10%). A pesar de estas limitaciones consideramos que los mapas de erosión hídrica actual y potencial reflejan adecuadamente, en forma cualitativa, las zonas con mayores y menores riesgos de erosión. La consistencia del mapa de erosión actual ha sido

mostrada en el ejercicio de validación realizado, donde se halló una relación positiva entre un índice semicuantitativo de erosión hídrica (derivado del mapa) en 26 cuencas hidrográficas del país y un indicador (derivado de sensores remotos) de la cantidad de sedimentos en suspensión que transportan los ríos.

En la República Argentina, la tasa media de erosión actual de los suelos, de acuerdo a nuestro estudio, es de aproximadamente 6 t/ha/año, que, globalmente para todo el territorio nacional, representan alrededor de 1500 millones de metros cúbicos de suelo o una capa de 0,5 milímetros de espesor que se pierden anualmente. Existen fuertes diferencias entre regiones del país: cerca del 60% del territorio presenta bajas tasas de erosión (menor a 2 t/ha/año); fundamentalmente en las regiones con alta cobertura vegetal de pastizales naturales, bosques y selvas. Mientras que alrededor de un 12% del territorio presenta tasas de erosión mayores a 10 t/ha/año, principalmente en las regiones áridas y semiáridas con fuertes pendientes y baja cobertura vegetal.

La erosión potencial, que es la máxima tasa de erosión que ocurriría si los suelos se mantuvieran desprotegidos sin cobertura vegetal, aumenta considerablemente hasta aproximadamente 170 t/ha/año en el promedio nacional.

En este estudio se proponen valores de tasas de erosión tolerables (que no comprometa la salud de los agroecosistemas) que varían entre 0,5 t/ha/año para suelos muy someros de regiones áridas hasta 10 t/ha/año para suelos profundos de regiones húmedas. De acuerdo a



estos límites de tolerancia, de acuerdo a nuestros resultados, aproximadamente un 26% del territorio nacional posee tasas de erosión que superan los valores admisibles.

Se realizó una estimación del posible impacto de la erosión de los suelos sobre el rendimiento de los 3 principales cultivos del país (soja, maíz y trigo). Según estos cálculos, la pérdida de suelo produce una disminución de los rendimientos que, a valores actuales, representan una pérdida de aproximadamente 30 millones de dólares. Este monto se agrega anualmente al impacto acumulado que la erosión hídrica ha tenido durante la historia de uso agrícola de los suelos (no estimada en este estudio).

Consideramos que los mapas generados son herramientas de utilidad para los organismos nacionales y provinciales encargados de gestionar el uso del territorio. Estos mapas podrían contribuir a generar políticas públicas basadas en la implementación de buenas prácticas agrícolas tendientes al ordenamiento y al manejo sustentable de los suelos. Además, son información de base a partir de la cual se pueden hacer proyecciones de la erosión hídrica de los suelos en diferentes escenarios de (1) cambio climático y (2) procesos de cambio en el uso de las tierras.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al INTA (a través de los proyectos: PNSUELOS 1134031 "Gestión de la Información de suelos", PNSUELO-1134022 "Degradación, conservación y manejo de suelos. Erosión hídrica y eólica" y PNNAT-1128035 "Observatorios de sustentabilidad rural") y al Observatorio Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación (ONDTyD) que cofinanciaron este trabajo. A Pablo Baldassini, Cristina Camardelli, Gabriel Gatica, Guadalupe Peter, Adriana Rickert y Darío Soria, quienes colaboraron con datos de cobertura vegetal para el cálculo del factor C de la USLE.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ALMOROX, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, M<sup>a</sup>. Gasco, J.M. 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Ed. Agrícola Española, 152 p.
- BALDASSINI, P. 2010. Caracterización fisonómica y funcional de la vegetación de la Puna mediante el uso de sensores remotos. Trabajo de Intensificación. Licenciatura en Ciencias Ambientales. Fac. Agronomía, Univ. Nac. Buenos Aires.
- BHATTI, A.M. 2008. Modelling and Monitoring of suspended Matter in Surface Waters Using Remotely Sensed Data. Special Course for International Students, Department of Engineering, Graduate School of Engineering, Kochi University of Technology, Kochi, Japan.

- BIANCHI, A.R.; Cravero, S.A.C. 2010. Atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Salta, Argentina.
- CASAS, R. 2015. La erosión del suelo en la Argentina. En: Degradación de Tierras en la República Argentina, R. Casas y G. Albarracín (ed.). Ed. FECIC. Tomo II 433-452.
- CISNEROS, J.; Cholaky, C.; Gutiérrez, A.C.; González, J.; Reynero, M.; Diez, A.; Bergesio, L. 2012. Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo. UniRío. Córdoba, Argentina.
- CLÉRICI, C.; García Préchac, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*, 5: 92-103.
- DESMET, P.J.J.; Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51:427-433.
- COTLER, H.; López C.; Martínez-Trinidad, S. 2011. ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación ambiental* 3(2): 31-43.
- DOXARAN, D., Froidefond, J. M., Lavender, S., Castaing, P. 2002. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote sensing of Environment*, 81: 149-161.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma.
- FLANAGAN, D.C.; Nearing, M.A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation (Vol. 10). NSERL report.
- FOSTER, G.R.; MCCOOL, D.K.; RENARD, K.G.; MOLDENHAUER, W.C. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to si metric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 36: 355-359.
- GAITÁN, J., Cappelletti, V. 2012. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Río Neuquén. Informe final convenio INTA-AIC. 36 pp.
- GAITÁN, J.J.; Bran, D.; Oliva, G., G. Ciari, V. Nakamatsu, J. Salomone, D. Ferrante, G. Buono, V. Massara, G. Humano, D. Celdrán, W. Opazo, F. T. Maestre. 2013. Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators* 34: 181–191.
- GASPARI, F.J.; Delgado, M.I.; Denegri, G.A. 2009. Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27: 43-51.
- GATICA, G. 2015. Cambios en la estructura de la vegetación a lo largo de un gradiente de lluvias en una región árida del centro-oeste de Argentina: consecuencias sobre la dinámica de carbono. Tesis Doctoral,

- Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- GIN, K.H.; Koh, S.T.; Lin, I. I. 2003. Spectral irradiance profiles of suspended marine clay for the estimation of suspended sediment concentration in tropical waters. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 3235-3245.
- GUANCA, AV. 2010. Determinación de la erosión hídrica de los suelos de la cuenca del Río Pilcomayo – Salta. Tesis de la Universidad Nacional de Salta.
- GVOZDENOVICH, J.; Barbagelata, P.; López, G. 2015 Erosión Hídrica - USLE/RUSLE Argentina INTA EEA Paraná. Software, Versión 2.0. URL: <http://www.inta.gob.ar/parana>
- INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA. 2010. Mapa de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la Argentina.
- INTA. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. Proyecto PNUD ARG 85/019. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales, Castelar.
- IRISARRI, J.A.; Dufilho, A.C. 2015. Provincia de Neuquén. En: Degradación de Tierras en la República Argentina, R. Casas y G. Albarracín (ed.). Ed. FECIC. Tomo II 201-211.
- IRURTIA, C.B.; Cruzate, G.; Gaspari, F.J. 2007. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica. Guía de Divulgación Técnica, Instituto de Suelos – INTA.
- IRURTIA, C.; MON, R. 2000. Impacto de la erosión hídrica en la producción de granos Argiudoles típicos de la pampa ondulada. 11 Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo (ISCO). Actas. Buenos Aires, Argentina.
- KIRBY, M.J, Morgan, R.P.C. 1994. Erosión de suelos. Limusa Noriega Editores. 375 pp.
- LE ROUX, J.J.; Morgenthal, T.L.; Malherbe, J.; Pretorius, D.J.; Sumner, P.D. 2008. Water erosion prediction at a national scale for South Africa. *Water SA*, 34: 305-314.
- LIGIER, H.D., Polo, H.L., Matteio, H.R. 1993. Erosión hídrica potencial en la provincia de Misiones. INTA EEA Corrientes, 34 pp.
- LIGIER, H.D., Vallejos, O, Perucca, A.R., Matteio, H.R. 1998. La erosión hídrica en la Provincia de Corrientes. Informe técnico. Convenio MAGIC-INTA. EEA INTA Corrientes, 33pp.
- MA, R.; Dai, J. 2005. Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 2779-2795.
- MAGLIANO, P.N.; Fernández, R.J.; Giménez, R.; Marchesini, V.A.; Páez, R.A.; Jobbágy, E. G. 2016. Cambios en la partición de flujos de agua en el Chaco Árido al reemplazar bosques por pasturas. *Ecología Austral*, 26: 95-106.
- MARELLI, J.H. 2012. Estimación del potencial erosivo en la provincia de Córdoba a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Publicación INTA Marcos Juárez.
- MARELLI, J.H. 1988. La Erosión Hídrica. Conferencia presentada en la XII Reunión

- Nacional de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo Corrientes.
- MERRITT, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18: 761-799.
- MICHELENA, R, Eiza, M, Carfagno, P. 2014. Capítulo 30: Erosión Hídrica. Relación con el cambio climático. En: SUELOS, PRODUCCIÓN AGROPECUARIA Y CAMBIO CLIMÁTICO: Avances en la Argentina 2014. C. Pascale, M. Zubillaga M. Taboada (Editores).
- MILLER, R.L., McKee, B.A. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote sensing of Environment*, 93: 259-266.
- MITAS, L., Mitasova, H. 1998. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, N° 34, Vol. 3: 505-516. EE.UU.
- MONTES-LEÓN, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., García-Celis, E. 2011. Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y ciencias del agua*, 2: 5-17.
- MOORE, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Vol.5, No.1
- MORGAN, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., ... Styczen, M.E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth surface processes and landforms*, 23: 527-544.
- OLIVA, G., GAITÁN, J., BRAN, D., NAKAMATSU, V., et al. 2011. Manual para la Instalación y Lectura de Monitores MARAS. PNUD, Buenos Aires, Argentina.
- OSINAGA, R., Pérez, L., Chávez, A., Cabrera, P., Osinaga, N. 2012. La erosión hídrica potencial de los suelos en la provincia de Salta. Consejo de Inverstigación. Universidad Nacional de Salta.
- OWENS, P.N., Batalla, R.J., Collins, A.J., Gomez, B., Hicks, D.M., Horowitz, A.J., Petticrew, E.L. 2005. Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River research and applications*, 21: 693-717.
- PANIGATTI, J.L. 2015. Aspectos de la erosión de los suelos en Argentina. Ed. AACs. Buenos Aires. 70 pp.
- PROSA. 1988. El Deterioro del Ambiente en la Argentina. FECIC. Editorial Orientación Grafica Editora. ISBN: 9789509149274.
- RENARD, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703). Washington, DC: US Government Printing Office.
- RITCHIE, J.C., Schiebe, F.R. 2000. Water quality. In *Remote Sensing in Hydrology and Water Management* (pp. 287-303). Springer Berlin Heidelberg.
- RITCHIE, J.C., Cooper, C.M., Schiebe, F.R. 1990. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake,

- Mississippi. Remote Sensing of environment, 33: 137-148.
- ROJAS A.E. Codromas de, Conde, A.A. 1985. Estimación del factor "R" de la ecuación universal de pérdida de suelo para el centro-este de la República Argentina. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, 3: 85-94.
- ROJAS A.E. Codromas de; Conde, A.A., Moresco, R.F. 1976. Determinación del índice de erosividad de las lluvias para algunas localidades de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires. INTA IDEA. Suplemento N° 33. 709-713.
- ROJAS, A. E.; Saluso, J. H. 1988. Estimación del factor "R" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para algunas localidades del norte de la República Argentina. Actas XII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo. Corrientes. pp 215-216.
- SORIA, N.D. 2016. Base de datos integral del paisaje. SIG-Desert. LADyOT-IADIZA. Mendoza.
- STEWART, B.A., Woolhiser, D.A., Wischmeier, W.H., Caro, J.H., Frere, M.H. 1975. Control of Pollution from Cropland. Vol. 1, A manual for guideline development; Vol. 2, An overview. U.S Dep. Agric., ARS-H-5 and ARS-H-2, Washington, DC.
- THOMAS, A., D'amato, J.P, Rinaldi, P.R. 2015. Corrección de modelos digitales de elevación con imágenes multi-espectrales. SEDICI, Repositorio Institucional de la UNLP.
- TORRES ROBLES, S.; ARTURI, M.F.; CONTRERAS, C.; PETER, G.; ZEBERIO, J.M. 2015. Variaciones geográficas de la estructura y composición de la vegetación leñosa en el límite entre el espinal y el monte en el Noreste de la Patagonia (Argentina). Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 50: 209-215.
- TROEH, F.R., Hobbs, J.A., Daonahue, R.L. 1991. Soil and Water Conservations. Second Edition. Prentice Hall, Ind. 530 pp.
- TUCKER, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ., 8, 127-150.
- VAN der Knijff, J.M.F., Jones, R.J.A.; Montanarella, L. 1999. Soil erosion risk assessment in Italy. JRC, European Commission.
- VIGLIZZO, E., JOBBÁGY, E. G. (Eds.). 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- VILLANUEVA, G., Osinaga, R. 2004. Uso sustentable de los Suelos. Cátedra de Uso sustentable de los suelos. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- VOLANTE, J. (Coord.) *et al.* 2009. Cobertura del Suelo de la República Argentina. Año 2006-2007 (LCCS-FAO). Programa Nacional de Ecorregiones, INTA.
- WALTER, C., Stutzel, H. 2009. A new method for assessing the sustainability of land-use systems (II): Evaluating impact indicators. Ecological Economics 68: 1288-1300.
- WISCHMEIER, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses – Aguide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No. 537, USDA-

Agricultural Research Service, Washington,  
DC.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B., CROSS,  
B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for  
farmland and construction sites. *Journal of  
Soil and Water Conservation* 26: 189-193.

WISCHMEIER, W.H.; Smith, D. D. 1965.  
Predicting rainfall-erosion losses from  
cropland east of the Rocky Mountains. *Agr.  
Handbook* No. 282, U.S. Dept. Agr.,  
Washington DC.

YAPUR, SMS. 2010. Determinación de la  
erosión hídrica potencial de los suelos de  
la cuenca inferior del Río Bermejo, Salta-  
Jujuy. Tesis de la Universidad Nacional de  
Salta.

## ANEXO

Las provincias con mayor tasa de erosión hídrica actual son Neuquén, Misiones y Santa Cruz. En el caso de Neuquén, la tasa media de 22,8 t/ha/año equivalen a una pérdida de una capa de aproximadamente 2 milímetros de suelo por año (considerando una densidad aparente promedio de 1,2 t/m<sup>3</sup>). Las mayores tasas de erosión ocurren en el norte de la provincia donde se dan simultáneamente fuertes pendientes, precipitaciones moderadas a altas y una fuerte degradación de la cobertura vegetal, principalmente debido al sobrepastoreo. Las provincias con menores tasas de erosión hídrica actual son La Pampa, Formosa y Santiago del Estero (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tasa de erosión hídrica actual media por provincia.

<i>Provincia</i>	<i>Erosión hídrica actual (t/ha/año)</i>
Neuquén	22,84
Misiones	17,94
Santa Cruz	16,6
San Juan	11,57
Jujuy	9,77
Chubut	9,04
Mendoza	7,22
Tucuman	6,94
Catamarca	5,84
Río Negro	5,16
Tierra del Fuego	5,16
Salta	4,33
Entre Ríos	4,22
La Rioja	4,21
Córdoba	4,17
Buenos Aires	2,95
Santa Fe	1,79
San Luis	1,61
Chaco	1,18
Corrientes	0,95
La Pampa	0,85
Formosa	0,71
Stgo. del Estero	0,53

La erosión potencial estima la máxima tasa de pérdida de suelo que ocurriría si se elimina la totalidad de la cobertura vegetal. En la provincia de Misiones, donde se dan las precipitaciones medias más elevadas del país, junto con las fuertes pendientes del relieve se conjugan para dar las tasas de erosión potencial más altas del país (alrededor de 2000 t/ha/año). Esta tasa equivaldría a una pérdida media de aproximadamente 14,5 cm de suelo por año (considerando una densidad aparente promedio de 1,4 t/m<sup>3</sup>). Si bien las provincias con menores tasas de erosión potencial son Chaco, La Pampa y Santiago del Estero, cabe destacar que en dichas provincias el Factor K es elevado especialmente en Chaco, lo cual indica una alta erodabilidad potencial de los suelos, aunque al dominar los relieves planos (Factor LS) y precipitaciones medias a bajas, finalmente la erosión hídrica potencial arroja los menores valores a nivel nacional (Tabla 2). Con lo cual es esperable que en determinadas cuencas (como por ejemplo la Cuenca Sachayoj en Santiago del Estero) donde se hallan pendientes algo más pronunciadas estos procesos tomen mucha importancia. Asimismo el deterioro de los ambientes semiáridos/subhúmedos del Chaco producto del avance del desmonte reducen la capacidad de infiltración de estos suelos con alta erodabilidad, con lo cual ante los eventos de lluvia se incrementan los escurrimientos y aumentan los riesgos de erosión en paisajes llanos (Magliano *et al.*, 2016).

**Tabla 2.** Tasa de erosión hídrica potencial media por provincia.

<b>Provincia</b>	<b>Erosión hídrica Potencial (t/ha/año)</b>
Misiones	2018,05
Tucuman	1022,7
Jujuy	731,59
Neuquén	699
Salta	553,12
Tierra del Fuego	354,71
Chubut	218,14
Santa Cruz	136,44
Río Negro	115,56
Catamarca	99,68
Córdoba	82,91
San Juan	77,82
Mendoza	72,4
Entre Ríos	60,15
San Luis	58,72
Corrientes	54,16
La Rioja	47,59
Formosa	36,95
Buenos Aires	36,56
Santa Fe	27,16
Chaco	26,89
La Pampa	18,51
Stgo. del Estero	15,33



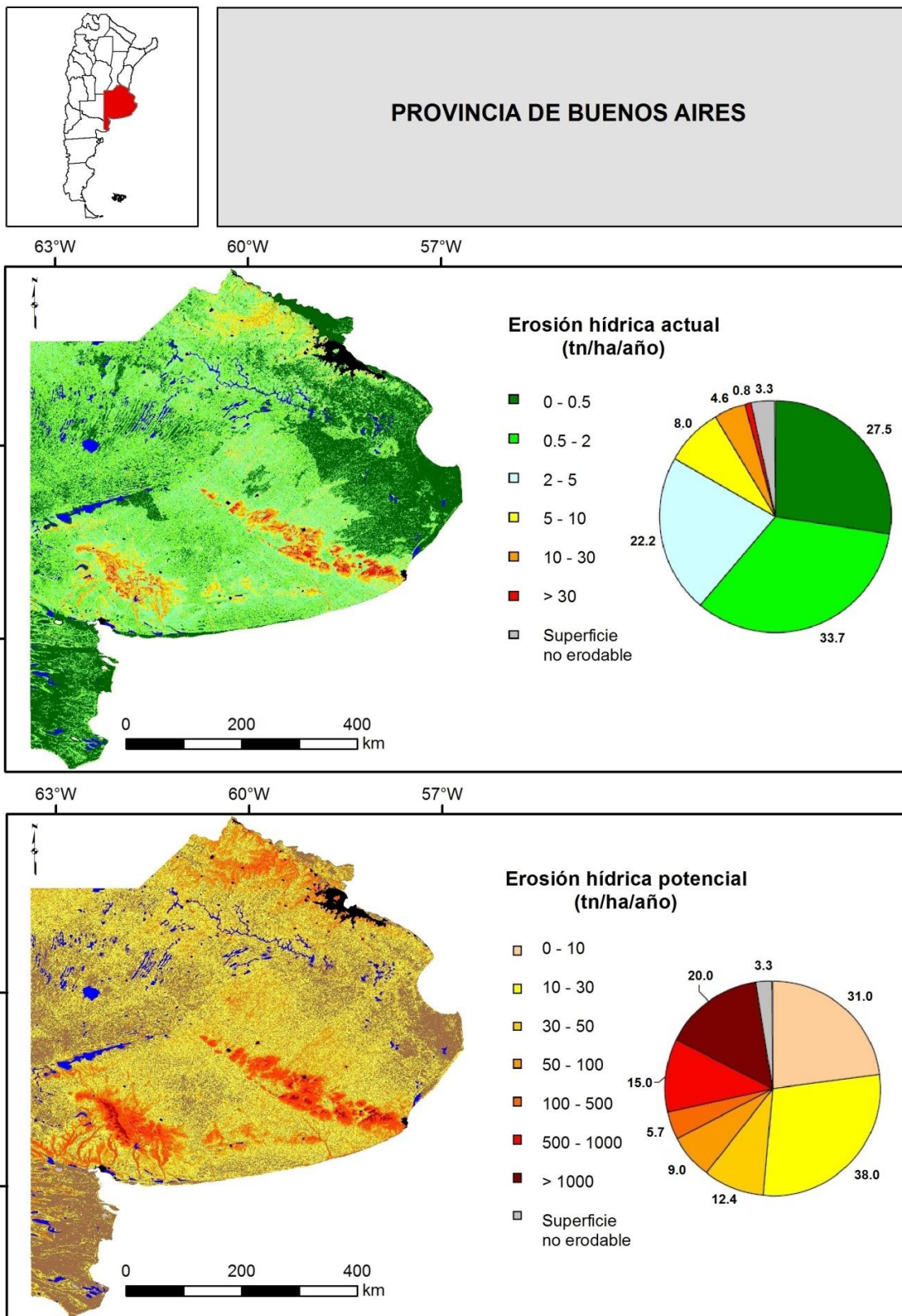


Figura 1. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Buenos Aires.

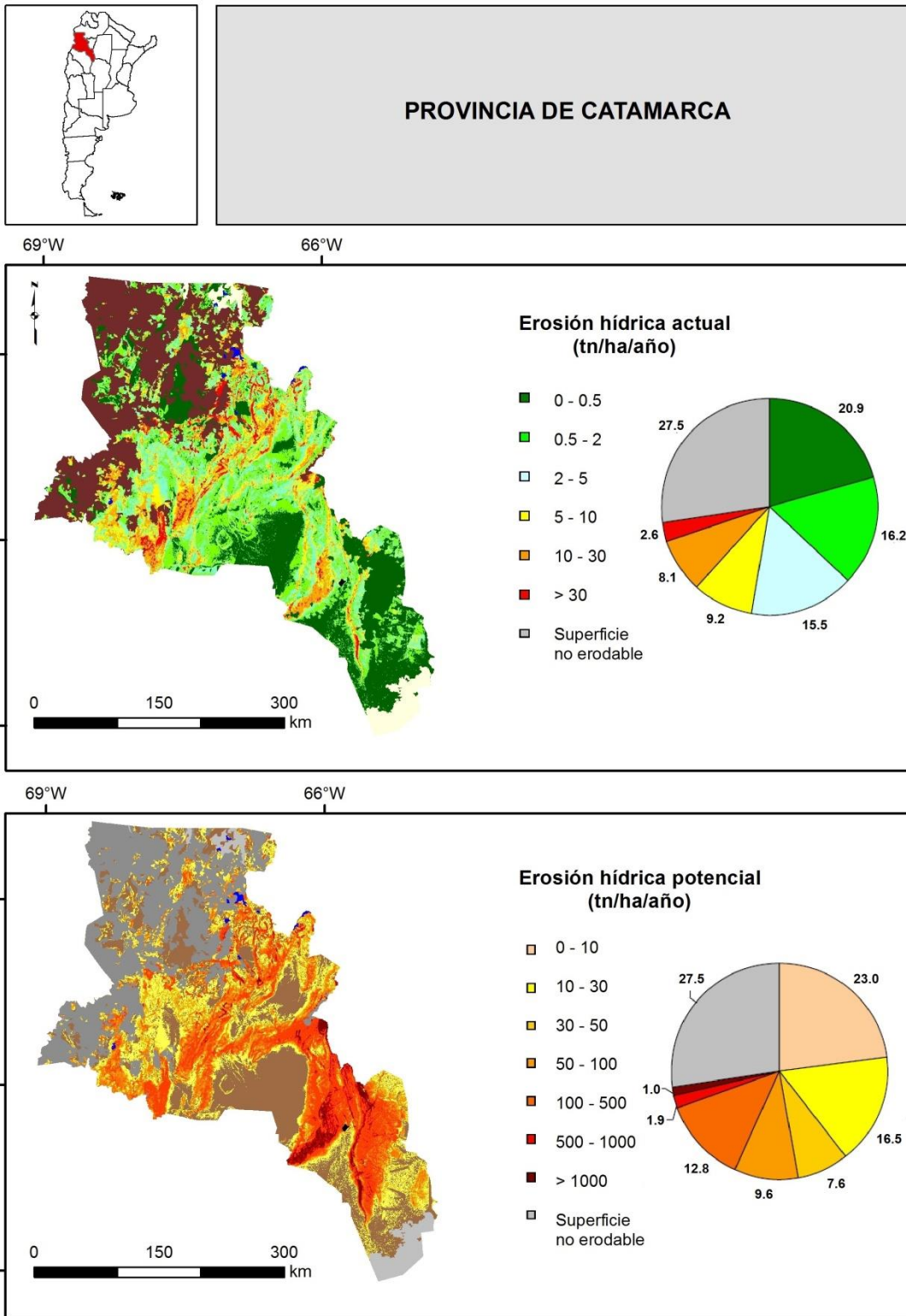


Figura 2. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Catamarca.

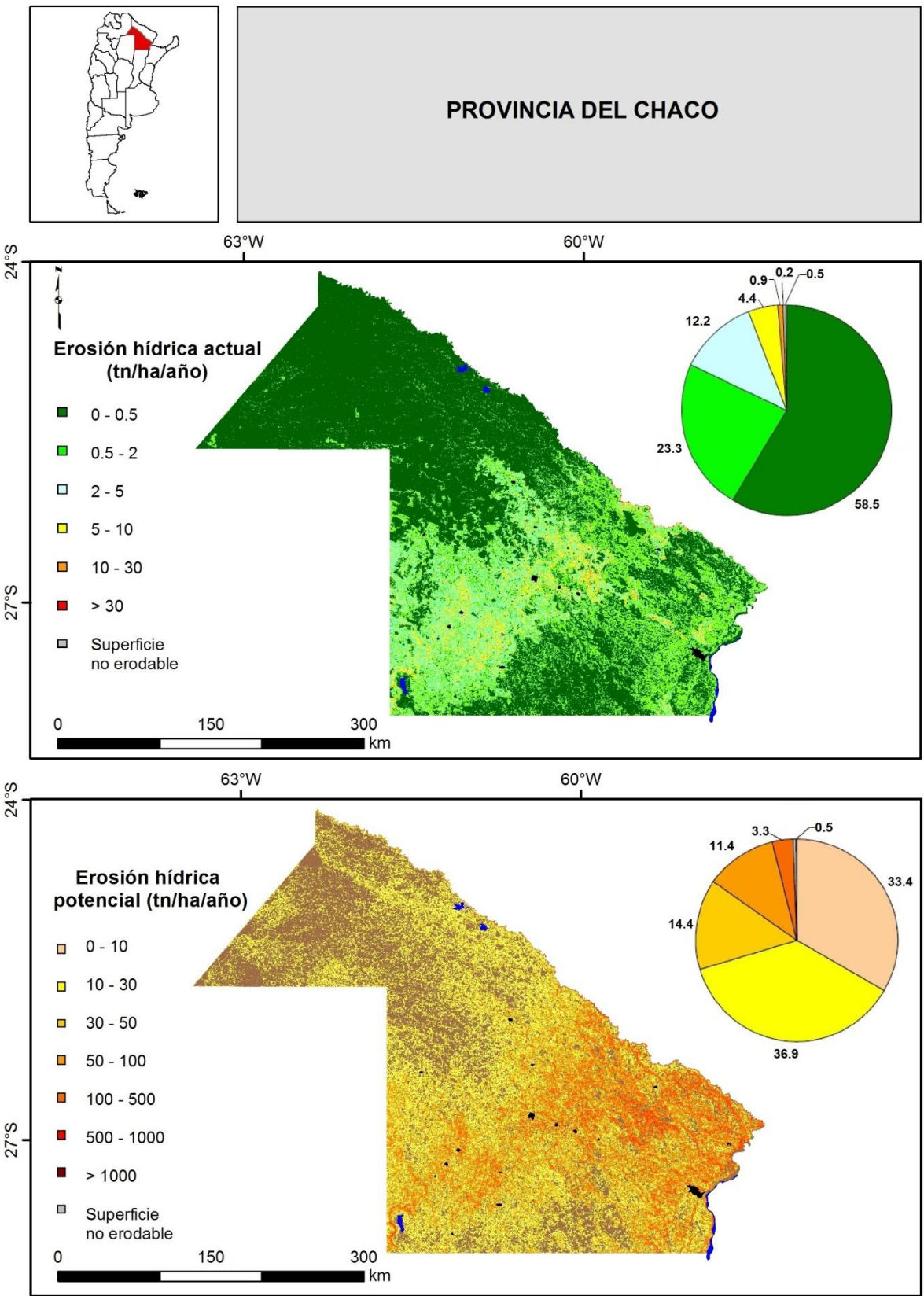


Figura 3. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Chaco.

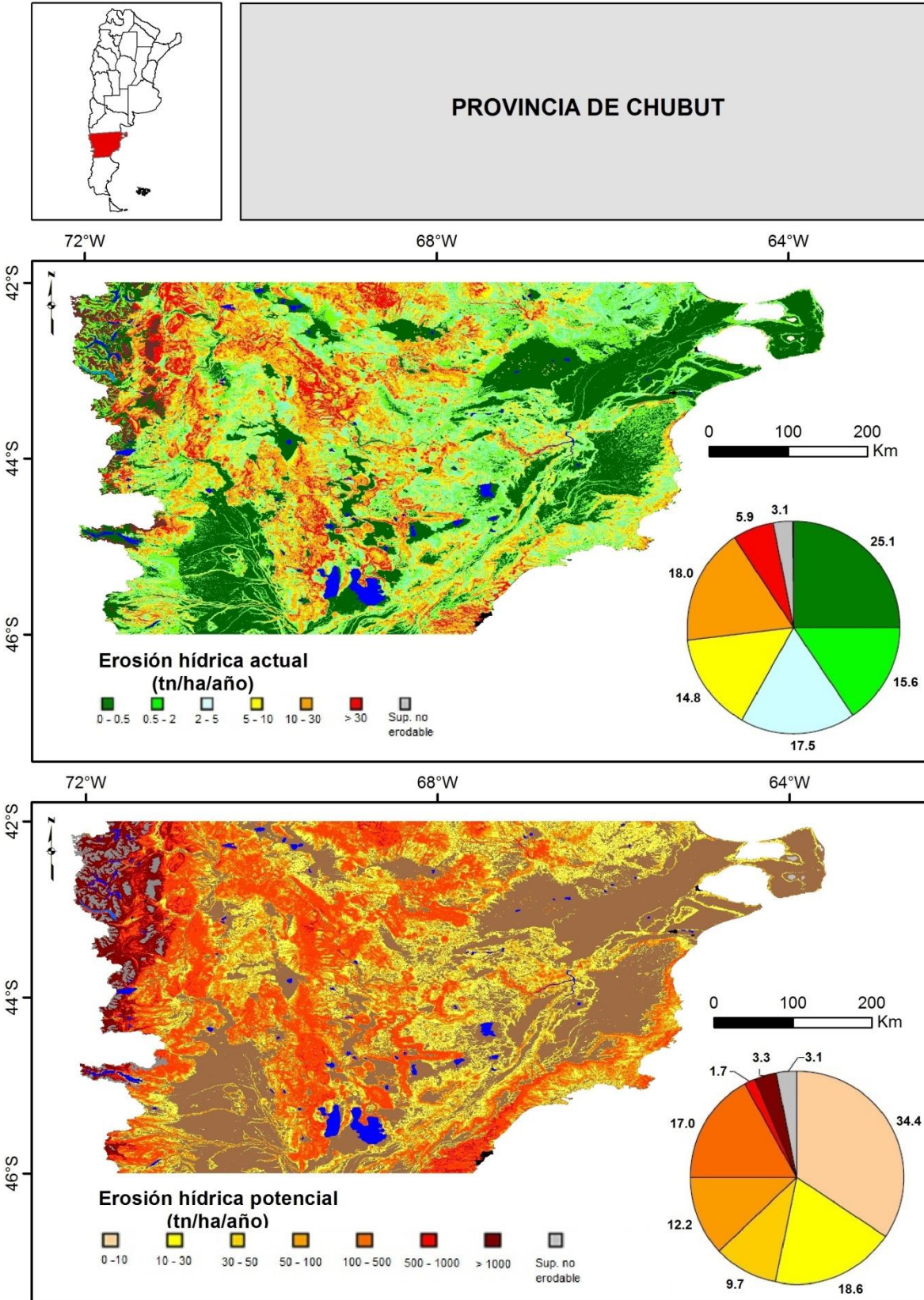
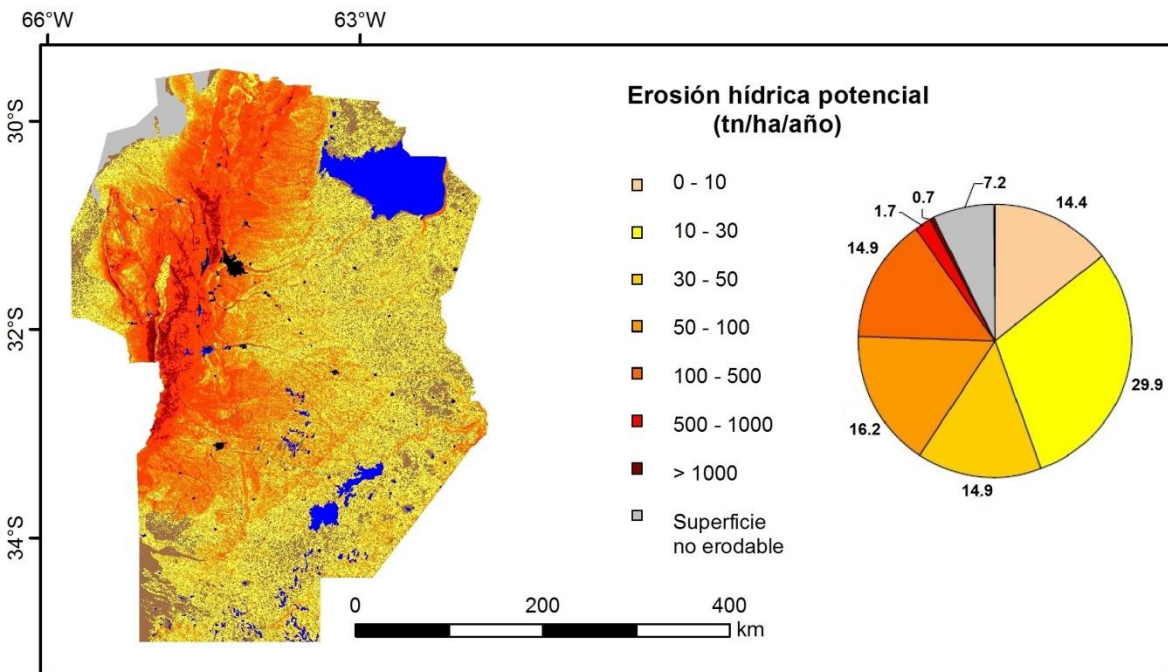
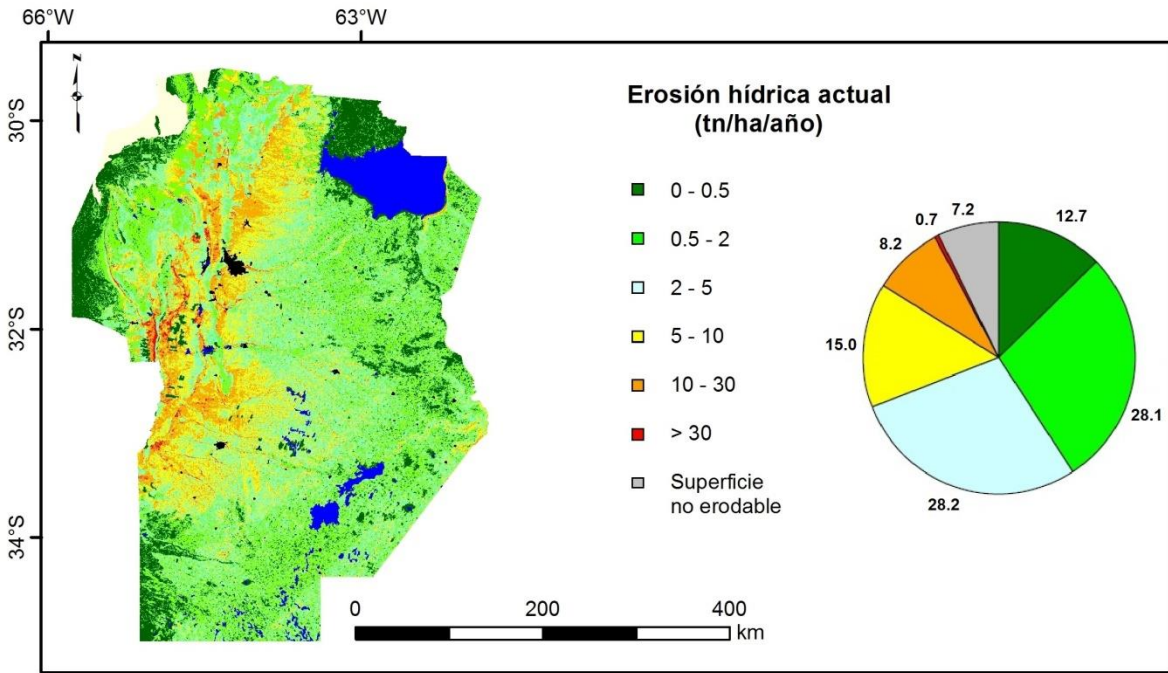


Figura 4. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Chubut.



**Figura 5.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Córdoba.

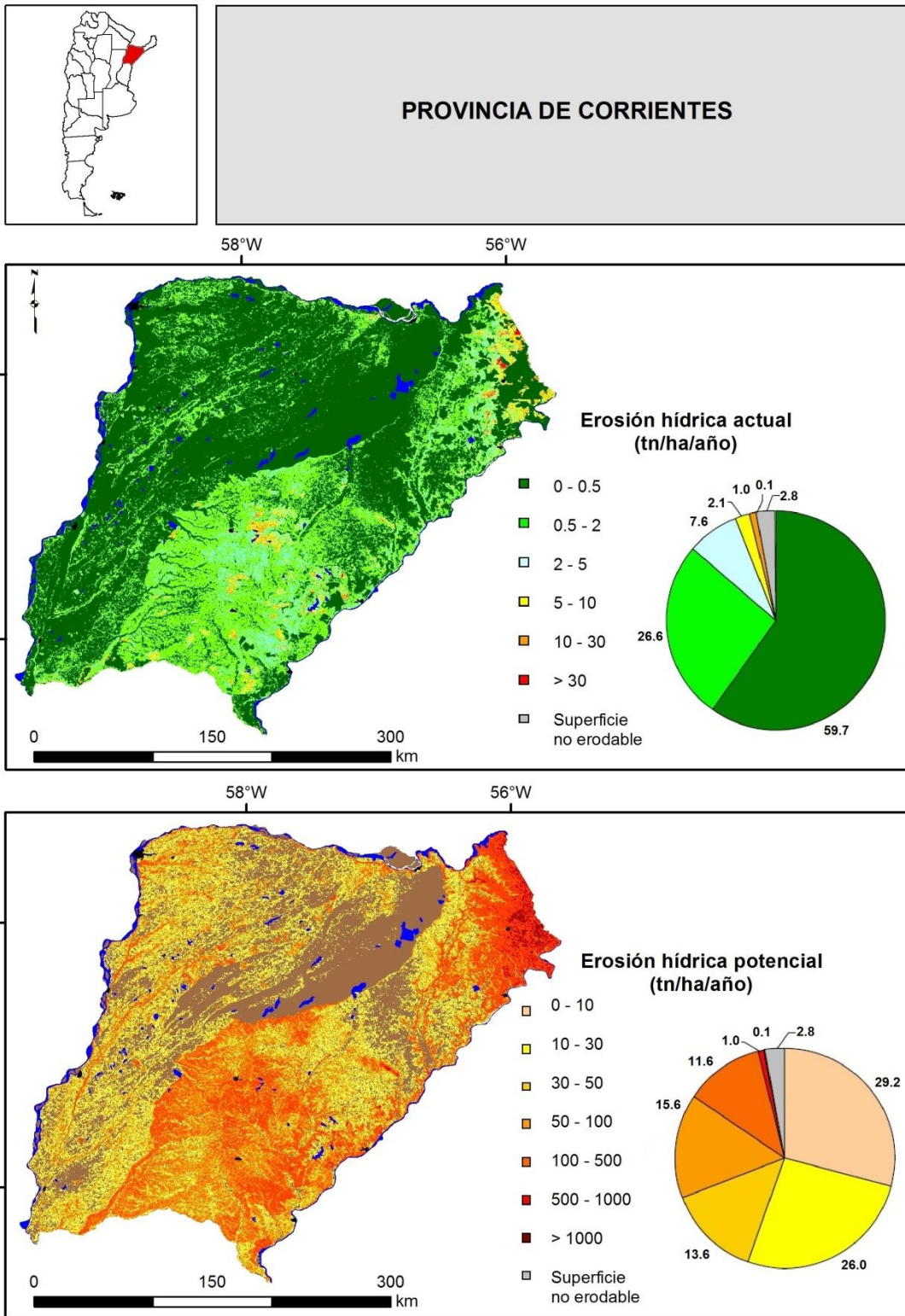
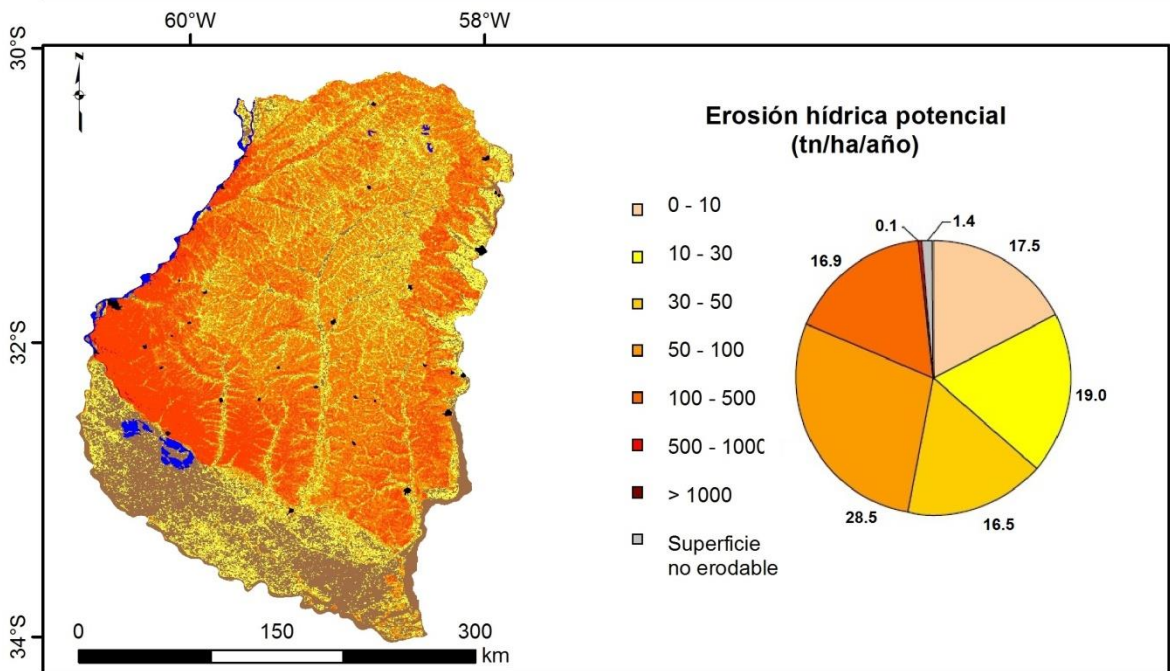
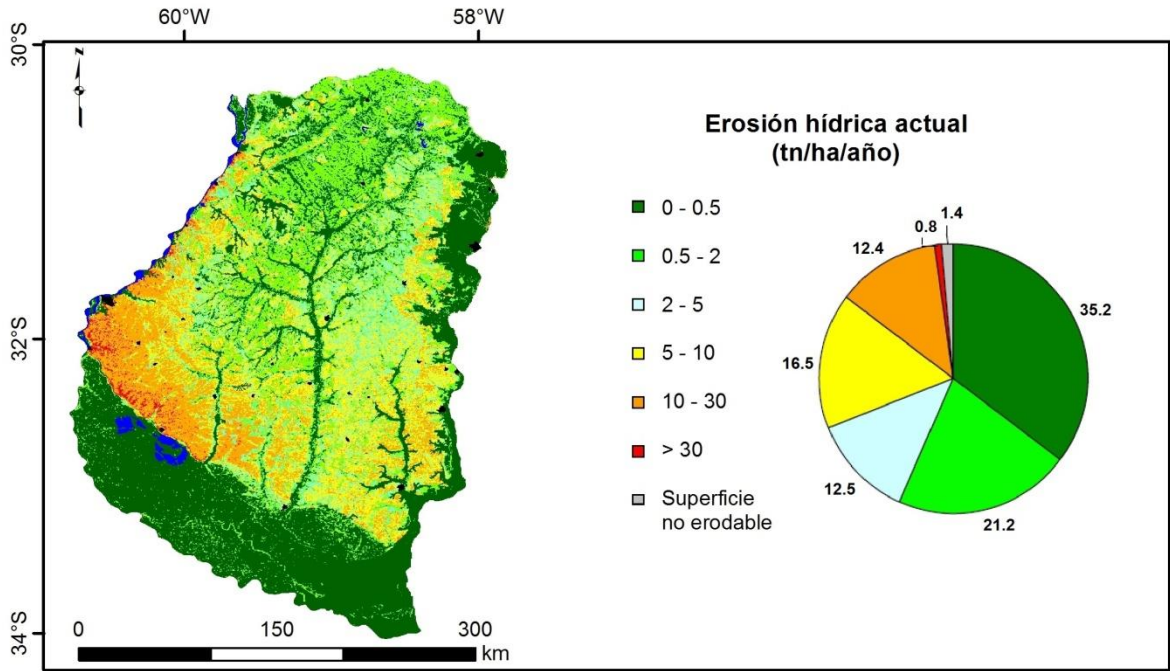


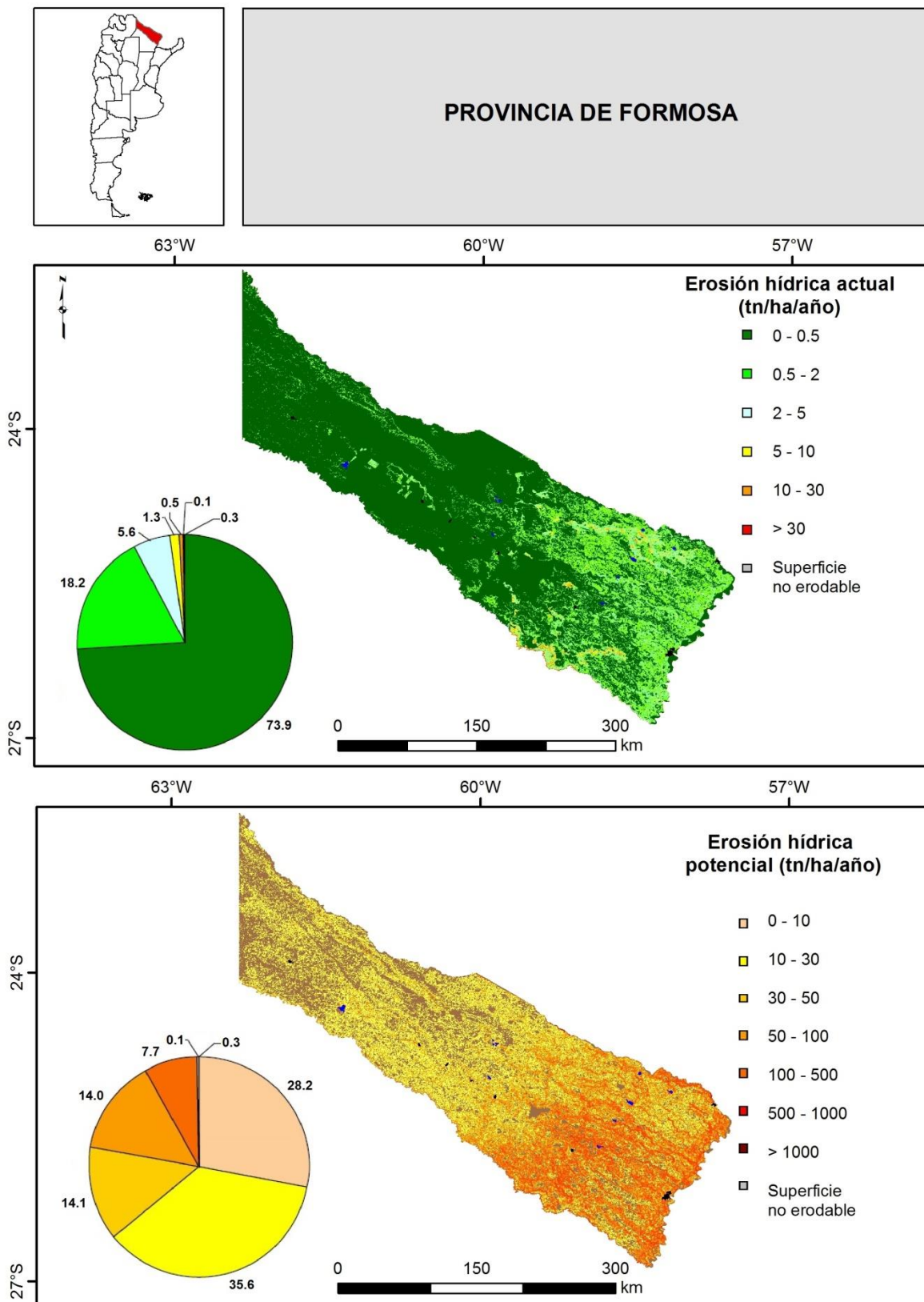
Figura 6. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Corrientes.



# PROVINCIA DE ENTRE RÍOS



**Figura 7.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Entre Ríos.



**Figura 8.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Formosa.



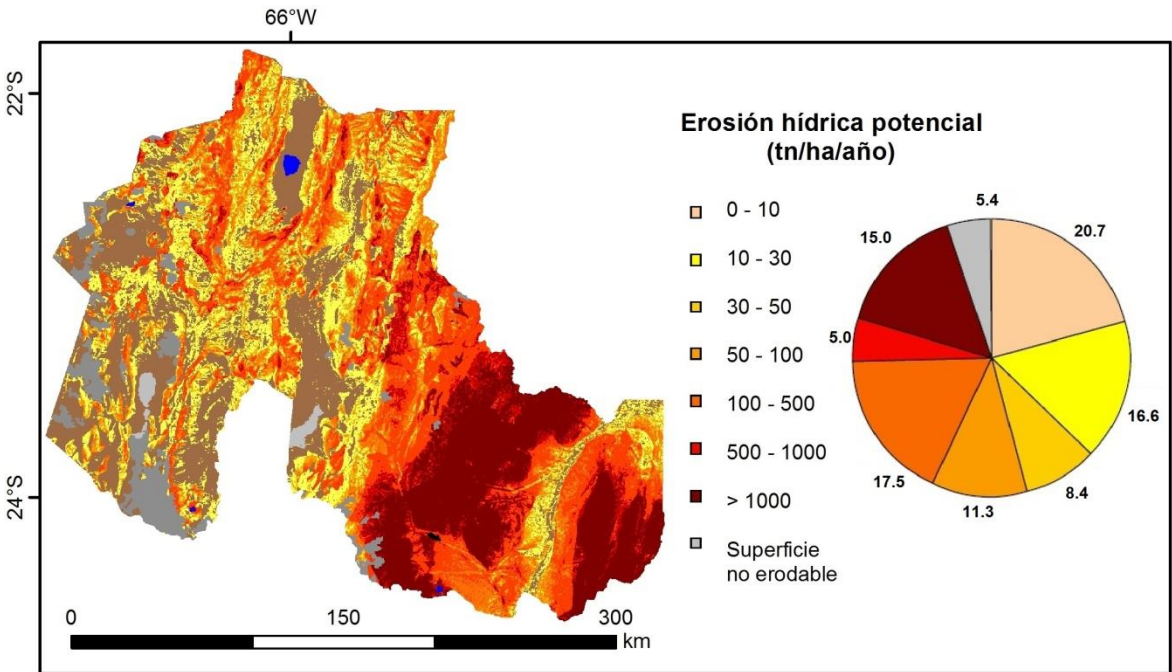
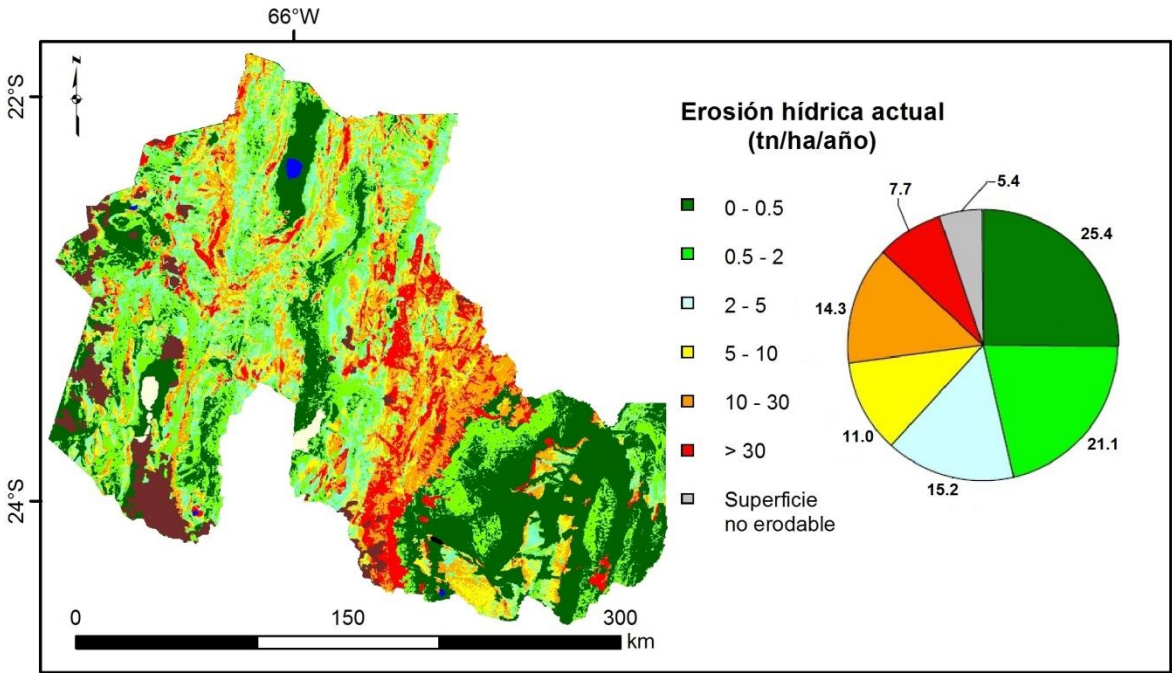
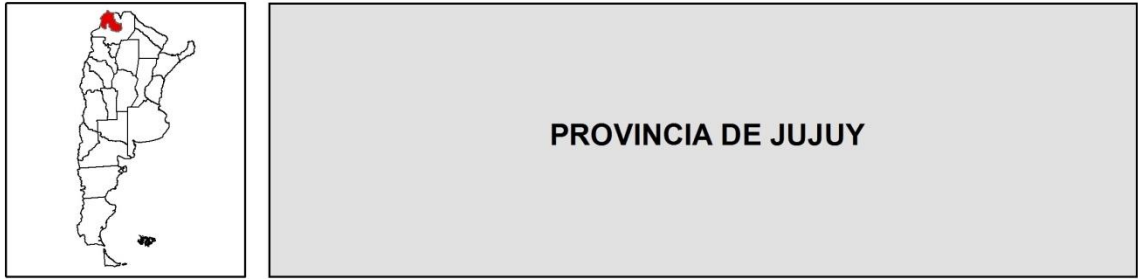


Figura 9. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Jujuy.

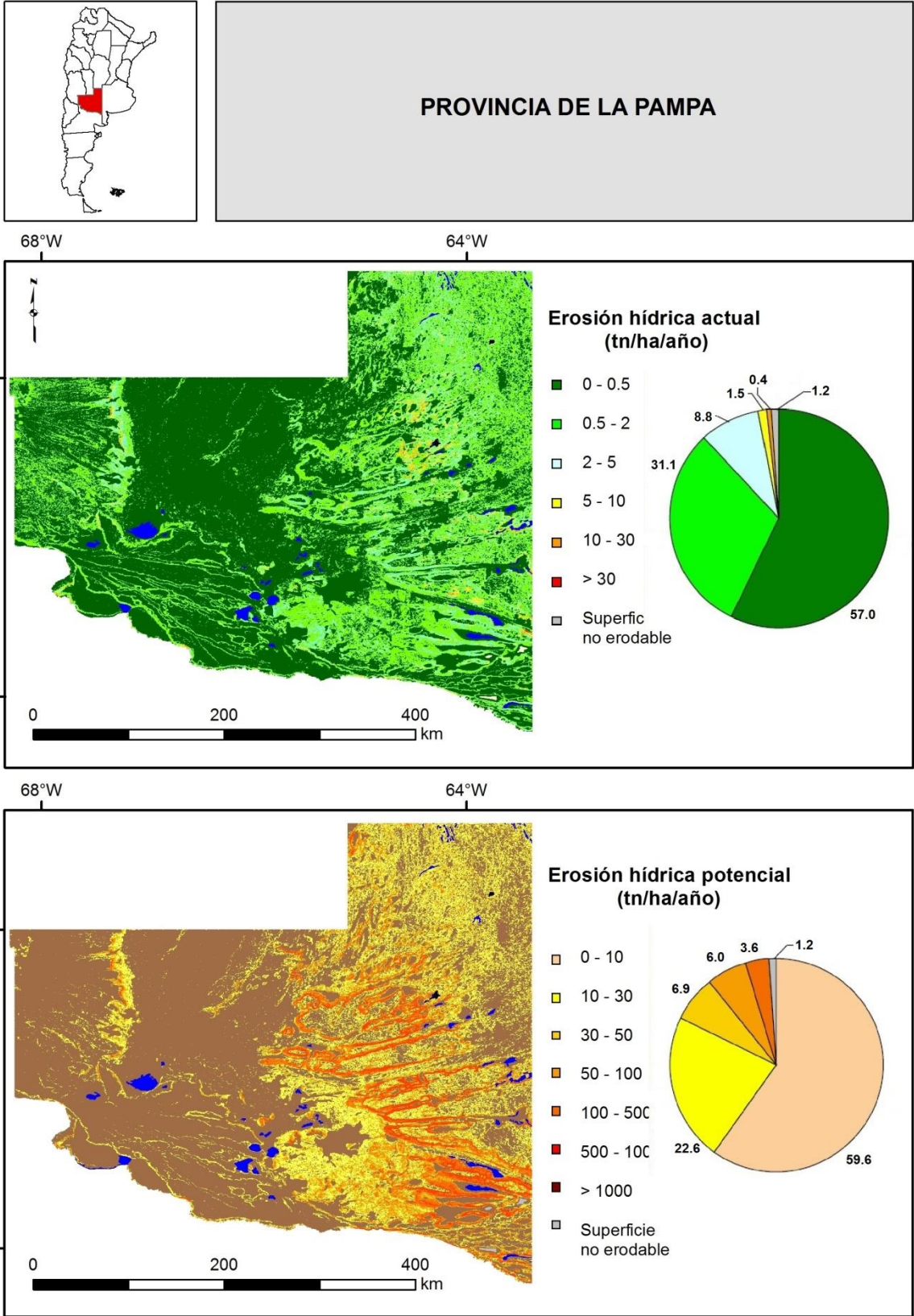


Figura 10. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de La Pampa.

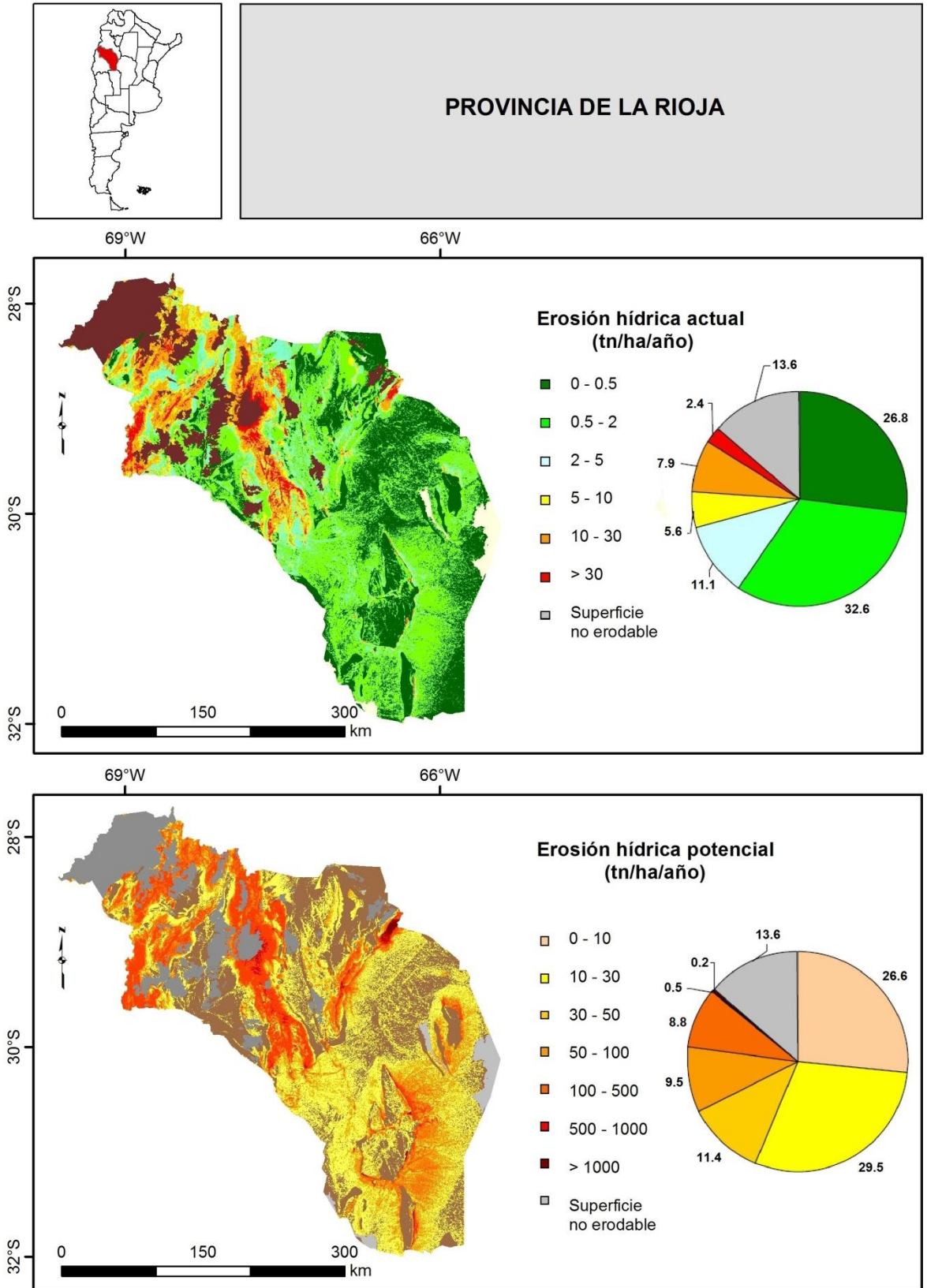
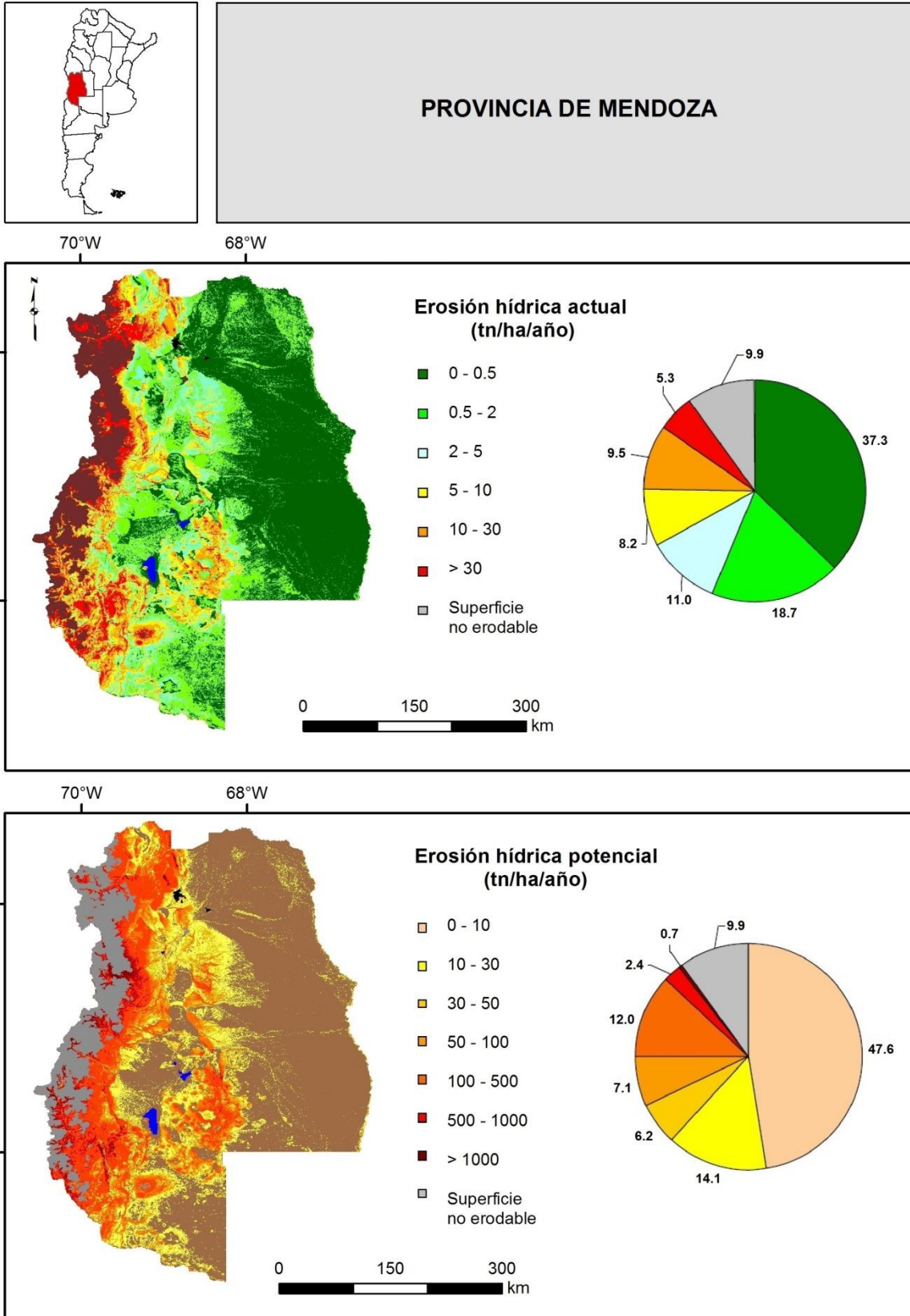


Figura 11. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de La Rioja.



**Figura 12.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Mendoza.

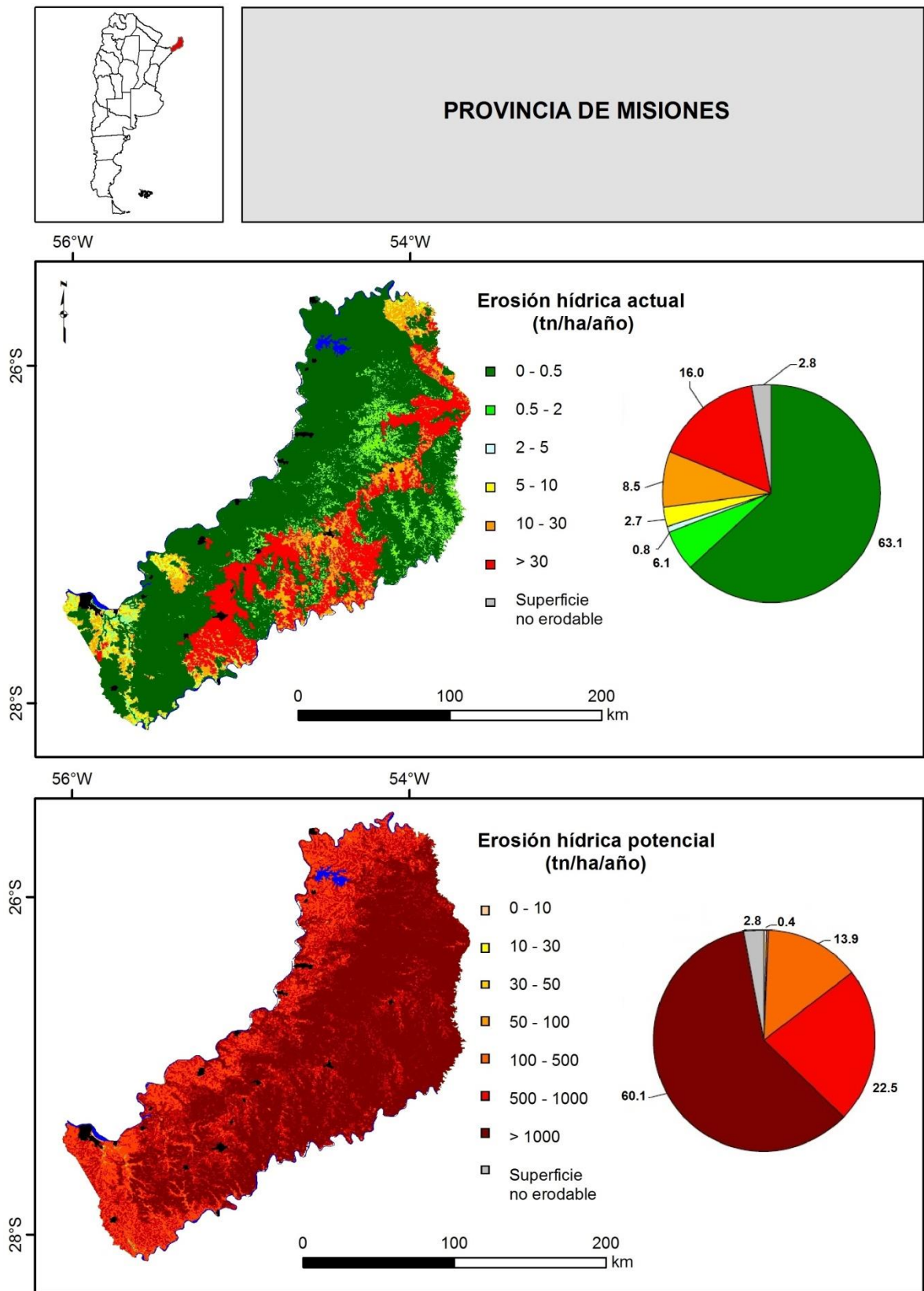
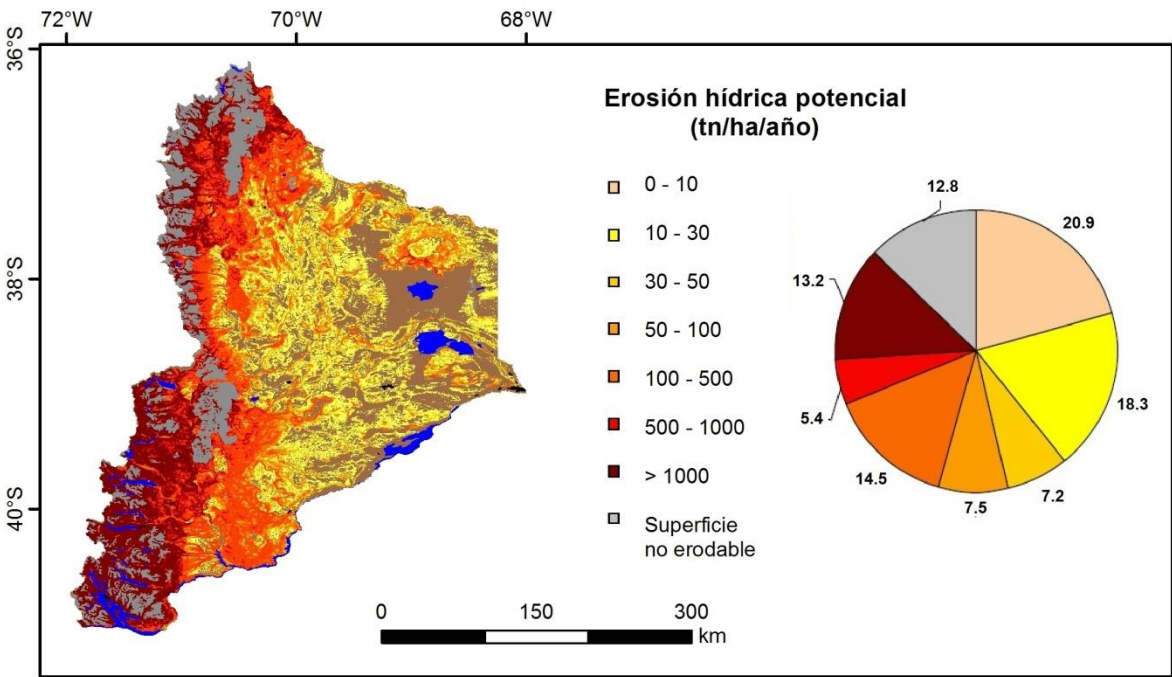
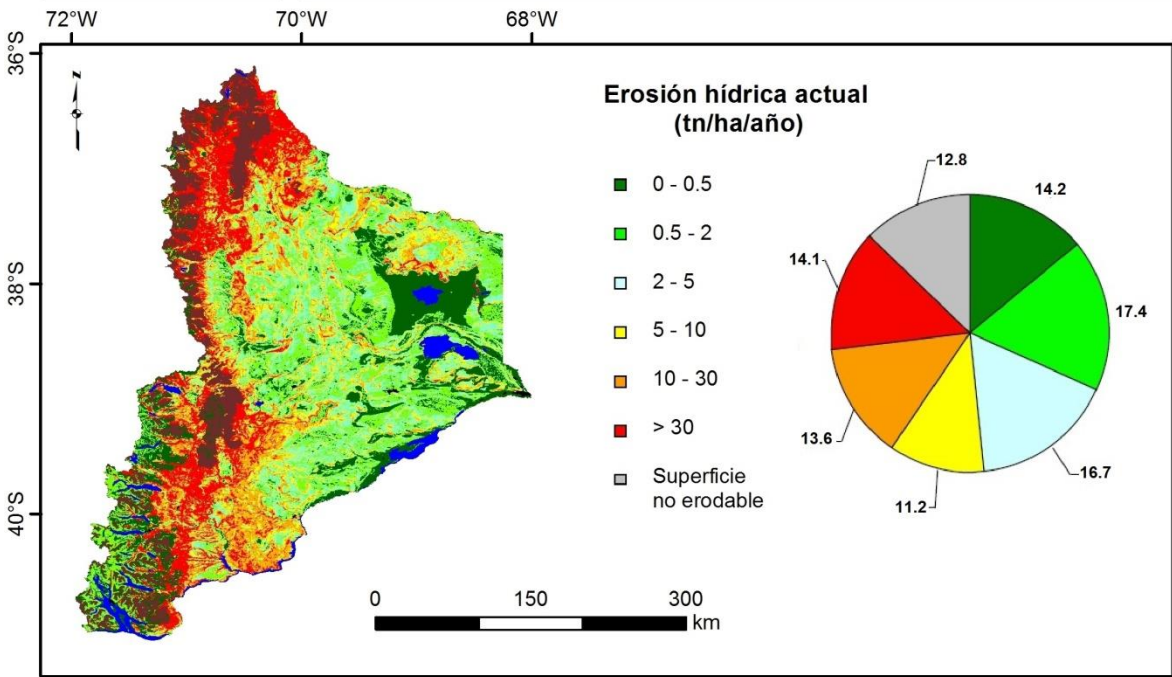
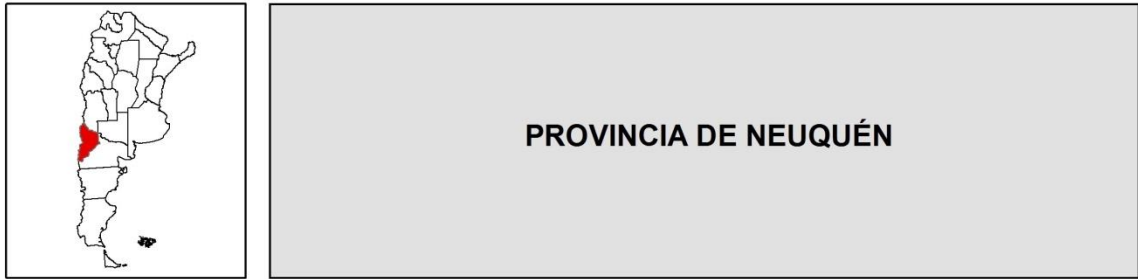


Figura 13. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Misiones.



**Figura 14.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Neuquén.

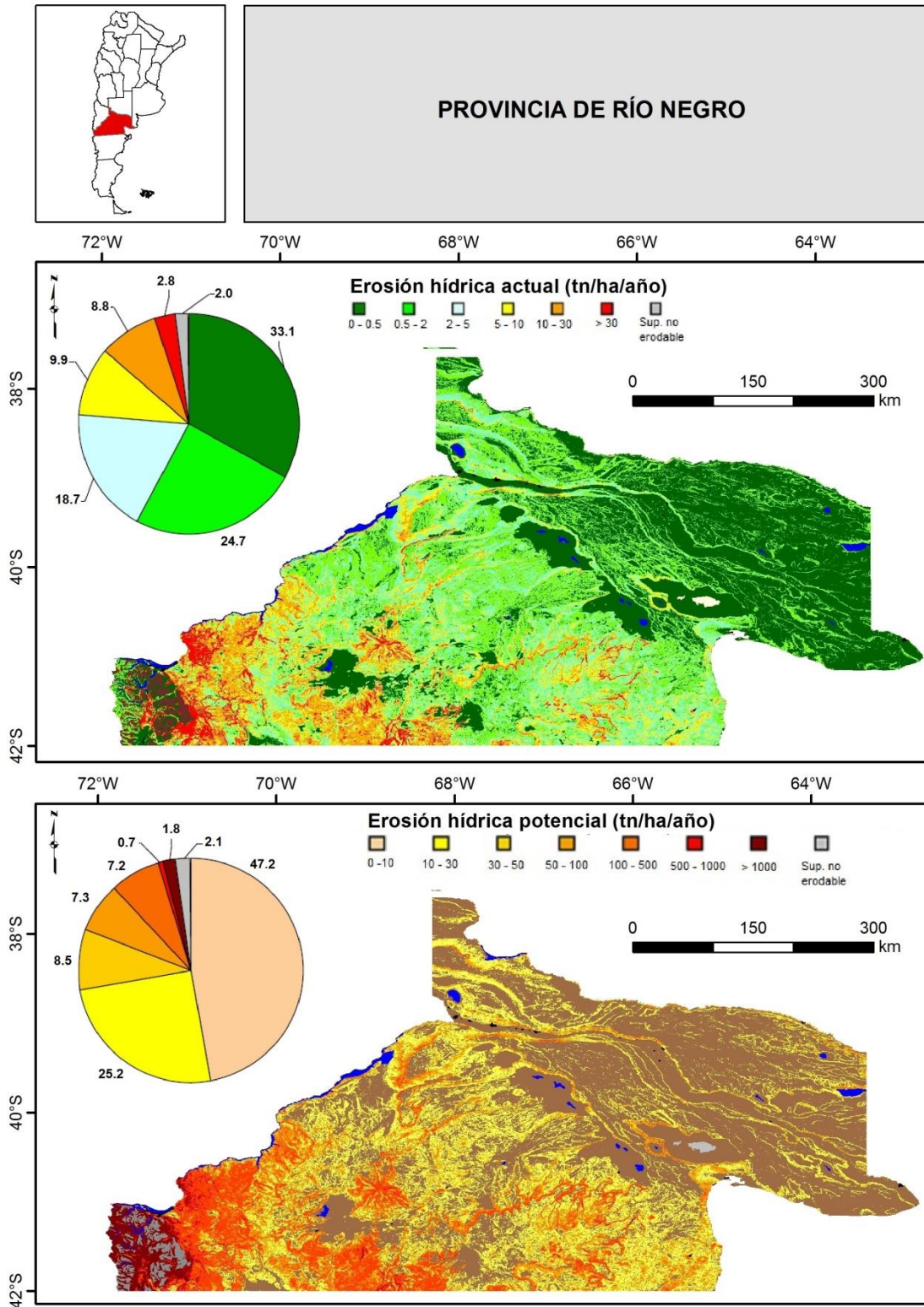
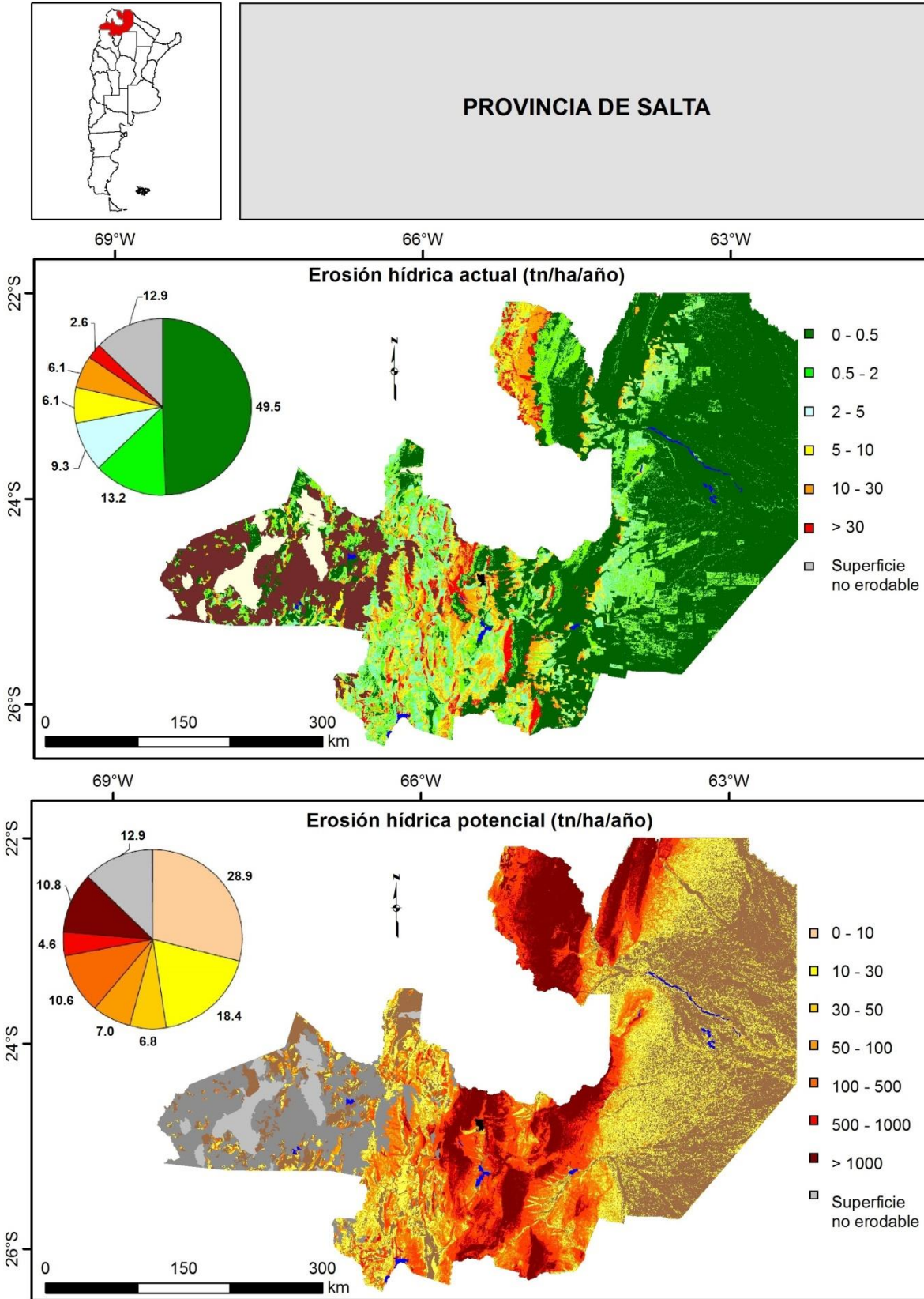
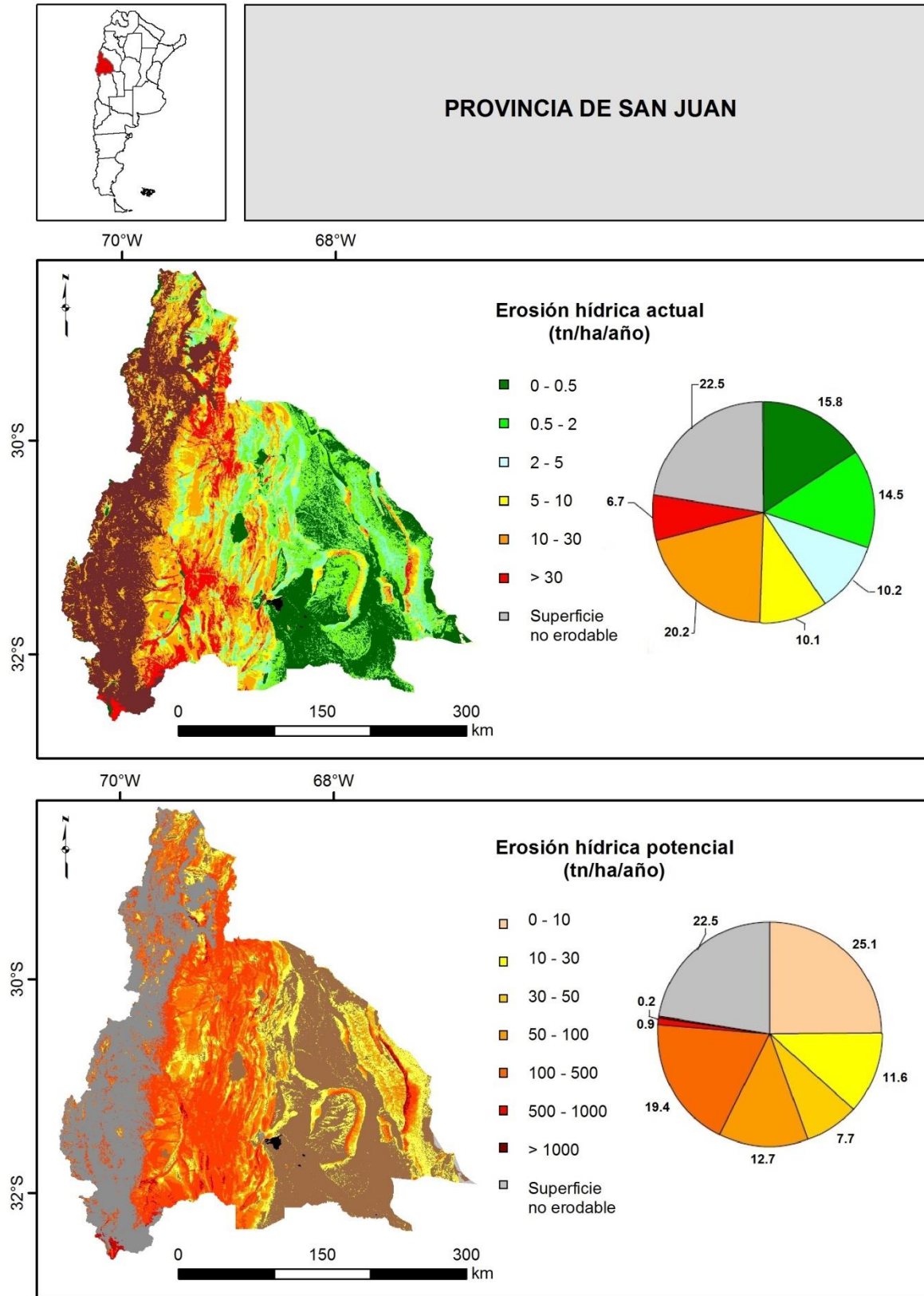


Figura 15. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Río Negro.

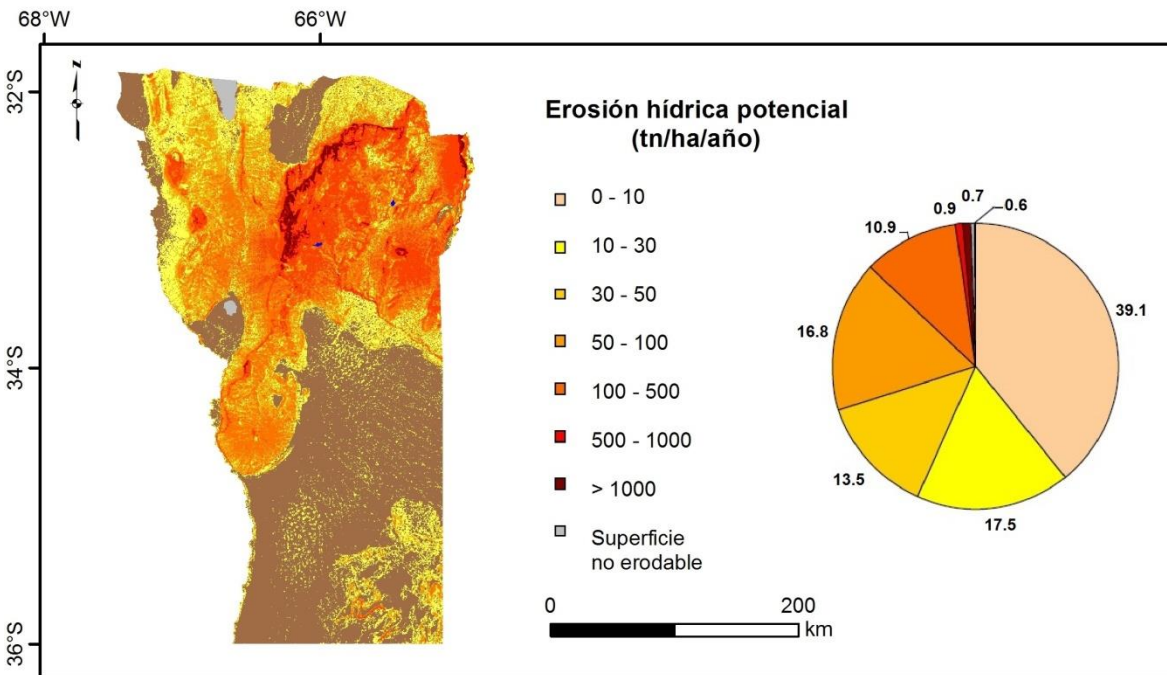
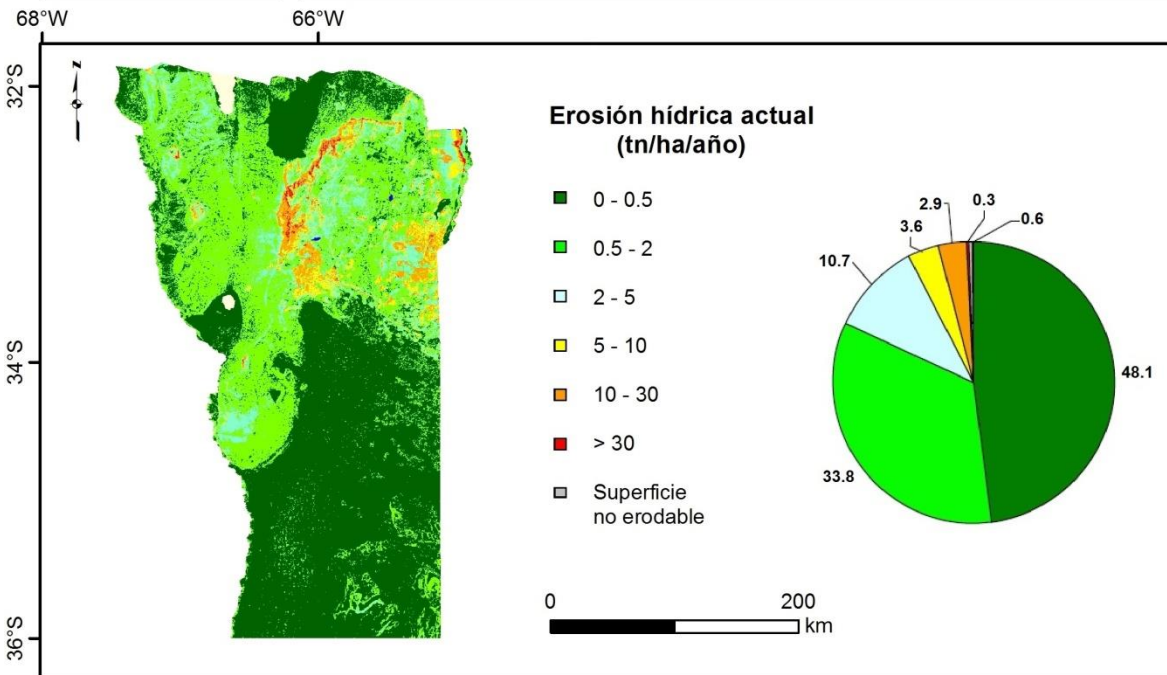
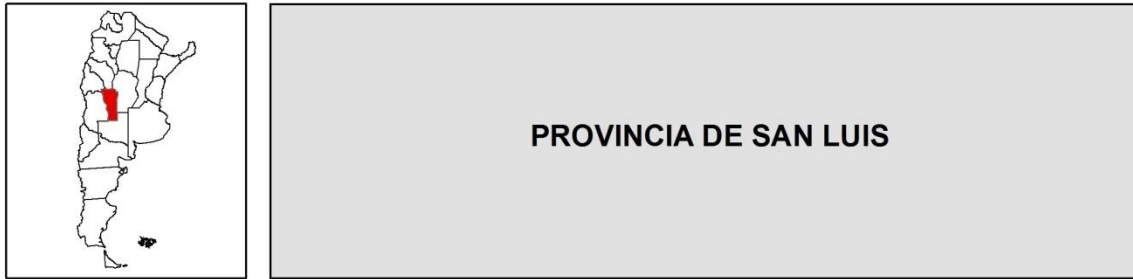


**Figura 16.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Salta.





**Figura 17.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de San Juan.



**Figura 18.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de San Luis.

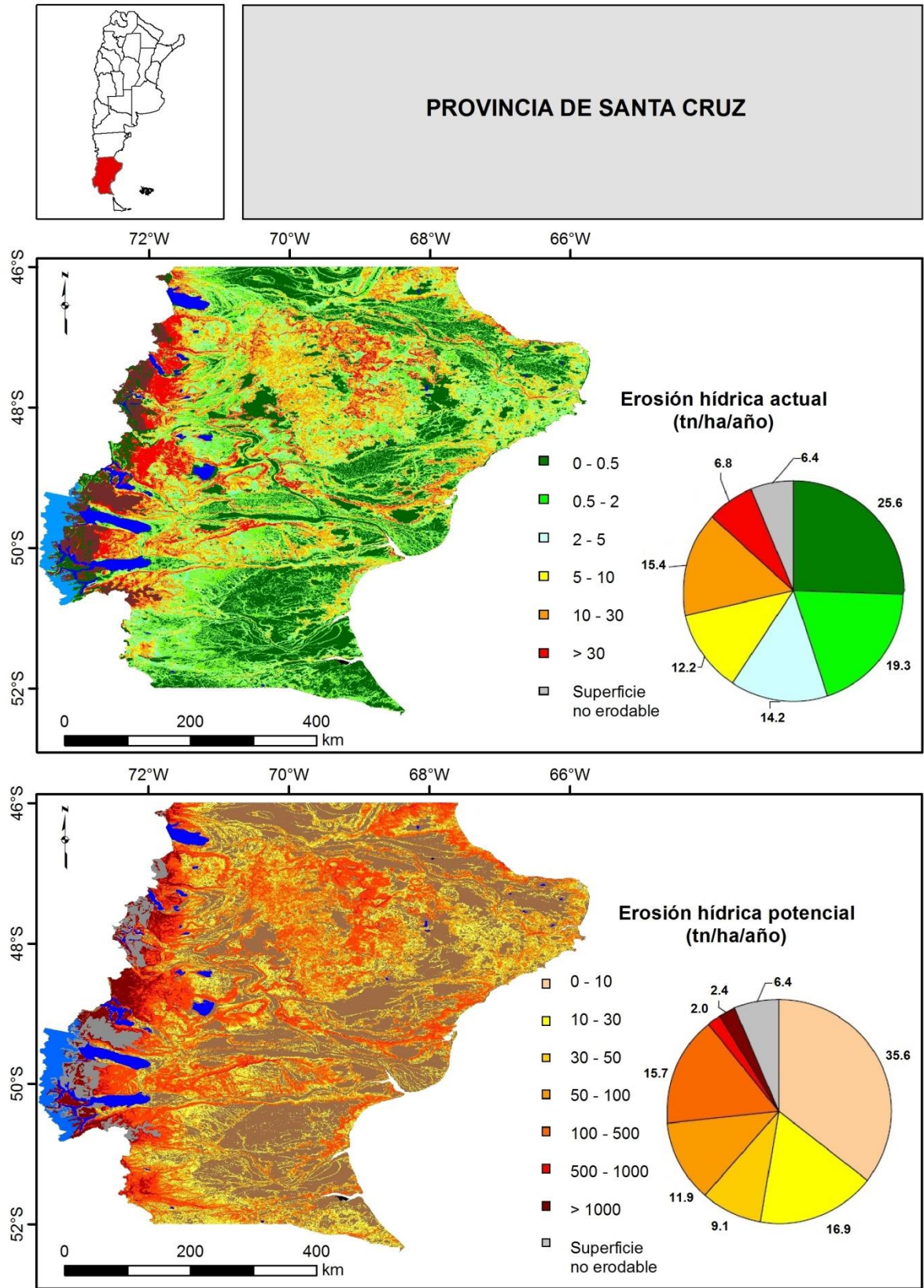


Figura 19. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Santa Cruz.

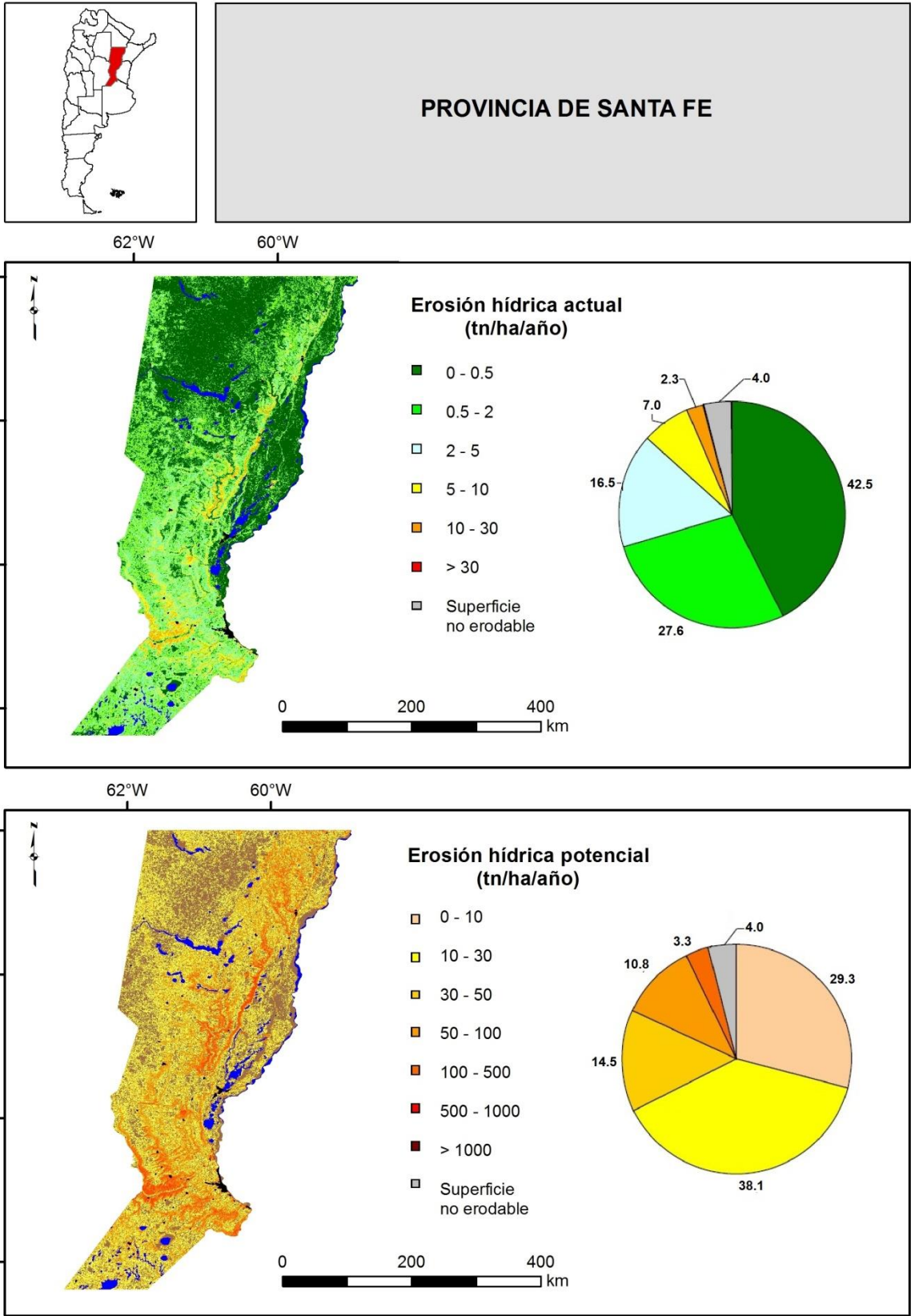


Figura 20. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Santa Fe.

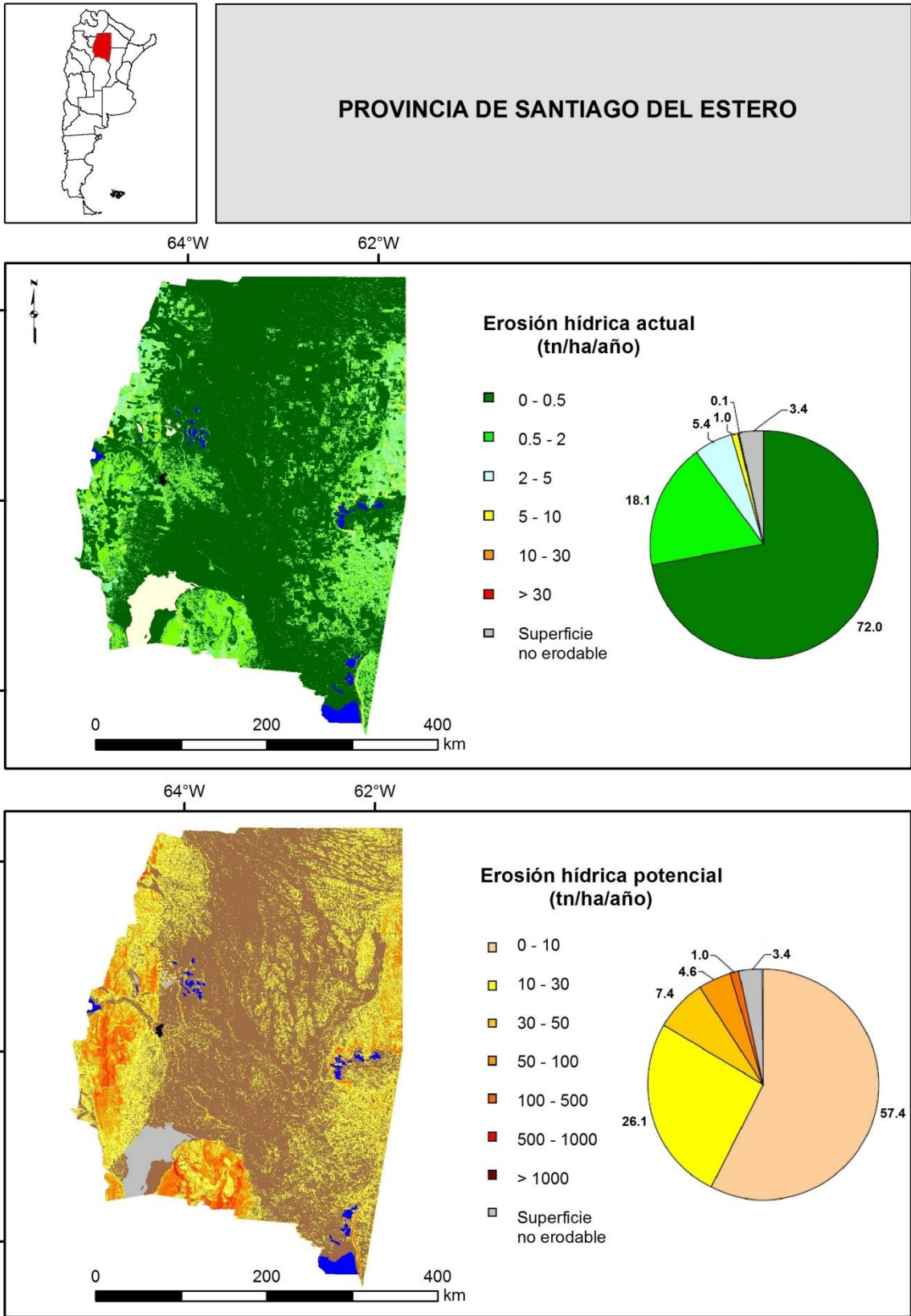
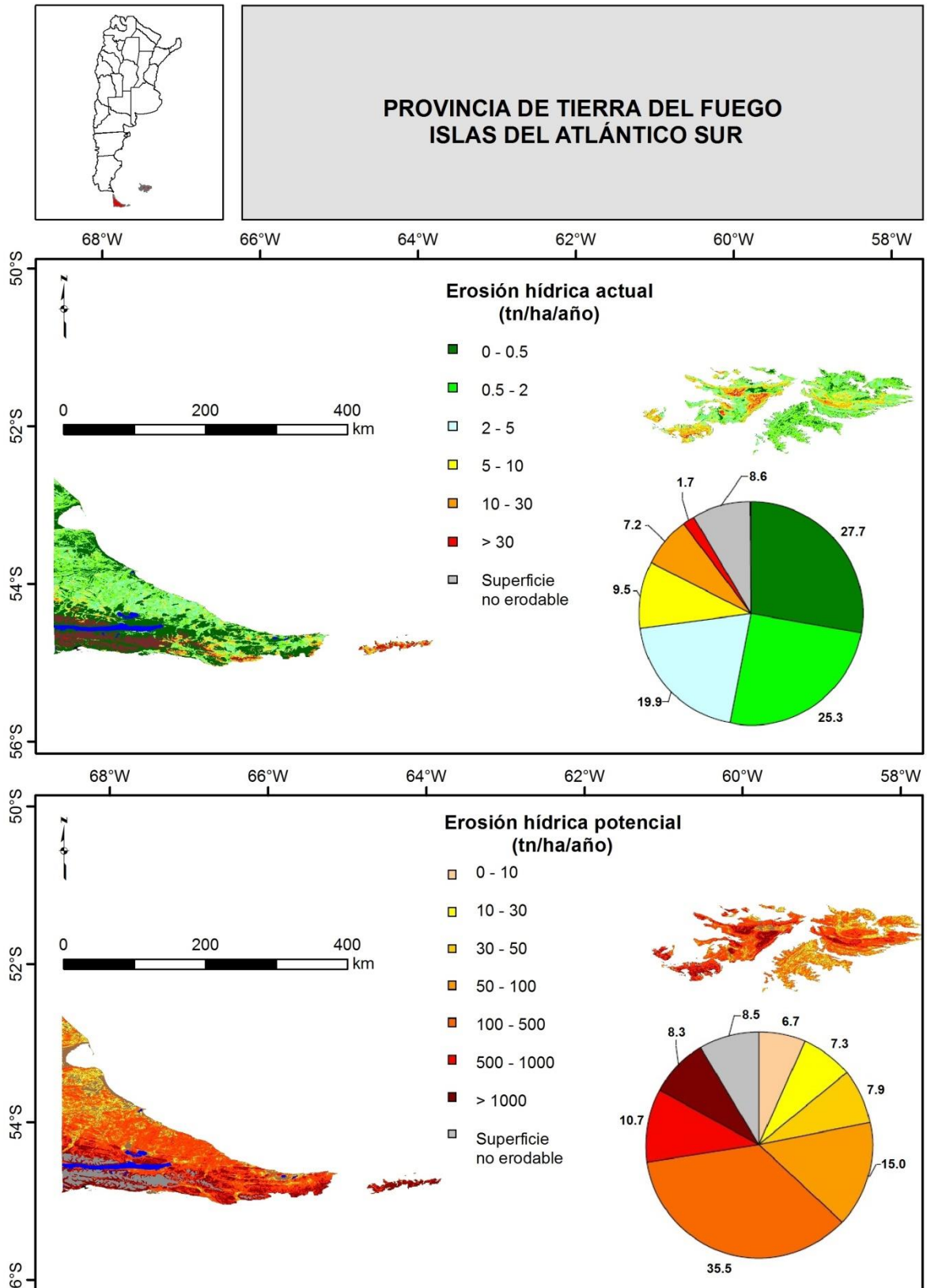


Figura 21. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Santiago del Estero.



**Figura 22.** Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur

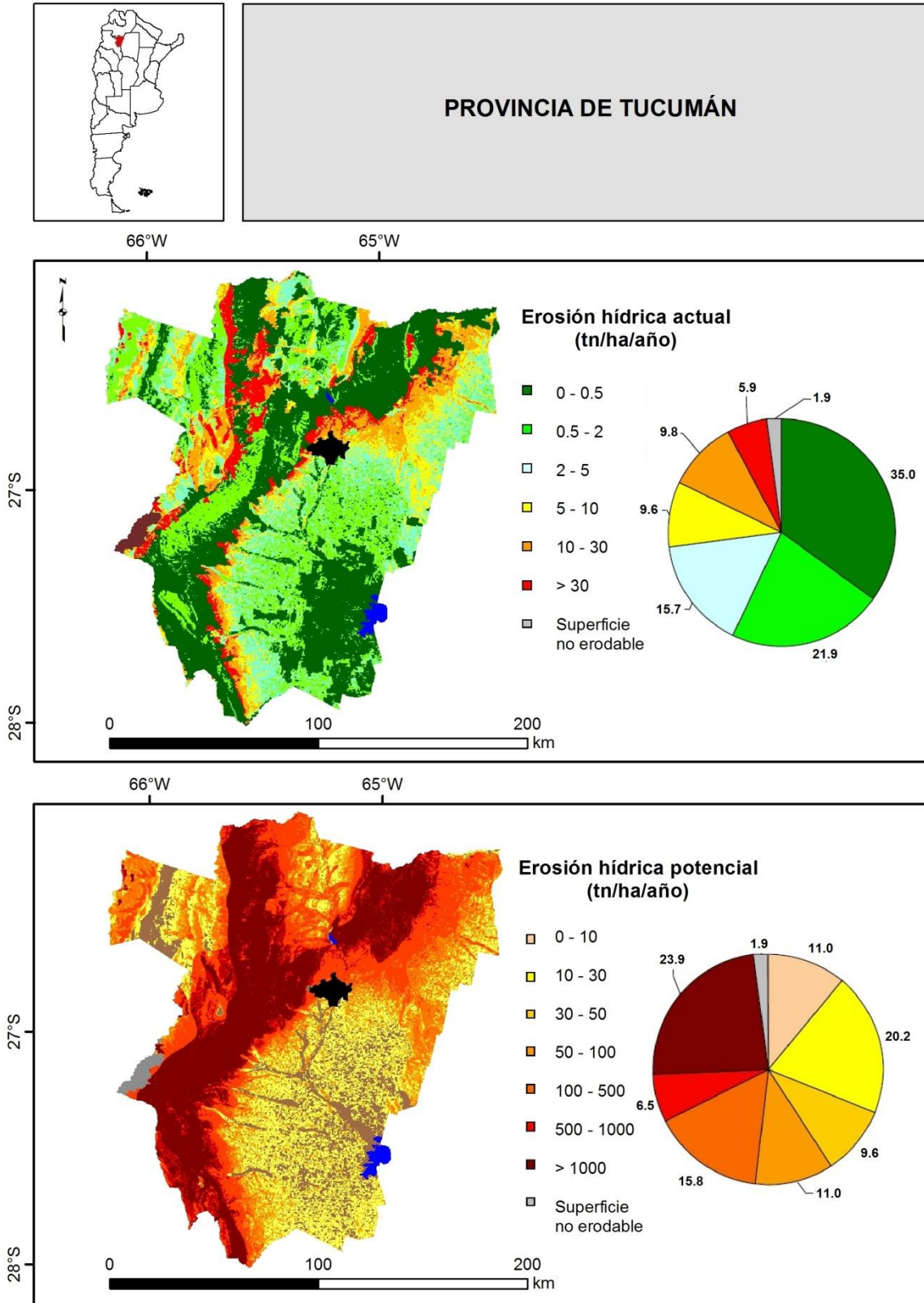


Figura 23. Erosión hídrica actual y potencial para la provincia de Tucumán.

En las últimas décadas Argentina ha transitado un proceso de agriculturización favorecido por la macroeconomía y la adopción de nuevas tecnologías. La expansión de la frontera agropecuaria y la incorporación de tierras al cultivo intensivo de granos y monocultivo de soja afectó a muchas provincias del centro y norte del país. Como resultado de esta transformación el área agrícola a nivel nacional se incrementó de 21 a 36,5 millones de hectáreas durante 1997/2017. Debido a esto, se estima que los procesos de erosión hídrica han tendido a agravarse en las últimas décadas. Según estimaciones recientes, el 23% del territorio nacional estaría afectado por erosión hídrica. De esto se desprende la necesidad de identificar estos procesos y contar con cartografía actualizada del estado de erosión hídrica de los suelos a escala nacional. Esta información constituye una herramienta clave para la toma de decisiones tanto a nivel regional como nacional y base para análisis prospectivos.

**CIRN**   
Instituto de **Suelos**



Observatorio Nacional de la  
Degradación de Tierras  
y Desertificación

ISBN 978-987-521-857-4



Ministerio de Agroindustria  
Presidencia de la Nación