



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE
SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN
TRES CUENCAS DE LA REPÚBLICA
MEXICANA, UTILIZANDO LA
ECUACIÓN UNIVERSAL DE
PÉRDIDA DE SUELO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Eduardo Flores Islas

DIRECTOR DE TESIS

Mtra. Guadalupe Esther Fuentes Mariles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/031/16

Señor
EDUARDO FLORES ISLAS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. GUADALUPE ESTHER FUENTES MARILES, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

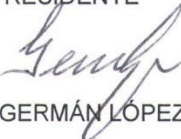
"ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN TRES CUENCAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA, UTILIZANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO"

- INTRODUCCIÓN
- I. EROSIÓN HÍDRICA
- II. INFLUENCIA EN EL AZOLVE DE EMBALSES
- III. ESTUDIOS DEL CASO
- IV. CONCLUSIONES
- ANEXOS
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 5 de abril del 2016.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Agradecimientos.

A Dios, por darme fortaleza y la oportunidad de disfrutar de esta aventura llamada vida.

A mis padres, por su apoyo y cariño incondicional, por sus regaños y consejos que son mi guía de todos los días.

A mi hermano, por su compañía y apoyo a lo largo de la vida.

A Montse por ayudarme a ser una mejor persona todos los días, por su cariño y apoyo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas del conocimiento.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme las herramientas para poder realizar este trabajo.

A la Maestra Guadalupe Esther Fuentes Mariles, por aceptarme en el programa de servicio social del Instituto de Ingeniería y posteriormente ser mi directora de tesis. Gracias por permitirme ayudarla en los proyectos que ha desarrollado.

A mis sinodales, por su revisión y consejos para mejorar este trabajo.

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.....	1
Estructura de la tesis.....	3
Objetivos	4
I. EROSIÓN HÍDRICA.....	5
1.1 Estado del arte.....	6
1.1.1 Métodos cuantitativos.....	8
1.1.2 Métodos cualitativos	22
1.2 Metodología a emplear. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.....	25
2.2.1 Factor de erosividad de la lluvia R	26
2.2.2 Factor de erosionabilidad del suelo K	29
2.2.3 Factor longitud e inclinación de la pendiente LS.....	32
2.2.4 Factor de cobertura vegetal C.....	34
2.2.5 Factor de prácticas de conservación P.....	35
II. INFLUENCIA EN EL AZOLVE DE EMBALSES.....	39
3.1 Métodos de estimación de azolves.....	40
3.1.1 Medición de los sedimentos que transportan las corrientes de entrada	41
3.1.2 Predicción de aporte de sedimentos	41
3.2 Métodos de control de azolves	42
3.2.1 Métodos aplicados directamente a los sedimentos.....	42
3.2.2 Métodos preventivos para el azolvamiento	43
III. ESTUDIOS DE CASO	45
4.1 Caracterización de las cuencas.....	45
4.1.1 Localización.....	53
4.1.2 Fisiografía	55
4.1.3 Geología.....	60
4.1.4 Edafología.....	65
4.1.5 Clima.....	71
4.1.6 Uso de suelo y vegetación	76
4.2 Cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica en cada cuenca.	81
4.2.1 Pichucalco.....	87
4.2.2 San Pedro.....	92
4.2.3 Sonora.....	97
4.3 Análisis de resultados	102
IV. CONCLUSIONES.....	109
ANEXOS	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133



INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial ha provocado la búsqueda y uso de nuevos espacios para solventar las necesidades humanas como la alimentación, vivienda, energía, recreación, etc.

El suelo es la base de la actividad humana y se debe proteger como recurso. Sin embargo, son estas actividades de origen antropogénico las cuales pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión al exponer al suelo al impacto del agua o del viento, derivado de las formas de uso del suelo y su manejo.

En este trabajo se pretende analizar la erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana (cuena del río Pichucalco, del río San Pedro y cuena del río Sonora) con el propósito de analizar cómo influyen en mayor medida en la pérdida de suelo las características propias de cada cuena.

Varios estudios han comprobado que los rasgos más importantes que influyen en la erosión hídrica del suelo son el clima, la topografía y las características de los suelos. Para cuantificar la degradación y erosión del suelo en las cuencas de estudio se empleó el modelo de predicción de erosión hídrica denominado Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), el cual está diseñado para predecir la pérdida anual de suelo causada por la lluvia y el escurrimiento sobre una cuena, con una cobertura vegetal de suelo. Este modelo se basa en el supuesto de que las mayores fuerzas hídricas que intervienen en el proceso son el impacto de las gotas de lluvia y el flujo a través de la superficie del suelo.

Este modelo empírico, es un instrumento metodológico que sirve para la toma de decisiones sobre el manejo y las medidas de conservación del suelo más adecuadas.

El modelo se representa como una ecuación de seis factores donde dos de ellos la erosividad debida a la lluvia (R) y erodabilidad del suelo (K) aportan el orden de

magnitud y las unidades respectivas, mientras que los cuatro restantes, longitud de la pendiente (L), grado de la pendiente (S), manejo de cultivos (C) y prácticas de conservación (P), son factores adimensionales que permiten adaptar las estimaciones a condiciones distintas del terreno.

Para poder llevar a cabo la modelación de la erosión, la herramienta principal que se utilizó es un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que se define como un conjunto de herramientas informáticas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real.

Esta herramienta permite realizar análisis de las características espaciales y temáticas de una zona. Además, de ejecutar simulaciones en el lugar de estudio. En la Fig. 1.1 “Ciclo de un SIG” se muestra el proceso general que se sigue al emplear esta herramienta.

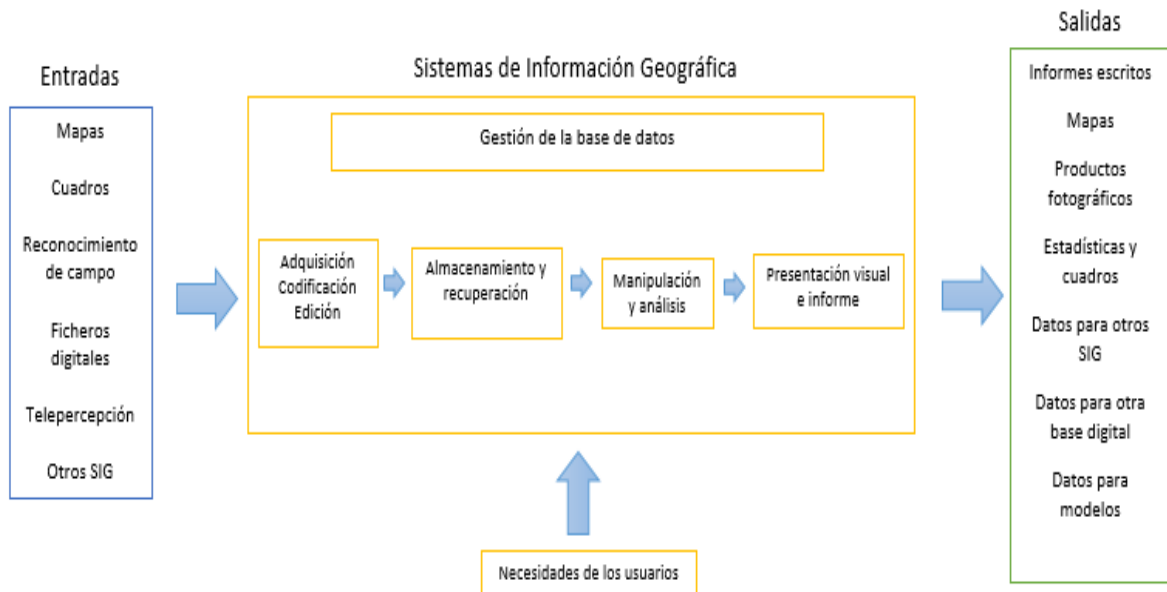


Fig. 1.1 Ciclo de un SIG. Fuente: Fuente: Elaboración propia, basada en Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO).

El SIG que se empleó es *ArcMap 10.2*, el cual permitió representar cada una de las cuencas para su análisis.

Estructura de la tesis

En la “Introducción”, se da una visión general de la erosión hídrica en el mundo, así como la delimitación del estudio de las tres cuencas y se describen los factores que influyen en la erosión hídrica del suelo.

En el primer capítulo, “Erosión hídrica”, se expone la explicación de este proceso con los diferentes métodos y formas con las que se ha estimado este fenómeno a través del tiempo; se plantea como metodología a seguir el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, para lo cual se describe cómo obtener con el software ArcMap 10.2 cada factor que conforma la USLE.

En el segundo capítulo, “Influencia en el azolve de embalses”, se ofrece una descripción de la relación que existe entre la erosión hídrica y el azolve de embalses, así mismo, se plantean medidas aplicables en una cuenca para poder disminuir y prevenir este efecto sobre los embalses.

En el tercer capítulo, “Estudios de caso”, se caracterizan las cuencas de acuerdo a su ubicación, fisiografía, geología, clima, edafología, usos de suelo y vegetación. Se plantean tablas y mapas por cada cuenca. Se realiza la modelación de la USLE con la herramienta de álgebra de mapas de ArcMap 10.2 y se estima la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica. Además, se discute a través de un análisis comparativo, cómo se presenta la erosión hídrica en cada cuenca y se trata de dar una explicación de cuál de los factores que intervinieron son los que tienen mayor peso en la producción de la erosión.

En el quinto capítulo “Conclusiones”, se presenta una opinión integral de la USLE considerando los resultados obtenidos de la modelación.

En el apartado de “Anexos”, se plantea el procedimiento realizando en el software ArcMap 10.2 y la tabla de valores del factor de cobertura vegetal, Factor C.

Objetivos

- Analizar tres cuencas de la República Mexicana que están bajo diferentes condiciones climatológicas, geográficas, fisiográficas y geológicas.
- Establecer cuáles son los factores que más influyen en el efecto de erosión hídrica.
- Proponer prácticas que conserven o mejoren el estado del suelo debido al efecto de la erosión pluvial.
- Determinar la influencia que tienen los sedimentos en los embalses.

I. EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hídrica es un proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por efectos de la acción del agua.

El proceso físico de la erosión hídrica en orden cronológico consiste en (Nuñez J., 2001):

- a) Erosión pluvial. Es consecuencia directa del impacto de las gotas de lluvia en el suelo, las cuales desprenden las partículas del suelo debido a la energía cinética asociada a ella. Un ejemplo donde se puede apreciar este tipo de erosión es la formación de pedestales; consiste en pequeños fragmentos de madera o gravilla protegen al suelo situado en su parte inferior, al caer las gotas de lluvia que generan una formación como la que se muestra en la Fig. 2.1 “Efecto de la erosión pluvial”.



Fig. 2.1 Efecto de la erosión pluvial. Fuente: Nuñez J., 2001

- b) Erosión laminar. Consiste en el arrastre de partículas del suelo, suspendidas en el agua de lluvia, se desplazan en el sentido de la pendiente. Al principio, este tipo de erosión es casi imperceptible y va aumentando su visibilidad conforme pase el tiempo e intensidad de este efecto. Esta etapa es visible cuando existe abundancia de fragmentos rocosos en la superficie y observamos raíces descubiertas.

- c) Erosión en surcos. Se debe al escurrimiento o flujo concentrado del agua; funciona como mecanismo de transporte de las partículas de suelo, los cuales circulan mezclados y concentran su flujo a lo largo de pequeñas depresiones del terreno ocasionando un surco. La concentración del flujo al escurrir obedece a las irregularidades, rugosidades y presencia de obstáculos en el camino del flujo.

- d) Erosión en cárcavas. Se produce por una fuerte concentración del agua de escurrimiento en los sectores más bajos de la ladera. Las características que lo definen son su forma (forma de “V” en laderas y de “U” en terrenos planos) y un constante proceso erosivo (ciclos repetitivos que van ampliando la cárcava en tamaño y longitud).

1.1 Estado del arte

El estudio de la erosión hídrica se basa en la definición de los factores más importantes que influyen en el mecanismo de erosión; se establecen relaciones entre estos factores y la pérdida de suelo mediante experimentos, mediciones, observaciones y la estadística.

En la Fig. 2.1 se presenta un mapa donde se plantean los principales métodos de estudio de la erosión hídrica y posteriormente una investigación documental del conocimiento acumulado del tema.

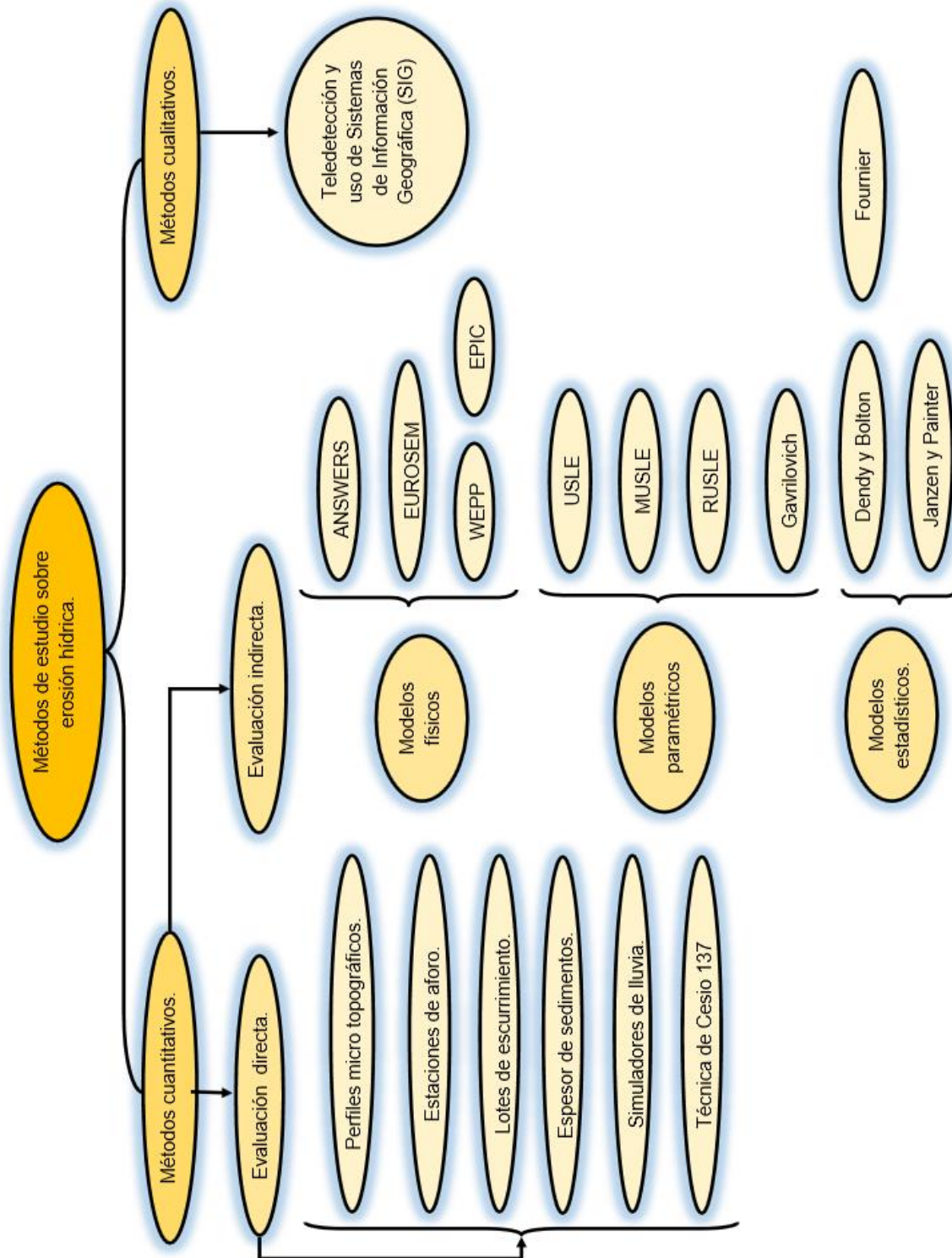


Fig. 2.2 Métodos de estudio sobre erosión hídrica. Fuente: Elaboración propia.

1.1.1 Métodos cuantitativos

Permiten la estimación numérica de la erosión con el propósito de establecer diferentes grados de la misma; estos modelos pueden emplearse para el desarrollo de modelos cualitativos.

Evaluación directa

Permiten determinar la magnitud de la erosión mediante mediciones sobre el terreno, de parámetros asociados al suelo, de los sedimentos producidos y estimaciones a partir de ensayos. Los métodos directos más utilizados se presentan a continuación.

Perfiles micro topográficos

Se basa en medir las variaciones en el micro relieve ocasionadas por la pérdida del material superficial. La evaluación es automatizada a través de un perfilómetro de varillas, el cual sirve para monitorear la superficie del terreno en intervalos de tiempo, por lo que la tasa de erosión se contabiliza directamente como el volumen de suelo removido.

Este método es recomendado en áreas muy erosionadas, áreas abarrancadas o con cultivos arbóreos en pendientes fuertes, donde el proceso de erosión es muy acelerado (Sancho et al., 1991).

Estaciones de aforo y colectores

Las estaciones de aforo y colectores han sido usadas para medir el flujo de agua y sedimentos (observación directa). La erosión de suelos es un proceso de transporte de sedimentos los cuales pueden ser momentáneamente retenidos o se hacen pasar por estructuras de medida conocidas para cuantificar el suelo perdido. Además, en estas unidades hidrológicas se estudian procesos erosivos, emisión de sedimentos, arrastres y depósitos de materiales.

Este método se considera como un buen indicador de la erosión en la cuenca, sin embargo, tiene la desventaja de que no permite diferenciar los sectores de la cuenca

con mayor afectación (Gallart, 1992; García Ruiz, 1992; Rojo Serrano y Sánchez Fuster, 1997).

Lotes de escurrimiento

Consiste en trabajos experimentales en los que se aísla una superficie conocida en diferentes áreas representativas, al final del lote se colocan instrumentos de medición para conocer el volumen de los escurrimientos superficiales y coleccionar los sedimentos producidos. En estos lotes se trata de reflejar el proceso de erosión y sedimentación. Por lo cual, el escurrimiento que se presenta en ellos debe de ser capaz de producir el desprendimiento del suelo y generar cárcavas, además de permitir la deposición de sedimentos.

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para comprobar variaciones de tasas de erosión debidas a las áreas vertientes, a la duración e intensidad; para estimar la cantidad de sedimentos que se producirán bajo ciertas condiciones, para analizar la relación entre laderas y transporte de sedimentos, etcétera.

Este tipo de lotes pueden ser abiertos o cerrados. Los primeros quedan delimitados por barreras naturales, por lo cual suponen un resultado más apegado a la realidad. Su principal desventaja se origina en la dificultad de delimitar y fijar, espacial y temporalmente la red de drenaje. Por otro lado, los lotes cerrados generalmente se instalan en campos experimentales en el que sus límites son realizados con varios materiales (García Ruiz y López Bermúdez, 2009).

Espesor de sedimentos

La utilización de las agujas de erosión (también denominadas varillas, clavos, piquetas y estacas) consiste en introducir parcialmente en el suelo una aguja y medir cada cierto intervalo de tiempo la altura del extremo superior con respecto a la superficie topográfica. Los ascensos y descensos de la superficie del terreno pueden obedecer a procesos de erosión y sedimentación.

Las agujas o piquetas de erosión se recomiendan para zonas con altas tasas de erosión y para mediciones que se realizarán en un periodo largo de tiempo (Sancho et al., 1991).

Simuladores de lluvia

Los experimentos con simuladores de lluvia, permiten trabajar con todos los factores que interviene en la erosión hídrica, modificar la intensidad y duración de la lluvia, que en condiciones naturales no podría hacerse. Para estos trabajos se colectan muestras de suelo de los lugares que se desea estudiar y se someten a diferentes lluvias simuladas, en donde se evalúan las condiciones originales de cobertura y prácticas de manejo, o se validan prácticas de conservación de suelo y agua. Este método permite el estudio de la erosión producida por el escurrimiento y salpicadura (Bubbenzer y Jones, 1971; Roth, 1985; Cérda, 1999; Duiker, 2001).

Las desventajas de este método se presentan cuando se extrapolan los resultados a condiciones diferentes a las del experimento inicial, en donde existe poca uniformidad de intensidad de precipitación y las características del agua empleada alteran los resultados del experimento (tamaño de gota, intensidad de precipitación y conductividad).

Evaluación indirecta

Permite la simulación de escenarios y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Este tipo de evaluación, consiste en el empleo de modelos para representar la realidad, los cuales son mejores cuanto más se adapten a la realidad, utilizando la información de los procesos concretos que se desea representar, así como las leyes físicas y su generalización.

Existen tres tipos de análisis que se pueden realizar, el llamado de caja negra, que consiste en limitar las correlaciones de las entradas y salidas del sistema (modelos estadísticos), el de caja gris que consiste en que sólo se conocen algunos de los procesos, identificando alguna de las relaciones causa efecto en el sistema (modelos paramétricos). El último tipo de análisis es el nombrado como caja blanca, en el que se conocen todos los detalles del proceso (modelos físicos).

Modelos estadísticos

Este tipo de métodos se valida mediante el análisis de entrada y salida de información. Además, se determina una relación entre mediciones de degradación específica, parámetros del clima y relieve.

A continuación, se presenta una descripción de algunos métodos estadísticos que se basan en ecuaciones de regresión:

Janzen y Painter (1974)

Estos autores definieron 4 zonas climáticas de acuerdo a la temperatura y definieron sus ecuaciones de regresión correspondientes que sugieren que el volumen de sedimentos producido aumenta conforme a la altitud, relieve, precipitación, temperatura y susceptibilidad del material, mientras que este volumen disminuye conforme a la protección de cubierta vegetal que tenga el terreno, esto quiere decir que la cobertura vegetal disminuye los escurrimientos y el efecto de la erosión pluvial

Dendy y Bolton (1976)

Realizaron el estudio de depósitos sedimentados en 800 embalses en varias zonas de los Estados Unidos. Desarrollaron dos ecuaciones que relacionan el volumen de sedimentos producido con el escurrimiento y superficie.

Para escurrimiento inferior a 50 mm/año:

$$S = \left(\frac{Q}{50.8} \right)^{0.46} \left[1.43 - 0.26 \left(\log \frac{A}{2.59} \right) \right]$$

Para escurrimiento superior a 50 mm/año:

$$S = 685.79 \left(e^{-0.11 \left(\frac{Q}{50.8} \right)} \right) \left[1.43 - 0.26 \left(\log \frac{A}{2.59} \right) \right]$$

donde:

S: volumen de sedimentos producidos, en $t/km^2/año$

Q: escorrentía media anual, en $mm/año$

A: área de la cuenca, en km^2

Modelos físicos

Este tipo de modelos consiste en la aplicación de herramientas matemáticas aplicadas a la hidrología, se realiza un modelo que se somete a diferentes variables para observar su respuesta. Tratan de representar las componentes individuales que afectan a la erosión, así como su comportamiento al interactuar conjuntamente.

Los modelos físicos analizan los procesos que regulan la generación de sedimentos y caudales, atendiendo a las leyes físicas que gobiernan el transporte; en general, se basan en el principio de la conservación de la masa y la energía, utilizan la ecuación de continuidad para flujo de agua y sedimentos. Generalmente, los procesos incorporados en los modelos de erosión de base física incluyen el arranque de partículas por el impacto de las gotas de lluvia, el transporte por impacto de gotas de lluvia, y el transporte y sedimentación por el escurrimiento. Los modelos de base física se desarrollaron a partir de los años 70 del siglo XX, coincidiendo con el aumento de la capacidad de computación numérica (Alatorre y Beguería, 2009).

A continuación, se presenta una breve descripción de los modelos físicos con mayor aplicación (Almorox et al., 2010).

Simulador de respuesta de ambiente en cuencas de fuentes no puntuales, (ANSWERS)

Este modelo es capaz de simular el movimiento de sedimentos en cuencas, en las que se practica la agricultura como principal actividad de uso de suelo durante un evento de precipitación. Necesita como datos del terreno: tipo de suelo, usos de suelo, pendientes, aspecto de las pendientes y descripción de los canales (Beasley et al., 1980, Beasley y Huggins, 1991; Fisher et al., 1998).

Modelo Europeo de Erosión (EUROSEM)

Se basa en tres funciones operativas, la primera es la generadora de escurrimiento; parte de la precipitación para simular la interceptación para calcular el volumen total y el escurrimiento neto, la segunda es un estimador de la cantidad de suelo desprendido

por el impacto de las gotas de lluvia y por el escurrimiento superficial, y la tercera es la capacidad de transporte de sedimentos (Chisci y Morgan, 1988).

Proyecto de predicción de erosión debida al agua (WEPP)

Este modelo se basa en conocimientos fundamentales de hidrología, mecanismos de erosión, teoría de infiltración, física de suelos e hidráulica. Simula el fenómeno en laderas de montañas y cuencas; puede simular años continuos, simula la distribución espacial y temporal de la erosión para una ladera completa o en cada punto de ella el transporte y deposición de sedimentos en cuencas menores a 260 hectáreas (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1985).

Calculadora de impacto en la productividad debida a la erosión (EPIC)

Es un modelo matemático que simula la interacción suelo- clima-planta-manejo para conocer la influencia de la pérdida de suelo en la productividad. Simula los procesos involucrados simultáneamente utilizando una escala de datos diarios, ocasionando que proporcione valores muy exactos. Es capaz de simular cientos de años, dado que los procesos de erosión ocurren relativamente lentos. Otra característica es que se aplica a un amplio rango de suelos, climas y cultivos.

Además, permite evaluar las alternativas de manejo de cultivos y suelos detalladamente, permite al usuario evaluar los efectos de rotaciones de cultivos, mecanización de la labranza, manejo de residuos, prácticas de control de escurrimiento, estrategias de riego y otros factores (Williams J.R., 1989).

Otros modelos físicos reportados en la literatura técnica son: (Almorox et al., 2010)

- Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems CREAMS (Knisel, 1980).
- GAMER (Rudra et al., 1986).
- Griffith University Erosion System Template GUEST (Rudra et al., 1986).
- SEM (Storm et al., 1987).
- SHESED (Wicks, 1988)
- RUNOFF (Borah, 1989).

- Distributed Slope Stability Model SLAM (Wu y Sidle, 1995).
- Kinematic Erosion Simulation (Smith et al. 1995).
- Limburg Soil Erosion Model LISEM (De Roo, 1996; De Roo et al. 1996, De Roo y Jetten, 1999).
- MIKE-11 (Hanley et al., 1998).
- SHALSTAB (Dietrich y Montgomery, 1998).
- EROSION-3D (Schmidt et al., 1999, Von Werner, 2003).
- Pan-European Soil Erosion Risk Assessment PESERA (Kirkby et al., 2004)
- CASC2D-SED (Johnson et al., 2007).

Modelos paramétricos

Este tipo de modelos consisten en hacer formulaciones empíricas que tratan de interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. Los parámetros de los modelos, generalmente se obtienen por extrapolación o por comparación entre el fenómeno real y un experimento.

Los inconvenientes de este tipo de modelos es que son estacionarios (no toman en cuenta cambios en la cuenca y en procesos hidrológicos) y están limitados a las condiciones en las que se elaboraron.

Las primeras propuestas de modelos de erosión se desarrollaron en Estados Unidos a partir de la necesidad de tener una respuesta en las elevadas tasas de erosión y pérdida de suelo debida a la implementación de nuevas técnicas de agricultura en la década de los años veinte del siglo pasado.

Según los registros históricos que se tienen, la primera ecuación registrada fue para el uso en planes de conservación, (Zingg, 1940), relaciona la pérdida de suelo con la erosión laminar y concentrada, las cuales, dependen de la longitud y grado de la pendiente.

Universal Soil Loss Equation (USLE)

También es denominada como Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, (EUPS o USLE por sus siglas en inglés). Se dedujo a partir de los datos obtenidos tras la investigación de la erosión en más de 10,000 parcelas a lo largo de 49 localidades de los Estados Unidos de Norteamérica.

Para la evaluación de los procesos de erosión hídrica se requiere el empleo de varios tipos de datos como: los climáticos, hidrológicos, topográficos, vegetación, tipo de suelo y prácticas de conservación. Mediante el procesamiento de estos datos se obtienen los parámetros de la USLE y se calcula la pérdida anual de suelo producida por la erosión hídrica sin estimar el transporte de sedimentos en los cauces (Wischmeier y Smith, 1978).

La ecuación que describe el proceso de erosión es:

$$A = (R)(K)(L)(S)(C)(P)$$

donde:

A: promedio anual de pérdida de suelo, en $t\ ha^{-1}año^{-1}$

R: factor de erosividad de la lluvia, en $MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}año^{-1}$

K: factor de erosionabilidad del suelo, en $t\ ha\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}\ ha^{-1}$

L: factor de longitud de la pendiente, adimensional

S: factor de grado de la pendiente, adimensional

C: factor de manejo de cultivos, adimensional

P: prácticas mecánicas de control de la erosión, adimensional

Como inconvenientes destacan que el modelo no es apto para su uso en un único evento, lo que imposibilita su utilidad para eventos únicos de gran intensidad, no toma en consideración la deposición del sedimento que ocurra en el área que se modela.

Modified Universal Soil Loss Equation (*MUSLE*)

La MUSLE evalúa el volumen de sedimentos producido en una cuenca durante un evento de precipitación. Fue desarrollada por J.R. Williams, quien utilizó 18 cuencas en Estados Unidos para su desarrollo, este modelo utiliza un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía de la USLE (Williams, J. R., and H. D. Berndt., 1977). La expresión de este modelo es:

$$A = 11.78(C_e q_p)^{0.56} (K)(L)(S)(C)(P)$$

donde:

A: rendimiento de sedimento de la cuenca, en ton.

C_e: coeficiente de escurrimiento por tormenta, en mm

q_p: máximo caudal instantáneo, en m³/s

K: factor de erosionabilidad del suelo, en [Mg/ha] [m²h / hj cm]

LS: factor topográfico, adimensional

C: factor de manejo de cultivos, adimensional

P: factor de prácticas de conservación, adimensional

Para el cálculo del coeficiente de escurrimiento *C_e*, se emplea el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972):

$$C_e = \frac{(P - 0.2(S))^2}{P^2 - 0.8(S)(P)}$$

donde:

C_e: coeficiente de escurrimiento, en mm.

P: altura total de precipitación de la tormenta, en mm.

S: parámetro de retención de agua en el suelo, en mm.

El parámetro de retención de agua en el suelo se calcula con:

$$S = 254 \left[\left(\frac{100}{CN} \right) - 1 \right]$$

donde:

S: parámetro de retención de agua en el suelo, en mm.

CN: número de curva

El número de curva, es un parámetro que relaciona el suelo, la cobertura y el manejo de la cuenca, se obtiene de la Tabla 2.2 (SCS, 1977).

El SCS clasificó a los suelos en cuatro grupos de acuerdo con sus características hidrológicas para producir escurrimiento como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Grupos de suelos según el SCS. Fuente: Aparicio J. (1992).

Grupo de Suelos	Descripción de las características del suelo.
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil.
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos. Tiene una infiltración mayor que el promedio cuando está húmedo.
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio.
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados.

Tabla 2.2 Valor del número de curva según el grupo de suelo. Fuente: Aparicio J. (1992)

Uso del suelo	Cobertura		Grupo de Suelos			
	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos Rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	85	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Caminos de tierra		Buena	71	82	87	89
Caminos pavimentados		Buena	74	84	90	96

El caudal pico q_p se puede calcular mediante el método racional, el cual obedece a la siguiente ecuación:

$$q_p = CiA / 360$$

donde:

q_p : caudal pico, en m^3 / s

C : coeficiente de escurrimiento

i : intensidad de la precipitación, en mm / h

A : área de la cuenca, en ha .

Revised Universal Soil Loss Equation (*RUSLE*)

Renard et al. (1991) modificó la USLE al introducir valores de erosividad de la lluvia adaptados a variaciones regionales de los Estados Unidos y a la reducción de la erosividad que causa el agua en suelos inundados. Esta ecuación a diferencia de la USLE, pretende tener los siguientes alcances:

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Nuevos valores de erosividad de lluvias-escurrimientos en condiciones áridas.
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable K y métodos alternativos de su estimación cuando el nomograma no es aplicable.
- Investigación de un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie) y rugosidad del terreno.
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente LS que consideran porcentajes de erosión en surcos e ínter-surcos.
- La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable.
- Nuevos valores de prácticas de conservación P .

Los cambios que se hicieron a los parámetros son:

- Estimación del factor K en función del diámetro de las partículas. Además, toman en cuenta los fragmentos rocosos del suelo.
- Modificaron la erosionabilidad del suelo según las variaciones estacionales e incluyen una metodología alterna para estimar este factor cuando el nomograma no sea aplicable.
- El parámetro LS refleja las relaciones de erosión en surcos y toma en cuenta la forma de la pendiente.
- El factor C incluye modificaciones para ser estimado según el uso principal de la tierra, copa del cultivo, cobertura superficial y rugosidad del suelo.

A continuación se presentan las modificaciones que se hicieron a los parámetros de la USLE.

La actualización al factor K quedó definida en la siguiente ecuación:

$$K = \left(\frac{1}{7.594}\right)\left(\frac{1}{10^4}\right)(2.1)(12 - OM)(M^{1.14}) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)/100$$

donde:

K : factor de erodabilidad del suelo

OM : materia orgánica

M : producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias

S : código de la estructura del suelo

P : código de permeabilidad

El factor L es definido como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m$$

donde:

L: factor de longitud de pendiente

λ: longitud de la pendiente, en pies

72.6: longitud de la parcela unitaria RUSLE

m: exponente de la longitud de la pendiente

El exponente de la longitud de la pendiente puede ser calculado como:

$$m = 0.134(\ln(\Theta)) + 0.192$$

donde:

m: exponente de la longitud de la pendiente

Θ : ángulo de la pendiente en porcentaje

Método Gavrilovich (1988)

En este modelo se cuantifica el proceso erosivo en función de las características morfológicas, vegetación, temperatura, uso de suelo y distribución de precipitaciones.

Se establece un valor medio de la erosión anual resultante con la siguiente ecuación:

$$G = W(R)$$

donde:

G: descarga media anual del material erosionado, en m^3 / año

W: producción de sedimentos, en m^3 / año

R: coeficiente de retención

La producción de sedimentos se puede calcular como:

$$W = T(h)(\pi)(Z^2)(F)$$

donde:

T: coeficiente de temperatura

h: precipitación media anual, en mm / año

Z: coeficiente de erosión

F: superficie de la zona de estudio, en km^2

Los coeficientes T y Z pueden ser calculados mediante:

$$T = \left(\frac{t_m}{10} + 0.1 \right)^{0.5}$$

donde:

T : *coeficiente de temperatura*

t_m : *temperatura media anual, en grados centígrados*

$$Z = X(Y)(\varphi + I^{0.5})$$

donde:

Z : *coeficiente de erosión*

X : *grado de protección del suelo debida a la vegetación*

Y : *resistencia a la erosión de acuerdo a caract. geolitológicas*

φ : *estado de inestabilidad erosiva de la cuenca*

I : *pendiente media de la cuenca, en %*

1.1.2 Métodos cualitativos

Este tipo de metodología se basa en la observación de la manifestación de la erosión de suelo apoyado en material cartográfico de percepción remota y observación en campo.

Se verifican los estados de erosión real mediante sensores ubicados en cada zona de estudio en los que se hacen mediciones directas del fenómeno. Además, se elaboran mapas cartográficos en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (suelos, vegetación, topografía, etc.) mediante imágenes y posterior verificación en campo.

La teledetección mediante imágenes satelitales se ha convertido en una herramienta para el tratamiento e interpretación de datos, permite una investigación más eficiente de parámetros geofísicos del área de estudio.

En la actualidad, el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han permitido la expansión de este tipo de evaluación debido a su facilidad y precisión aceptable. El empleo de este tipo de tecnología se ha convertido en una buena opción para el tratamiento de los datos de imágenes satelitales, los SIG permiten una visión objetiva y sistemática del área de estudio y su evolución temporal que permite la representación y generación de cartografías automáticas. Además, el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías han permitido la evolución de algunos métodos de estimación de la erosión hídrica hacia otros más complejos y aplicables a mayores superficies.

Algunas funciones de los SIG son:

a) Entrada de información.

Los procedimientos que se emplean para su ingreso, dependen de las fuentes de información disponibles. Existen dos tipos de fuentes de datos: por un lado, la observación directa de la realidad, y por el otro, el uso de fuentes secundarias como mapas analógicos y fotografías aéreas, información censal o de cualquier otro tipo, pero que se pueda referenciar espacialmente. La escala de los mapas que se manejen influirá en la precisión de los resultados de salida que se requiera.

b) Gestión de datos.

Gestión y manipulación para almacenar y recuperar la información de la base de datos. Implica como organiza la información espacial y temática en la base de datos.

c) Transformación y análisis de datos.

En esta etapa, se produce el análisis y manipulación de los datos existentes con el fin de generar una nueva información. Algunas de las operaciones más comunes son la recuperación, combinación, reclasificación, superposición, correlaciones, etc., de las distintas capas temáticas espaciales, que permiten desarrollar e implementar un modelado espacial que permita la generación de posibles soluciones a problemas inicialmente planteados

Puede considerarse a un SIG como un “modelo de simulación” con la finalidad de planificar una acción.

d) Salida de datos.

La salida de datos es la operación que permite presentar el resultado del tratamiento de los mismos en una forma comprensible para el usuario. Uno de estos procedimientos es la visualización; la misma puede ser temporal (monitores gráficos) o permanente (en papel, etc.). Se incluyen aquí los dispositivos como plotters, impresoras, monitores, etc., que generan imágenes tanto en formato ráster como vectorial.

Los datos espaciales en un SIG pueden entenderse como un conjunto de mapas de una porción específica de la superficie, representando cada uno de ellos una variable temática (hidrografía, ocupación del suelo, etc.). Cada una de estas variables temáticas recibe el nombre de capa temática o *layer*.

Los tipos de datos que utiliza un SIG son ráster y vectorial, el primero trata de una retícula regular en la que cada celda tiene un valor asignado. Los datos vectoriales se definen con puntos, líneas y polígonos para regiones con un mismo valor.

1.2 Metodología a emplear. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

Se escogió este método debido a que se emplea una ecuación práctica que nos permite representar diferentes áreas con solo conocer los factores para representar el efecto de erosión, además, es posible manipularlos e introducirlos en la ecuación para conocer el efecto que habría sobre nuestra área de estudio bajo las condiciones deseadas. Recordemos que la USLE agrupa interrelaciones de parámetros que influyen en el índice de erosión, sus valores son expresados numéricamente para un sitio específico. La forma de la ecuación es la siguiente:

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

donde:

A: promedio anual de pérdida de suelo, en t /ha¹año⁻¹

R: factor de erosividad de la lluvia, en MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹

K: factor de erosionabilidad del suelo, en t ha h MJ⁻¹mm⁻¹ ha⁻¹

L: factor de longitud de la pendiente, adimensional

S: factor de grado de la pendiente, adimensional

C: factor de manejo de cultivos, adimensional

P: factor de prácticas mecánicas de control de la erosión, adimensional

Cuando se consideran los seis factores de la USLE, el resultado de este producto es la pérdida actual de suelos

2.2.1 Factor de erosividad de la lluvia R

El factor R representa la erosividad debida a la lluvia y ésta es una función del clima en una localización particular. La importancia de la lluvia como motor de erosión depende de la intensidad (cantidad de lluvia por unidad de tiempo), tamaño de las gotas, velocidad de impacto de las gotas de lluvia y otros factores menores como el ángulo de caída.

Uno de los índices, que ha mostrado ser eficiente, para la estimación de pérdidas de suelo en diversas partes del mundo es propuesto por Wischmeier y Smith, 1978, se define como el producto de dos características de la lluvia:

1. La energía cinética total de la lluvia (Ec)
2. La intensidad máxima en treinta minutos (I_{30})

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

donde:

EI_{30} : índice de erosividad para un evento, en $MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$

Ec : energía cinética total de la lluvia, en MJ/ha

I_{30} : intensidad máxima de la lluvia en 30 min, en mm/h

La suma de los EI_{30} durante un año forma el factor de erosividad anual de la lluvia R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

$$R = \sum EI_{30}$$

Para la estimación de R , es necesario contar con registros de lluvias de la zona y a partir de estos se calcula el valor de la energía cinética de la lluvia, Ec , para cada intervalo de tiempo.

La energía cinética de la lluvia se obtiene con la ecuación:

$$Ec = \sum_{j=1}^n e_j p_j$$

donde:

e_j : energía cinética para el intervalo de tiempo j , en MJ / ha mm

p_j : cantidad de lluvia para el intervalo de tiempo j , en mm

n : tormenta

La estimación de e_j se realiza con la siguiente ecuación (Wischmeier y Smith, 1978):

$$e_j = (0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j) \quad I_j < 76 \text{ mm/h}$$

$$e_j = 0.283 \quad I_j > 76 \text{ mm/h}$$

donde:

e_j : energía cinética para el intervalo de tiempo j , en MJ / ha mm

I_j : intensidad de lluvia del intervalo, en mm / h

El factor R depende de la intensidad de lluvia y de la lluvia total. El factor se estima para cada una de las tormentas significativas ocurridas durante un registro de una longitud aceptable. Normalmente es determinado para cada mes del año y se presenta como valores acumulados. Para la estimación de R , es necesario contar con registros de lluvias en las estaciones. A partir de esos registros se calcula el valor de la energía de la lluvia, E , para cada intervalo de tiempo de lluvia constante. Luego se calcula el índice de erosión, EI , para el evento Foster et al. (1981).

Para generar los mapas del factor R en cada cuenca de estudio del presente trabajo, se utilizó el mapa de isoerosión de la República Mexicana en formato digital (se obtuvo a partir del trabajo Evaluación de la Perdida de Suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000;), se elige esta manera de obtener este factor debido a la disponibilidad de los datos y la forma práctica de poder escoger cuencas para su estudio. Para ver el procedimiento que se siguió ver el apartado de “Anexos”.

Existen otras metodologías menos empleadas para calcular el factor R ; una de ellas es la propuesta por Cortés (1991), en la cual generó un mapa de isoerosividad de la lluvia de la República Mexicana con datos de 53 estaciones meteorológicas con periodos que varían de 1 a 11 años tomando como la generalidad cuatro años. En dicho trabajo de

datos se formaron 14 regiones diferentes las cuales se muestran en la Fig. 2.3 “Regiones de erosión de la República Mexicana”.



Fig. 2.3 Regiones de erosión de la República Mexicana. Fuente: Cortes (1991).

En la Tabla 2.3 se presentan las ecuaciones para cada región del país con modelos que Cortés (1951) generó al analizar los eventos de lluvia, estimando el EI_{30} con las distintas ecuaciones que estiman el valor de EI_{30} en función de la lluvia anual.

Tabla 2.3 Índice de erosividad para cada región de la República Mexicana. Fuente: Cortes (1991).

Región	Ecuación Y= EI_{30} x=lluvia anual	R^2	Promedio anual	
			Lluvia (mm)	EI_{30} MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹
I	$Y=1.20785x+0.002276x^2$	0.92	375.03	804.92
II	$Y=3.45552x+0.006470x^2$	0.93	172.24	854.92
III	$Y=3.67516x-0.001720x^2$	0.94	312.16	963.47
IV	$Y=2.89594x+0.002983x^2$	0.92	401.92	1715.16
V	$Y=3.48801x-0.000188x^2$	0.94	576.36	1946.41
VI	$Y=6.68471x+0.001680x^2$	0.90	405.06	3001.64

Tabla 2.3 Continuación Índice de erosividad para cada región de la República Mexicana.

Fuente: Cortes (1991).

Región	Ecuación		R ²	Promedio anual	
	Y=EI ₃₀	x=lluvia anual		Lluvia (mm)	EI ₃₀ MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹
VII	Y=0.03338x+0.006661x ²		0.98	677.5	3302.09
VIII	Y=1.99671x+0.003270x ²		0.98	812.16	3872.60
IX	Y=7.04579x-0.002096x ²		0.97	1050.18	4941.10
X	Y=6.89375x+0.000442x ²		0.95	871.86	6366.55
XI	Y=3.77448x+0.004540x ²		0.98	1042.19	9096.08
XII	Y=2.46190x+0.006067x ²		0.96	1208.41	12955.07
XIII	Y=10.74273x-0.001008x ²		0.97	1860.3	16551.52
XIV	Y=1.50046x+0.002640x ²		0.95	2183.99	16807.50

2.2.2 Factor de erosionabilidad del suelo *K*

Este factor hace referencia a la susceptibilidad del suelo para resistir a agentes erosivos, como el impacto directo de la gota de lluvia y escurrimiento (esfuerzo cortante) que actúan en el suelo.

El factor *K* está influenciado por:

- Tamaño de los orificios del suelo.
- Contenido de materia orgánica.
- Resistencia de agregados.
- Tamaño de las partículas.

Existen diferentes métodos para evaluar la erosionabilidad de un suelo los cuales son:

1. Ecuación de regresión obtenida a partir de un simulador de lluvia. El procedimiento consiste en la aplicación de una serie de lluvias simuladas, haciendo combinaciones de intensidad y tipo de suelo. (Wischmeier, 1971)
2. Ecuación de El-Swaify y Dangler (1976). Estiman el factor K mediante una expresión que considera suelos tropicales.
3. Ecuación de Young (1990). Considera un rango de variación estacional a lo largo de año, relacionada con la temperatura del suelo, textura del suelo y humedad del suelo.
4. Modelo de Torri, Poesen y Borselli (1997). Estiman el factor K a partir de la distribución del tamaño de partículas, contenido en arcilla y contenido en materia orgánica.
5. Método de la Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO, 1980). Utiliza una metodología de cálculo a partir de la textura superficial (fina, media y gruesa) y la unidad de suelo a que pertenece según la FAO/UNESCO, Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Cálculo de valores Factor K . Fuente: FAO, (1980).

Textura				Textura			
Unidad	Gruesa	Media	Fina	Unidad	Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a, g)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N (d, e, h)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O (d, e, x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pi	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026

Tabla 2.4 Continuación. Cálculo de valores Factor K. Fuente: FAO, (1980).

Unidad	Textura			Unidad	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Q (a,c, f, l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C(g, h, k, l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D (d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F (a, h, o, p, r, x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
H (c, g, h, l)	0.013	0.020	0.007	V (c, p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K (h, k, l)	0.026	0.040	0.013	X (h, k, l, y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Y (h, k, l, y, t)	0.053	0.079	0.026
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007

Tabla 2.4 Continuación. Cálculo de valores Factor K . Fuente: FAO, (1980).

Unidad	Textura			Unidad	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.056	0.079	0.026

Para obtener el factor K de cada cuenca en este trabajo, se empleó el método de la FAO; para ello fueron necesarios los mapas de edafología obtenidos del INEGI de la carta de Temáticas 2008, los mapas de las cuencas a modelar, la Tabla 2.4 (nos da los valores que toma el factor K) y el software ArcMAP 10.2. El procedimiento que se siguió se describe en el apartado de “Anexos”.

2.2.3 Factor longitud e inclinación de la pendiente LS

Factor de longitud de la pendiente (L)

Se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o bien, hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un canal de salida bien definido.

La ecuación para obtener este factor es la siguiente:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right]^m \quad (II)$$

donde:

L : factor longitud de la pendiente.

λ : longitud de la pendiente, en metros

m : exponente influenciado por la longitud y grado de la pendiente

22.1: valor que depende del tamaño estandar de una parcela de observación.

El exponente m se calcula como:

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (\text{III})$$

El valor de β se calcula como:

$$\beta = \frac{\sin \theta / 0.0896}{3 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (\text{IV})$$

donde:

θ : ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes

La longitud de la pendiente se calcula como:

$$\lambda = \frac{DX}{\cos \theta} \quad (\text{V})$$

donde:

DX : distancia entre pixeles

En este caso, para todas las cuencas se utilizó el modelo de elevación digital del INEGI con una distancia entre pixeles de 15 m (DX), y el ángulo se obtuvo en ArcMAP con la herramienta *slope*.

Para obtener el factor L de cada cuenca, se empleó el software ArcMap 10.2. Este programa utiliza una herramienta llamada álgebra de mapas (*Map Algebra*) para ejecutar operaciones con las capas de los modelos con el fin de obtener características que se asocian a una fórmula. Para ver el procedimiento ver apartado de "Anexos".

Factor topográfico, inclinación de la pendiente S

El ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que circula por la superficie del terreno. En los terrenos llanos o con poca inclinación el agua tiene más posibilidad de infiltrarse que en las zonas inclinadas, en las que el escurrimiento circula más rápidamente hacia las zonas de menor cota.

Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\left. \begin{aligned} S &= 10.8 \sin \theta_{(i,j)} + 0.03, & \text{para } \tan \theta_{(i,j)} < 0.09 \\ S &= 16.8 \sin \theta_{(i,j)} - 0.5, & \text{para } \tan \theta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{aligned} \right\} \quad \text{(VI)}$$

donde:

S: factor de inclinación de la pendiente

θ: ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes

Para poder obtener este factor, se utilizó de igual forma la herramienta *Map Algebra*. Se utiliza una herramienta que permite conocer los grados de inclinación que tiene un terreno para después poder aplicar la fórmula del factor *S*. Para ver el procedimiento que se siguió consultar apartado de “Anexos”.

2.2.4 Factor de cobertura vegetal *C*

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de la precipitación, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad del escurrimiento superficial. La vegetación no sólo se extiende horizontalmente, las raíces además de tener influencia en la materia orgánica del suelo, incrementa la cohesión del suelo. Otros factores que influyen en que las partículas de los suelos se mantengan unidas son la humedad, grado de consolidación, composición mineralógica y tamaño de la partícula.

Este factor representa la relación que existe entre las pérdidas de suelo medias anuales con una determinada vegetación; el valor de *C* vale la unidad cuando el suelo es totalmente desprotegido y disminuirá a medida que haya una mejor cobertura vegetal sobre el terreno, para un suelo totalmente protegido se tendrá un valor muy cercano a cero. (Becerra A., 2005).

El valor de C depende de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos y prácticas de manejo de un lugar en particular. También depende del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal en el momento en que actúa el agente erosivo

Los métodos que existen para determinar el factor de cobertura vegetal son:

1. Wischmeier y Smtih (1978), estudiaron los efectos del cultivo y del manejo de las principales alternativas de cultivo en los Estados Unidos de América estableciendo un valor medio del factor C para cada periodo vegetativo más significativo.
2. Dissmeyer y Foster (1983), obtiene una ecuación que considera nueve subfactores que evalúa el porcentaje de suelo desnudo, la cobertura aérea de las copas, reconsolidación del suelo, contenido de materia orgánica.

En este trabajo, para poder asignar los valores del factor C se emplearon las tablas del trabajo de la SEMARNAT denominado Evaluación de la Perdida de Suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000; los valores obtenidos se pueden consultar en la Tabla de valores del factor de cobertura vegetal del apartado de “Anexos”.

Para generar los mapas del factor C en cada cuenca, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000 serie IV obtenido del INEGI, los mapas de las cuencas a modelar, la Tabla de valores del factor de cobertura vegetal del apartado de “Anexos” y el software ArcMAP 10.2. Para ver el procedimiento que se siguió ver el apartado de “Anexos”.

2.2.5 Factor de prácticas de conservación P

La conservación de suelos ha sido definida como la ciencia de mantener y/o aumentar la productividad de los terrenos mediante prácticas mecánicas, vegetativas y agronómicas, que deben ser aplicadas de acuerdo a las características particulares de cada tipo de terreno (Torres, 1984).

El factor de prácticas de conservación P , expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando la práctica de conservación que se aborda, y la que se perdería labrando según la máxima pendiente.

Estrategias de conservación

El diseño de las estrategias para el combate de la erosión tiene que basarse en estudios de la mecánica de desprendimiento y transporte de las partículas del suelo por dispersión pluvial, escurrimiento y viento (Becerra A., 2005).

Los objetivos que se pretenden alcanzar con las estrategias de conservación son:

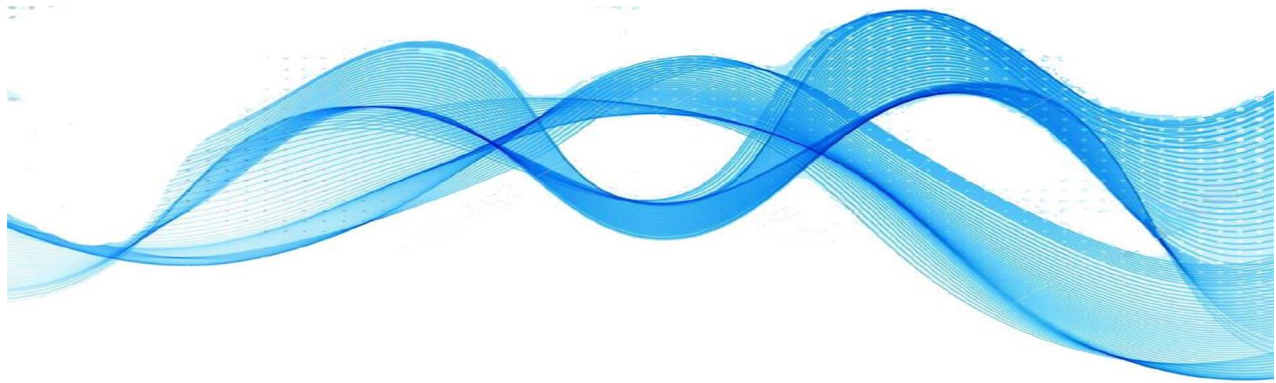
- Proteger al suelo contra el impacto de la lluvia.
- Aumentar la capacidad de infiltración del suelo para reducir el volumen de escurrimiento.
- Mejorar la estabilidad de los agregados, para aumentar su resistencia a la erosión.
- Aumentar la aspereza de la superficie para reducir la velocidad del escurrimiento superficial.

En la Tabla 2.5 se presentan medidas de conservación recomendadas de acuerdo al uso de suelo.

Tabla 2.5 Prácticas de conservación recomendadas de acuerdo al uso de suelo. Fuente: Becerra A. (2005).

Uso de suelo	Prácticas de conservación
Vegetación natural de selva y humedales	<ul style="list-style-type: none"> • Reforestación. • Enriquecimiento de vegetación. • Terrazas de muro vivo.
Área agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Adición de compostas. • Drenaje parcelario. • Rotación de cultivos. • Surcado en contorno. • Terrazas de muro vivo. • Zanjas de infiltración.
Pastizales y sabanas	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de jagüeyes. • Barreras vivas. • Drenaje parcelario. • Manejo de praderas. • Presas de malla de alambre en cárcavas.

Para fines de este trabajo, se consideró que no hay prácticas de conservación de suelos debido a que interesa conocer la erosión de la cuenca, por lo tanto, el valor del factor P se consideró con valor de igual a 1.



II. INFLUENCIA EN EL AZOLVE DE EMBALSES

Existen dos tipos de sedimentos que pueden llegar a un embalse, el material que es producto del arrastre en la capa de fondo y el originado del transporte en suspensión.

Un problema al que están sujetos los embalses, es la sedimentación de materiales en su interior, los cuales en su mayoría son producto del paso del agua por el cauce del río.

Cuando se presenta un obstáculo en el cauce del agua, se origina en el flujo una disminución de la velocidad que provoca que los sedimentos que transporta comiencen a depositarse en el fondo del embalse. Los sedimentos que se encuentran en la parte inferior del río y las partículas suspendidas son depositadas inmediatamente formando deltas, mientras que los sedimentos son llevados dentro del embalse debido a que su velocidad de caída es menor. Sin embargo, no todos los sedimentos acarreados por el río se depositan en el embalse, sólo las partículas más finas son capaces de mantenerse en suspensión, por lo cual pueden llegar a contribuir al azolvamiento de los embalses.

Una representación general de la distribución longitudinal de la sedimentación de partículas en los embalses se muestra en la Fig. 3.1. Con el rozamiento, los materiales se desgastan, fragmentan y disminuyen de tamaño, por lo que en los tramos superiores quedan los de mayor tamaño, mientras que en el tramo inferior los depósitos consisten en arena, limos y arcillas. Es posible que el material no se llegue a sedimentar y se forme en el embalse una turbidez generalizada, lo cual afecta a la calidad del agua del embalse.

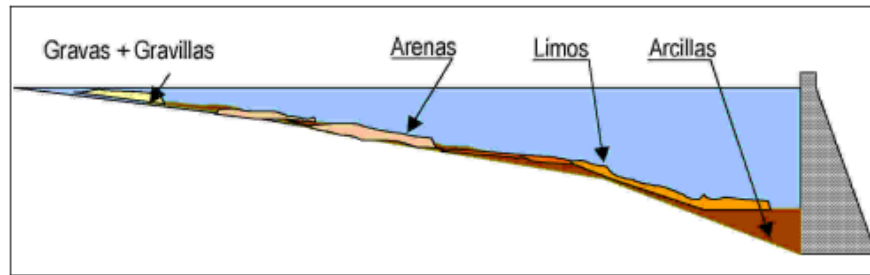


Fig. 3.1 Distribución longitudinal de las fracciones granulométricas de sedimento a lo largo del eje de un gran embalse. Fuente: Palau A., (2004).

Al ocurrir las avenidas en los ríos, los materiales más gruesos son los primeros en sedimentarse. Al presentarse una nueva avenida, los depósitos sedimentados son comprimidos y transportados, siendo remplazados por otros de aguas arriba.

Los problemas que generan los azolves en los almacenamientos de agua son (Palau A., 2004):

- Pérdida de la capacidad de almacenamiento del embalse.
- Afecta a la rentabilidad de la inversión inicial del proyecto, pues reducen su vida útil.
- Pone en riesgo el suministro de agua a poblaciones desde los embalses por la disminución de la capacidad de almacenamiento.
- Limitar el aprovechamiento hidroeléctrico.
- Altera la calidad del agua del embalse.
- Modifican el funcionamiento de los embalses como ecosistemas acuáticos.
- Alteración de la pendiente longitudinal del cauce.
- Limitación del uso recreativo de los embalses.

3.1 Métodos de estimación de azolves

Actualmente en México no existen programas exclusivos para la medición de sedimentos; pues estas mediciones se limitan a estaciones de medición climatológicas, estaciones de calidad del agua e hidrométricas en las que eventualmente se efectúan mediciones rutinarias de concentración de sólidos cerca de la superficie.

Los datos de sedimentos proporcionan información sobre el comportamiento fluvial y sedimentológico de un río, se relaciona al transporte líquido con el transporte sólido, siendo este último parte importante de la evolución y cambio de condiciones del río (Rivera et al., 2005).

3.1.1 Medición de los sedimentos que transportan las corrientes de entrada

Un método común para determinar los sedimentos, es mediante los registros de estaciones hidrométricas, las cuales permiten evaluar de forma directa el volumen de azolves que llegarán al vaso de la presa. Este procedimiento consiste en aforar de manera regular, el material sólido que transporta una corriente durante cada año, o al menos durante la época de avenida. Desgraciadamente en nuestro país, no se cuenta con la infraestructura necesaria para poder utilizar siempre esta herramienta, por lo cual, se sugieren métodos de estimación que no impliquen mediciones sobre el cauce o que requieran pocas mediciones como el que se presenta a continuación.

3.1.2 Predicción de aporte de sedimentos

Este método surge como una alternativa práctica para calcular los sedimentos en los embalses. Consiste en determinar el posible aporte de sedimentos a partir de las características de la cuenca y del régimen de lluvias que se presenta en la zona, emplea las ecuaciones mencionadas en el Cap. 2.2 Estado del arte.

Este método plantea que no todo lo que se calcula como erosión de suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos se va a sedimentar, Ibáñez L. (s.f), debido a que una parte del material será depositado o retenido en su trayecto hacia el embalse, por lo cual se utiliza un parámetro que se le conoce como proporción de desplazamiento con el fin de conocer el volumen de sedimentos.

$$\text{Sedimento en el embalse} = \text{erosión}(\text{proporción de desplazamiento})$$

Tabla 3.1 Sedimento en el embalse. Fuente: Ibáñez L. (s.f)

Área de drenaje (km ²)	Proporción de desplazamiento (%)
0.1	53.0
0.5	39.0
1.0	35.0
5.0	27.0
10.0	24.0
50.0	15.0
100.0	13.0
200.0	11.0
500.0	8.5

3.2 Métodos de control de azolves

No existe una sola medida que nos ayude a disminuir de forma eficiente el problema de los azolves, el éxito consiste en el empleo de varias medidas en conjunto para tener un mayor impacto.

Los procedimientos para la reducción de los azolves son:

1. Aplicados directamente a los sedimentos.
2. Preventivos.

3.2.1 Métodos aplicados directamente a los sedimentos

- a) Uso de compuertas o válvulas de fondo. No es recomendable debido a que se arrastra el azolve inmediato a las compuertas ocasionado la formación de embudos.
- b) Extracción mecánica de azolves. Tiene el inconveniente de ser muy costoso.

3.2.2 Métodos preventivos para el azolvamiento

- a) Selección óptima para la construcción del embalse. De acuerdo a los estudios previos realizados de sedimentos, seleccionar el de menor aporte de sedimentos y el que más sea útil para el propósito de construcción del embalse (capacidad, geología, estabilidad de taludes, impacto ambiental).
- b) Prácticas de conservación de suelos en la cuenca. Estas se mencionan en el Cap. 2.3.5 Factor de prácticas de conservación P. Los problemas que se presentan al emplear este tipo de método, es que los trabajos de conservación son aplicables a un largo plazo, dependen de un apoyo costoso inicial y que implica tiempo para revertir los beneficios sobre los usuarios.
- c) Control de azolves que entran al vaso. Consiste en el diseño de pequeñas represas aguas arriba del vaso que permitan la sedimentación del material.
- d) Predeterminar con la mayor aproximación posible la capacidad reservada para azolves de una manera práctica considerando la vida útil de la obra.



III. ESTUDIOS DE CASO

En este capítulo se estimó la pérdida de suelo por erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en tres cuencas de la República Mexicana, la selección de las cuencas se hizo bajo el criterio de que estuvieran localizadas en regiones con clima distinto entre sí, se llevó a cabo la caracterización de las cuencas y finalmente se realizó la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica.

4.1 Caracterización de las cuencas

Conceptos.

Fisiografía

La fisiografía tiene como objetivo fundamental reconocer y delimitar las diferentes formas de tierra, así como los rasgos generales del modelado de una zona. La información fisiográfica suministra apoyo a disciplinas como son a la edafología, por la estrecha relación que existe entre el suelo y la fisiografía; forestal, por la correlación existente entre las formas de tierras y el tipo de bosque; al hidrólogo, para definir patrones de drenaje, etc.

Los datos de la información fisiográfica se obtuvieron del INEGI, de las cartas fisiográficas escala 1:250 000 serie IV.

Geología

La geología es la ciencia que estudia los procesos del interior de la tierra y las transformaciones que afectan a los minerales y las rocas en la superficie de la tierra. Además estudia los procesos de formación de la tierra y sus cambios hasta la época actual.

El factor geológico determina el desarrollo de paisajes, el origen y los tipos de unidades litológicas, la composición fisicoquímica del suelo, la formación de relieve, la localización de los recursos hidráulicos subterráneos, así como la ubicación de los depósitos minerales y materiales de construcción; además, mantiene una estrecha relación con otros elementos, como son la vegetación y la fauna.

Los datos de la información geológica se obtuvieron del INEGI, de las cartas Geológicas escala 1:250 000 serie IV.

Edafología (Guía para la interpretación de cartografía Edafológica, INEGI).

La Edafología es la ciencia que estudia los suelos. Su origen, su evolución y los procesos químicos, físicos y biológicos que lo forman. Cuenta con diferentes métodos de estudios. Los más importantes son los perfiles geológicos, los análisis químicos, físicos y sedimentológicos.

Los datos de la información edafológica se obtuvieron del INEGI, de la carta de edafología escala 1:250 000 serie IV. El campo que se utilizó para poder asignar los valores fue la unidad de suelo.

Unidades y subunidades de suelo.

Acrisol (A)

Del latín acris: agrio, ácido y solum: suelo. Literalmente, suelo ácido. Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, muy ácida y pobre en nutrientes. Son moderadamente susceptibles a la erosión, la práctica más adecuada para la conservación de estos suelos es de tipo forestal.

Andosol (T)

De las palabras japonesas an: oscuro y do: tierra. Literalmente, tierra negra. Suelos de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. Tienen generalmente bajos rendimientos

agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Son muy susceptibles a la erosión eólica, la práctica más adecuada para la conservación de estos suelos es de tipo forestal.

Arenosol (Q)

Del latín arena: arena. Literalmente, suelo arenoso. Suelos que se localizan principalmente en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. La vegetación que presentan es variable. Se caracterizan por ser de textura gruesa, con más del 65% de arena al menos en el primer metro de profundidad. La susceptibilidad a la erosión en los Arenosoles va de moderada a alta.

Cambisol (B)

Del latín cambiare: cambiar. Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima, excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

Castañozem (K)

Del latín, castaneo: castaño y del ruso zemljá: tierra. Literalmente, tierra castaña. Suelos alcalinos que se encuentran ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales tienen vegetación de pastizal, con algunas áreas de matorral. Frecuentemente tienen más 70 cm de profundidad y se caracterizan por presentar una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, rica en materia orgánica. Son moderadamente susceptibles a la erosión.

Chernozem (C)

Del ruso cherna: negro; y zemljá: tierra. Literalmente, tierra negra. Suelos alcalinos ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales tienen vegetación de pastizal, con algunas áreas de matorral. Son suelos que sobrepasan comúnmente los 80 cm de profundidad y se caracterizan

por presentar una capa superior de color negro, rica en materia orgánica. Son moderadamente susceptibles a la erosión.

Feozem (P)

Del griego phaeo: pardo; y del ruso zemljá: tierra. Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Los Feozems son de profundidad muy variable.

Fluvisol (J)

Del latín fluvius: río. Literalmente, suelo de río. Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. Se encuentran en todos los climas y regiones de México cercanos siempre a lechos de los ríos. Los Fluvisoles presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos.

Gleysol (G)

Del ruso gley: pantano. Literalmente, suelo pantanoso. Suelos que se encuentran en zonas donde se acumula y estanca el agua la mayor parte del año dentro de los 50 cm de profundidad, como las llanuras costeras y pantanos. Se caracterizan por presentar en la parte donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se manchan de rojo. Son muy variables en su textura, pero en México predominan más los arcillosos, esto trae como consecuencia que presenten serios problemas de inundación durante épocas de intensa precipitación.

Histosol (O)

Del griego histos: tejido. Literalmente, suelos de tejidos orgánicos. Son suelos con muy alto contenido de materia orgánica, generalmente de color negro, esponjoso, ligero y con alta capacidad de retención de humedad. Se encuentran restringidos a sitios donde

se acumulan desechos orgánicos y agua, tales como pantanos y lechos de antiguos lagos. La vegetación típica de estos suelos es el pastizal o popal. Prácticamente no son susceptibles a la erosión.

Litosol (I)

Del griego lithos: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Son los suelos más abundantes del país pues ocupan 22 de cada 100 hectáreas de suelo. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros. La susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales.

Luvisol (L)

Del latín luvi, luo: lavar. Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales. La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados. Son suelos con alta susceptibilidad a la erosión. En México 4 de cada 100 hectáreas está ocupada por Luvisoles.

Nitosol (N)

Del latín nitidus: brillante. Literalmente, suelo brillante. En México se localizan principalmente en regiones cálidas y con vegetación natural de selva. Los Nitosoles son suelos de color rojizo muy brillante y enriquecido de arcilla en todo su espesor, por lo menos hasta 150 cm de profundidad. Son suelos muy profundos pero con una capa superficial muy delgada de color oscuro, donde la parte orgánica está bien mezclada con la parte mineral. Tienen susceptibilidad a la erosión de baja a moderada.

Planosol (W)

Del latín planus: plano, llano. Connotativo de suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son

medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm, y se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos de nuestro país. Su vegetación natural es de pastizal o matorral. Son muy susceptibles a la erosión, sobre todo en las capas superficiales.

Ranker (U)

Del austriaco rank: pendiente fuerte. Literalmente, suelos de pendiente fuerte. Suelos de climas templados húmedos o semifríos húmedos, con una vegetación natural típica de bosque. Se caracterizan por ser ácidos, con espesor menor a los 25 cm, color oscuro por el alto contenido de materia orgánica y porque descansan directamente sobre roca no carbonatada. Su principal uso en México es el forestal. Su susceptibilidad a la erosión es alta cuando sufren desmonte debido a que se encuentran por lo general en laderas.

Regosol (R)

Del griego reghos: manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En México constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2 %). Muchas veces están asociados con litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Son suelos muy susceptibles a la erosión, debido a que son recientes y son conformados por materiales sueltos no consolidados.

Rendzina (E)

Del polaco rzedzic: ruido. Connotativo de suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad. Estos suelos se presentan en climas semiáridos, tropicales o templados. Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil. Generalmente las rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos por debajo de los 25 cm pero llegan a soportar vegetación de selva alta perennifolia. Son moderadamente susceptibles a la erosión.

Solonchak (Z)

Del ruso sol: sal. Literalmente suelos salinos. Se presentan en zonas donde se acumula sal, tales como lagunas costeras y lechos de lagos, o en las partes más bajas de los valles y llanos de las regiones secas del país. La vegetación típica para este tipo de suelos es el pastizal u otras plantas que toleran el exceso de sal (halófilas).

Solonetz (S)

Del ruso sol: sal, etz: fuertemente expresado. Connotativo de suelos con altas concentraciones de sales. Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en formas de columnas o prismas debido al alto contenido de sales de sodio. Estos suelos se localizan en zonas donde se acumulan sales, en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural es muy escasa y cuando existe es de pastizal o matorral.

Vertisol (V)

Del latín verteré; voltear. Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva. Tienen baja susceptibilidad a la erosión.

Xerosol (X)

Del griego xeros: seco. Literalmente, suelo seco. Se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Su vegetación natural es de matorral y pastizal. Son el tercer tipo de suelo más importante por su extensión en el país (9.5%). Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial. Son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas.

Yermosol (Y)

Del español yermo: desértico, desolado. Literalmente, suelo desolado. Son suelos localizados en las zonas más áridas del norte del país. Su vegetación típica es el matorral o pastizal. En ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo.

Clima

Se define como el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan al estado medio de la atmosfera en un lugar específico de la superficie terrestre. El clima desempeña un papel muy importante en los proceso de formación y erosión de suelos, estableciendo las especies vegetales y animales que son capaces de vivir en las condiciones climáticas de un lugar.

El clima de una región está determinado principalmente por la interacción de factores, como: la temperatura, humedad, evaporación y la dirección de los vientos; también los mismos términos determinan el carácter de la vegetación, tanto en su estado natural, como en cultivos. De igual forma, el clima condiciona las actividades productivas que pueden llevarse a cabo en la zona.

Los datos de la información climática se obtuvieron del INEGI, de las cartas climáticas escala 1:250 000 serie IV.

Para clasificar el clima de las cuencas de estudio, se utilizó la siguiente clasificación, Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Sistema de Clasificación Climática. Fuente: García E. (2004)

Símbolo	Zona climática
A	Tropical lluvioso
B	Seco
C	Templado lluvioso
D	Frío lluvioso
E	Polar

Uso de suelo y vegetación

El término uso del suelo se refiere a las actividades humanas que se desarrollan en un territorio, resultado de la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores socioeconómicos y culturales.

Desde el punto de vista ambiental, el uso del suelo está muy relacionado con el tema de la sostenibilidad, ya que la forma en que cambia la cubierta vegetal determina la persistencia de bosques, selvas y suelos en el futuro, así como de los recursos que estos proporcionan. De igual forma, tiene una serie de implicaciones ecológicas como por ejemplo, la alteración de los ciclos biogeoquímicos, la pérdida de recarga de mantos acuíferos, alteraciones en el microclima, la pérdida de hábitat y por consiguiente de biodiversidad.

Los datos de la información de uso de suelo y vegetación se obtuvieron del INEGI, de las cartas de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000 serie IV.

4.1.1 Localización.

Cuenca del río Pichucalco

La cuenca del río Pichucalco se localiza en la zona sureste de la República Mexicana entre los estados de Chiapas y Tabasco. Se origina a 12 kilómetros de la cabecera municipal de Chapultenango, Chiapas, tiene un área de 1 246.5 km², y el perímetro del parteaguas es de 260.71 km; tiene una forma alargada, y la red de drenaje escurre principalmente hacia el río Pichucalco. Incluye territorio de Chiapas y Tabasco. La zona de estudio se encuentra en la Región Hidrológica 30 “Grijalva-Usumacinta”, Fig. 4.1.

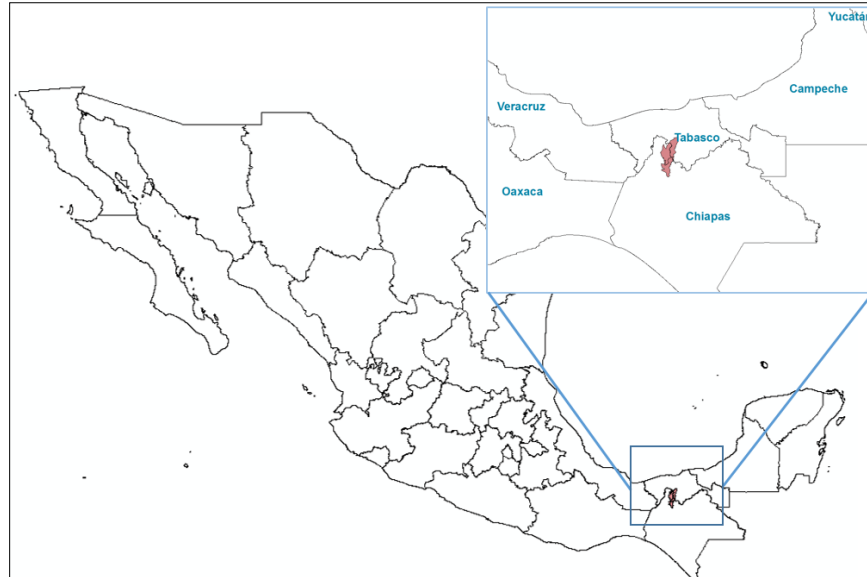


Fig. 4.1 Cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río San Pedro

El río San Pedro Mezquital es el séptimo más caudaloso de México. Comienza su curso en las sierras más altas de Durango y Zacatecas y termina en la costa del estado de Nayarit. La cuenca del río tiene un área de drenaje de 29 222.4 km², y el perímetro del parteaguas es de 260.71 km. La zona de estudio se encuentra en la región hidrológica 11 “Presidio-San Pedro” (Fig. 4.2).

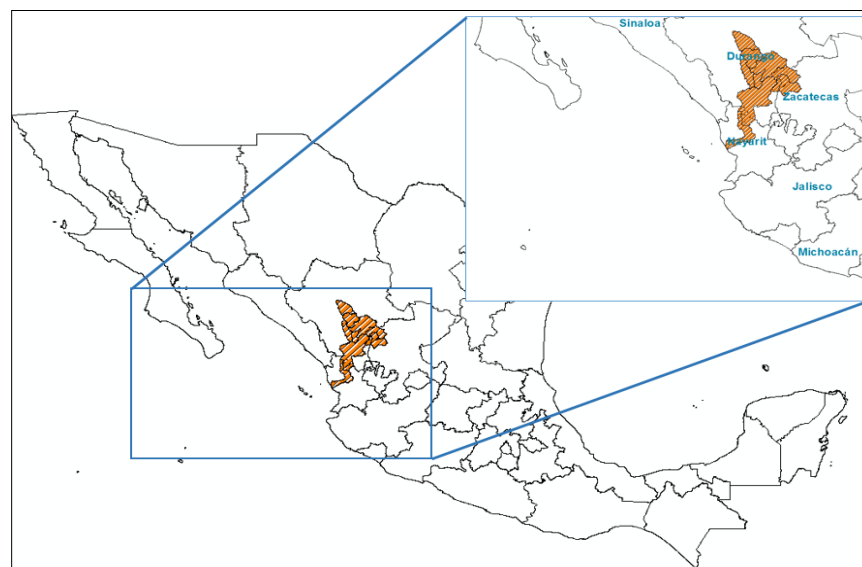


Fig. 4.2 Cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Sonora

Está situada en la parte noroeste de la República Mexicana en la parte central del estado de Sonora, cubre una extensión de 26 705 km², ubicados totalmente dentro de la entidad y desemboca en el mar. Está situada al norte de la región hidrológica número 9 “Sonora Sur” y la corriente principal de la zona es el río Sonora, el cual ocupa el tercer lugar en la región en cuanto a extensión de cuencas y magnitud de aportaciones (Fig. 4.3).

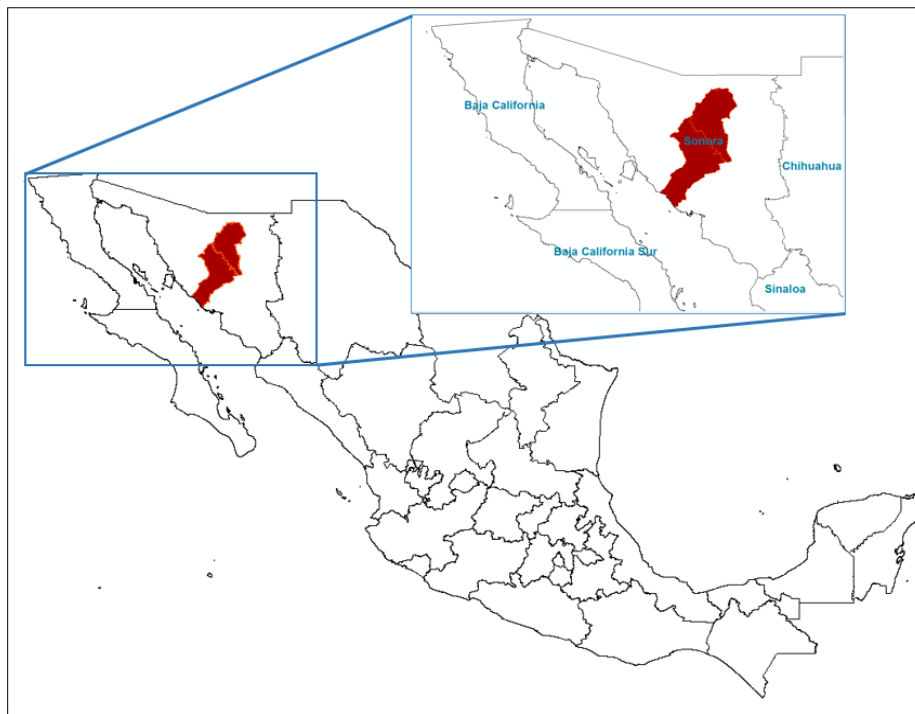


Fig. 4.3 Cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Fisiografía

La importancia de conocer la fisiografía de cada cuenca en la USLE, es que da una idea de la forma y pendiente del terreno, lo cual permite deducir si se tendrán valores altos o no de los factores de longitud e inclinación de pendiente (LS)

En las Tablas 4.2, 4.3, 4.4 se muestra los datos para las cuencas Pichucalco, San Pedro y Sonora correspondientemente. Las cuales se obtuvieron a partir de los registros del INEGI en las cartas temáticas. Estas cartas indican el rasgo fisiográfico de

cada cuenca, la superficie que ocupa cada uno de ellos y el área total de la cuenca, con estos datos se puede calcular la proporción en porcentaje de cada rasgo.

Tabla 4.2 Fisiografía en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: INEGI.

Rasgo Fisiográfico	Área (km²)	Porcentaje (%)
Llanura Costera del Golfo Sur	853.1	68.4
Sierras de Chiapas y Guatemala	393.5	31.6
Total	1 246.5	100.0

Tabla 4.3 Fisiografía en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

Rasgo fisiográfico	Área (km²)	Porcentaje
Sierra Madre Occidental	26714.1	91.4
Llanura Costera del Pacífico	751.2	2.6
Mesa del Centro	1624.4	5.6
Otros	132.7	0.5
Total	29 222.4	100.0

Tabla 4.4 Fisiografía en la cuenca del río Sonora. Fuente: INEGI.

Rasgo Fisiográfico	Área (km²)	Porcentaje
Llanura Sonorense	15 120.6	56.6
Sierra Madre Occidental	11 528.3	43.2
Sierras y Llanuras del Norte	56.0	0.2
Total	26 704.9	100.0

Las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la distribución espacial que ocupa cada rasgo fisiográfico en las cuencas de estudio.

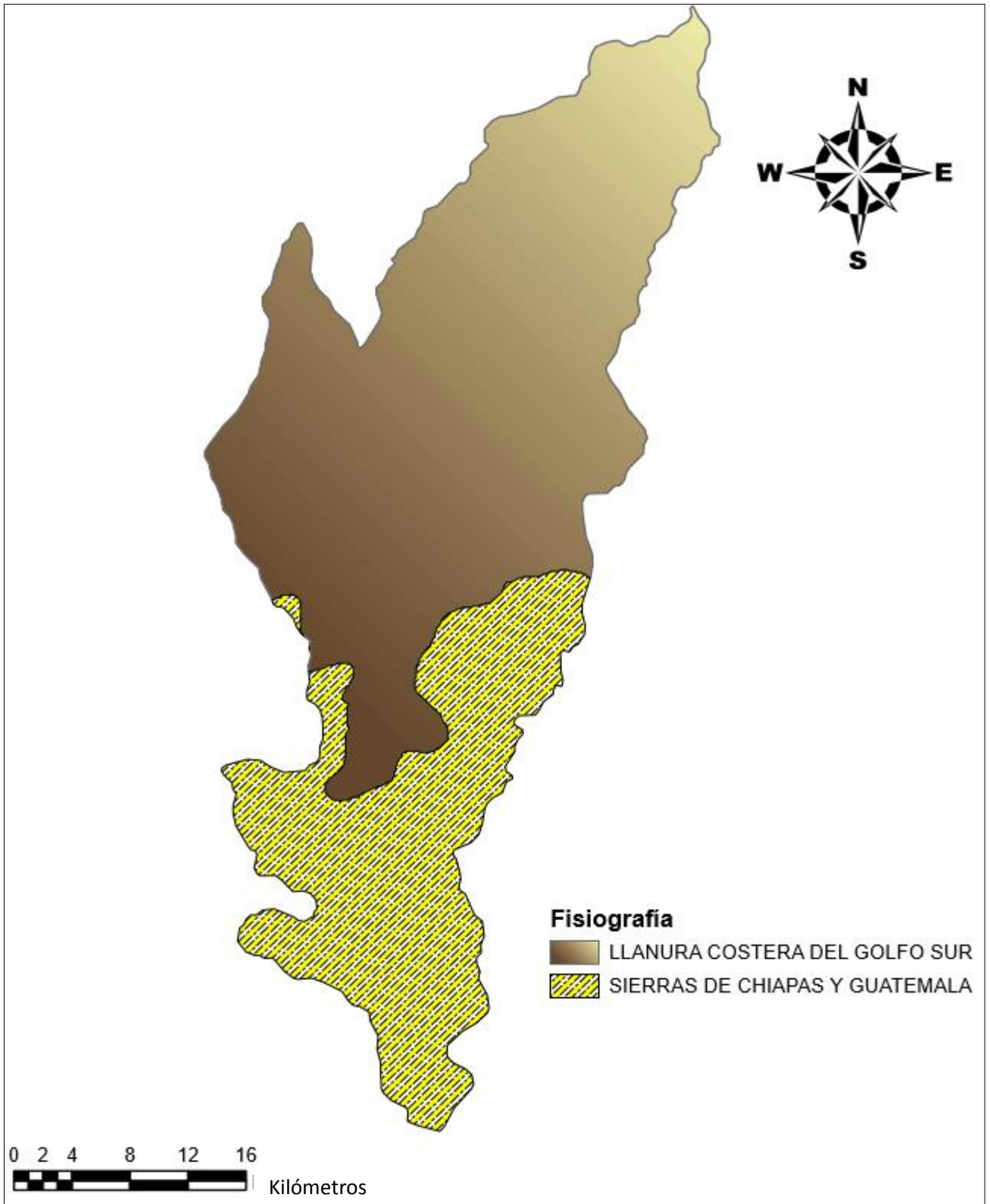


Fig. 4.4 Fisiografía en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

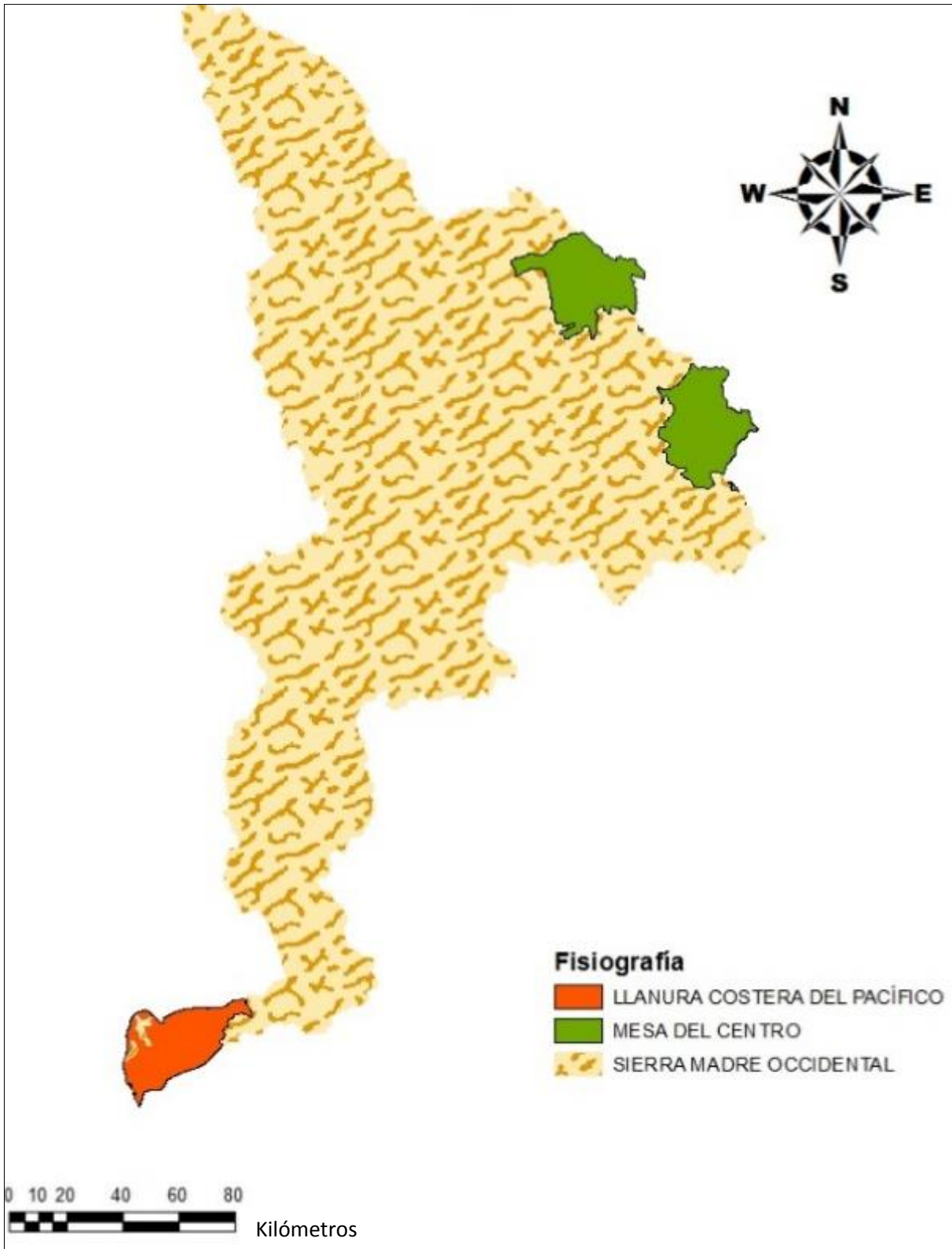


Fig. 4.5 Fisiografía en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

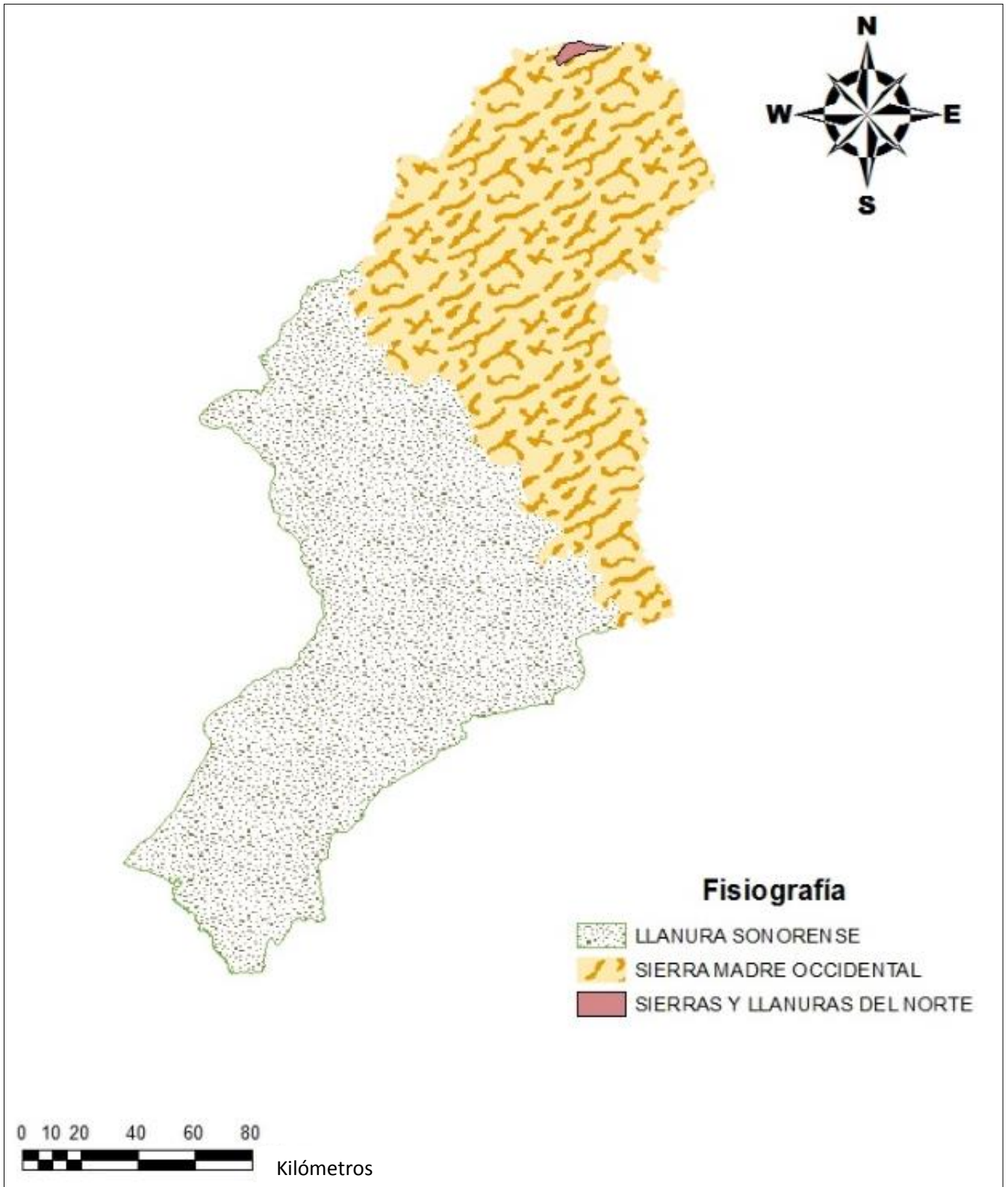


Fig. 4.6 Fisiografía en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Geología

El tipo de geología presente en cada cuenca se muestra en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7. Estos datos se obtienen del portal digital de INEGI; los mapas que proporciona esta dependencia contienen al tipo de unidad geológica y su área respecto al total de la cuenca. A partir de esto, se obtiene la distribución de cada unidad en la cuenca.

Tabla 4.5 Geología en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: INEGI.

Tipo de unidad litológica	Área (km²)	Porcentaje (%)
Aluvial	442.5	35.5
Arenisca	278.8	22.4
Caliza	67.3	5.4
Andesita	66.1	5.3
Palustre	113.2	9.1
Lutita-Arenisca	238.0	19.1
Granodiorita	13.7	1.1
Lacustre	16.4	1.3
Toba intermedia	1.4	0.1
Otros	9.1	0.7
Total	1 246.5	100.0

Tabla 4.6 Geología en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

Tipo de unidad litológica	Área (km²)	Porcentaje (%)
Riolita	17 258.3	59.1
Aluvial	4 347.8	14.9
Conglomerado	2 882.0	9.9
Basalto	2 190.1	7.5
Toba	494.1	1.7
Caliza-Lutita	364.1	1.2
Palustre	311.4	1.1

Tabla 4.6 Continuación. Geología en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

Tipo de unidad litológica	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Caliza	215.1	0.7
Lacustre	144.3	0.5
Arenisca-conglomerado	131.3	0.4
Andesita	110.0	0.4
Residual	105.6	0.4
Litoral	61.5	0.2
Caliche	45.7	0.2
Otros	561.2	1.9
Total	29 222.4	100.0

Tabla 4.7 Geología en la cuenca del río Sonora. Fuente: INEGI.

Tipo de Unidad litológica	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Aluvial	8 327.2	31.2
Conglomerado	6 593.2	24.7
Granito	3 173.8	11.9
Toba ácida	2 718.2	10.2
Riolita-Toba ácida	1 868.3	7.0
Limolita-Arenisca	1 019.2	3.8
Basalto	894.7	3.4
Caliza	574.0	2.1
Andesita	519.2	1.9
Riolita	220.8	0.8
Otros	796.3	3.0
Total	26 704.9	100.0

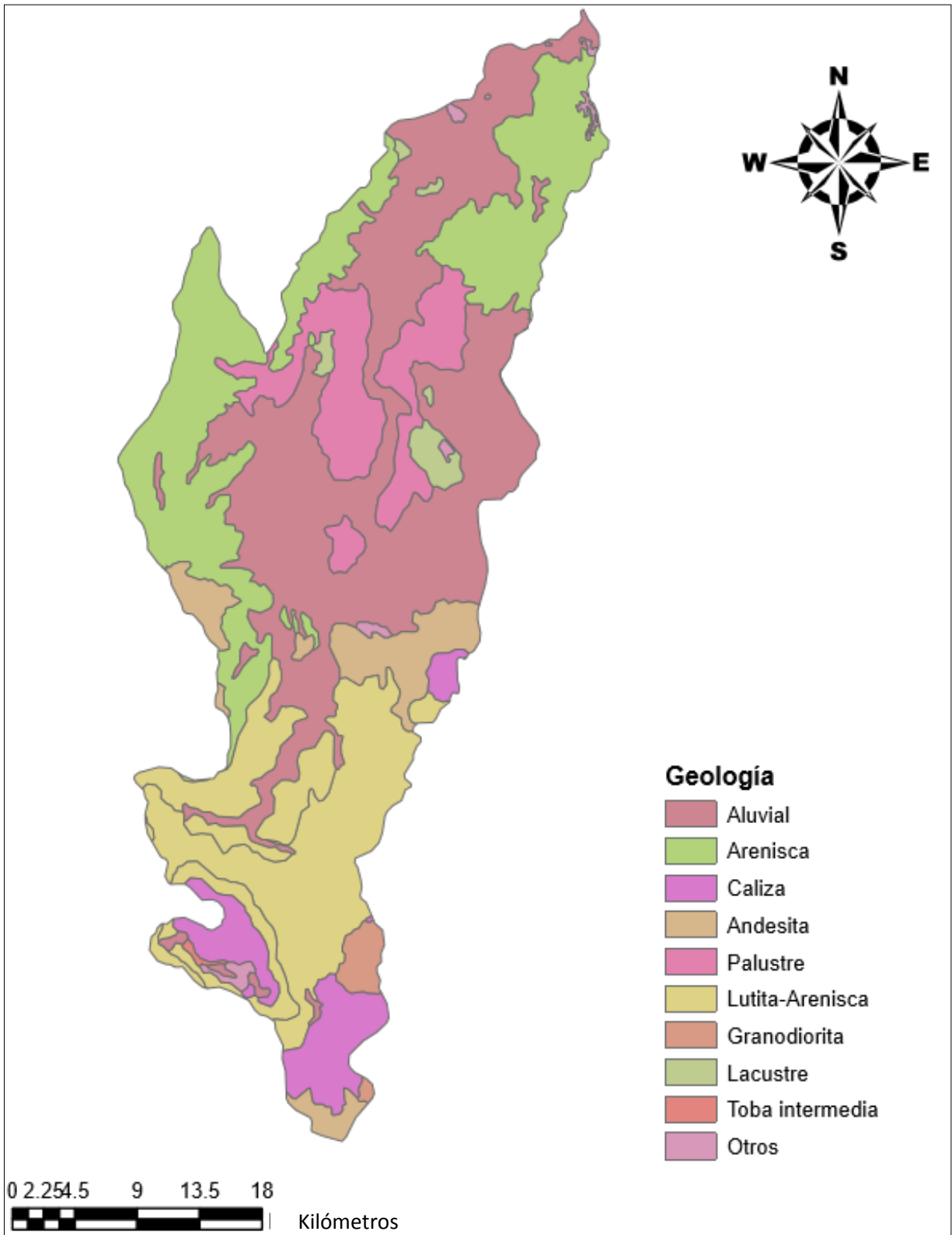


Fig. 4.7 Geología en la cuenca del río Pichuicalco. Fuente: Elaboración propia.

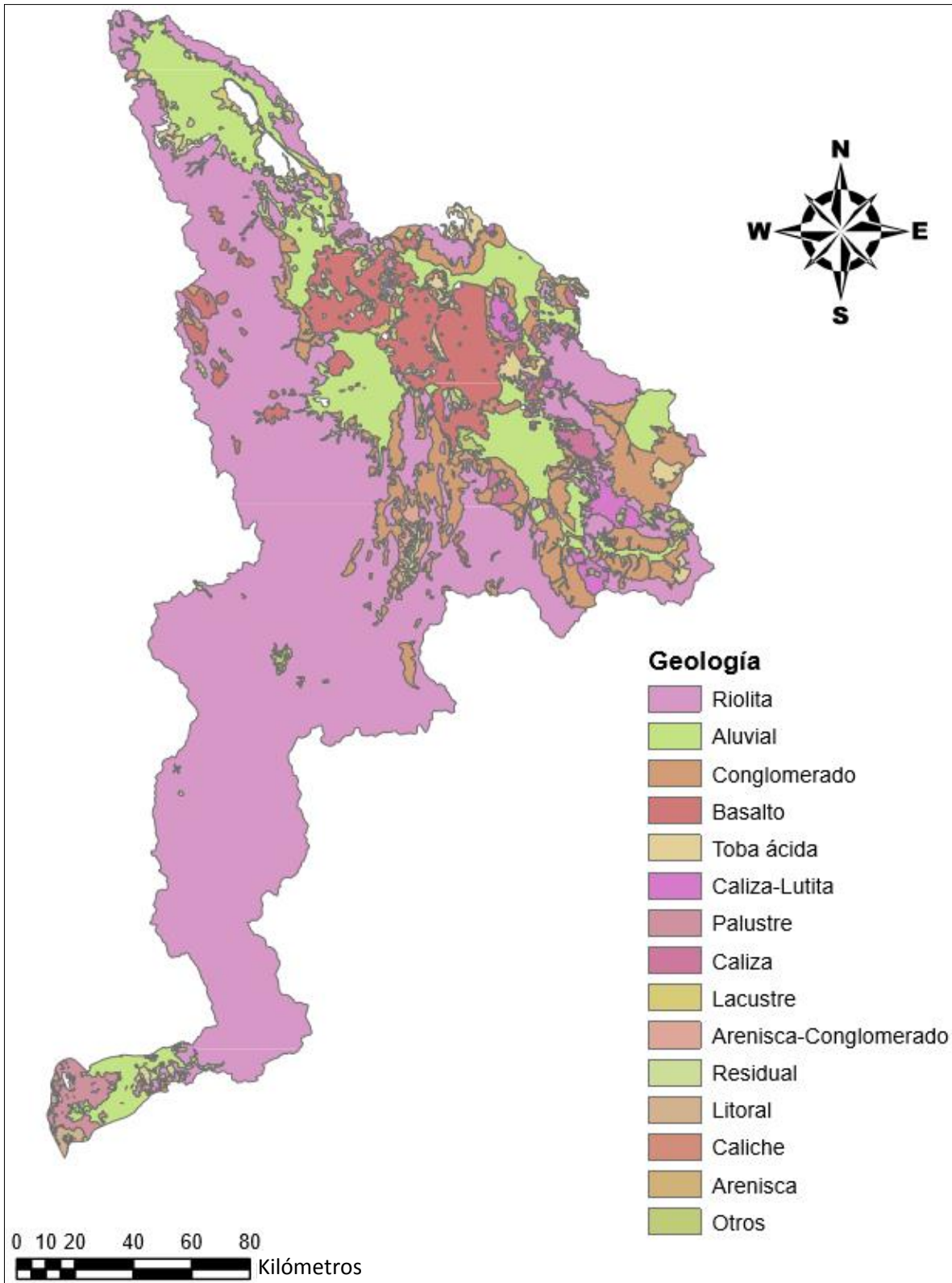


Fig. 4.8 Geología en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

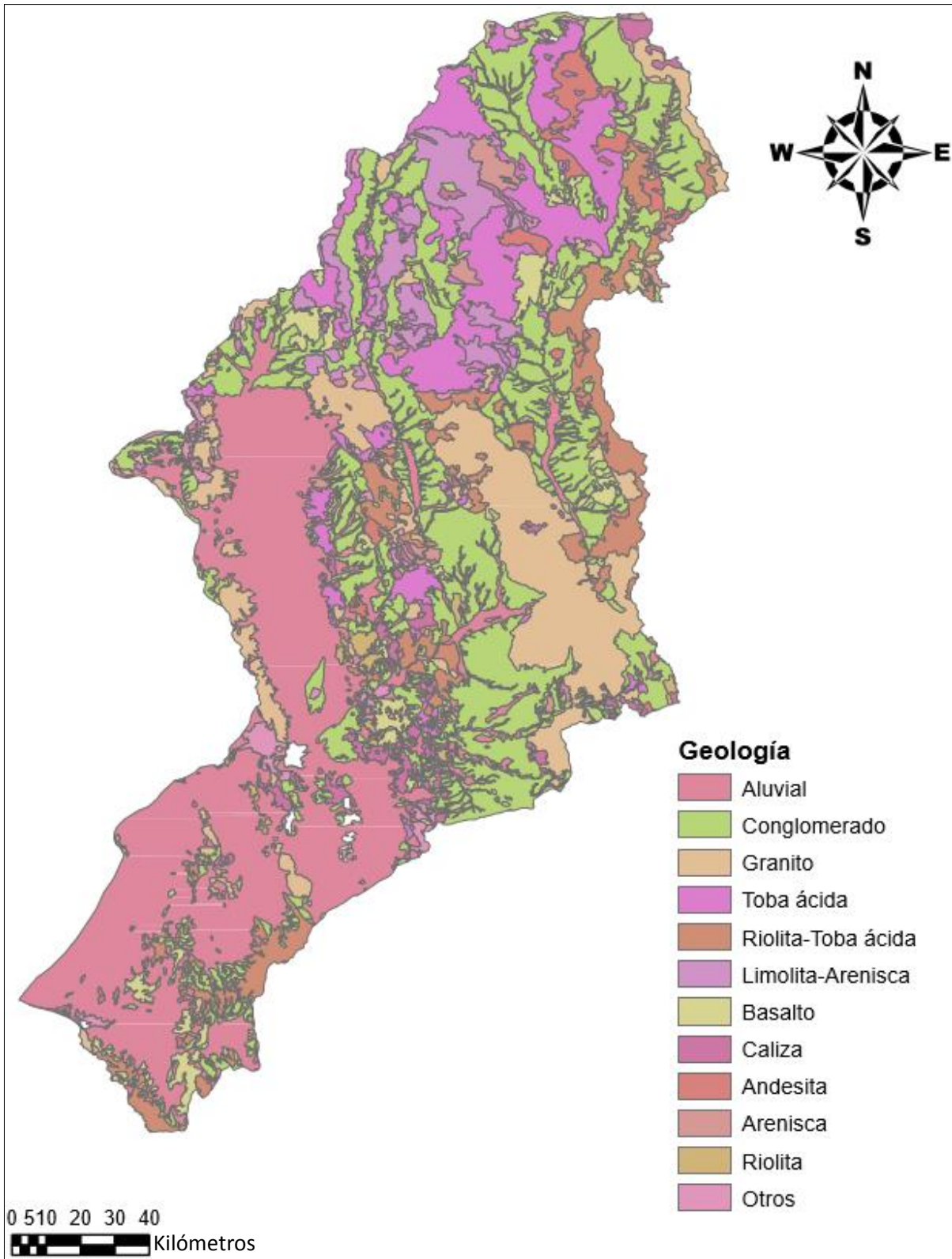


Fig. 4.9 Geología en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Edafología

Esta característica se contempla en la USLE, en el factor de erosionabilidad del suelo K , la característica principal que se toma en cuenta es su textura, esta determina su capacidad de retención del agua, tamaño de poros. A estas unidades de suelo se le asigna un valor de K como se verá en el Cap. 4.2 “Cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica en cada cuenca”

La distribución y proporción de la edafología se muestra en las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 para cada cuenca de estudio. Al igual que en los casos anteriores, esta característica se obtiene a partir de los mapas que proporciona el INEGI; para hacer las tablas se identifica esta característica y se calculan los porcentajes respecto al área total de cada cuenca.

Tabla 4.8 Edafología en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: INEGI.

Edafología	Área (km²)	Porcentaje (%)
Acrisol	537.548	43.1
Gleysol	496.588	39.8
Fluvisol	99.644	8.0
Litosol	69.629	5.6
Cambisol	28.879	2.3
Andosol	7.581	0.6
Rendzina	6.631	0.5
Total	1 246.5	100.0

Tabla 4.9 Edafología en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

Edafología	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Litosol	9 068.0	31.0
Regosol	4 845.7	16.6
Cambisol	3 811.4	13.0
Feozem	3 524.7	12.1
Xerosol	2 071.4	7.1
Vertisol	1 667.8	5.7
Castañozem	996.0	3.4
Luvisol	748.9	2.6
Rendzina	683.9	2.3
Solonchak	379.2	1.3
Acrisol	225.0	0.8
Ranker	212.3	0.7
Fluvisol	203.9	0.7
Otros	784.4	2.7
Total	29 222.4	100.0

Tabla 4.10 Edafología en la cuenca del río Sonora. Fuente: INEGI.

Edafología	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Feozem	2 259.9	8.5
Fluvisol	582.1	2.2
Litosol	7 578.9	28.4
Planosol	707.3	2.6
Regosol	7 787.0	29.2
Yermosol	2 403.6	9.0

Tabla 4.10 Continuación Edafología en la cuenca del río Sonora. Fuente: INEGI.

Edafología	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Xerosol	4 251.2	15.9
Vertisol	477.4	1.8
Solonchak	441.5	1.7
Luvisol	115.4	0.4
Otros	100.6	0.4
Total	26 704.9	100.0

La edafología asociada a cada tabla se muestra en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 para las cuencas del río Pichucalco, San Pedro y Sonora respectivamente.

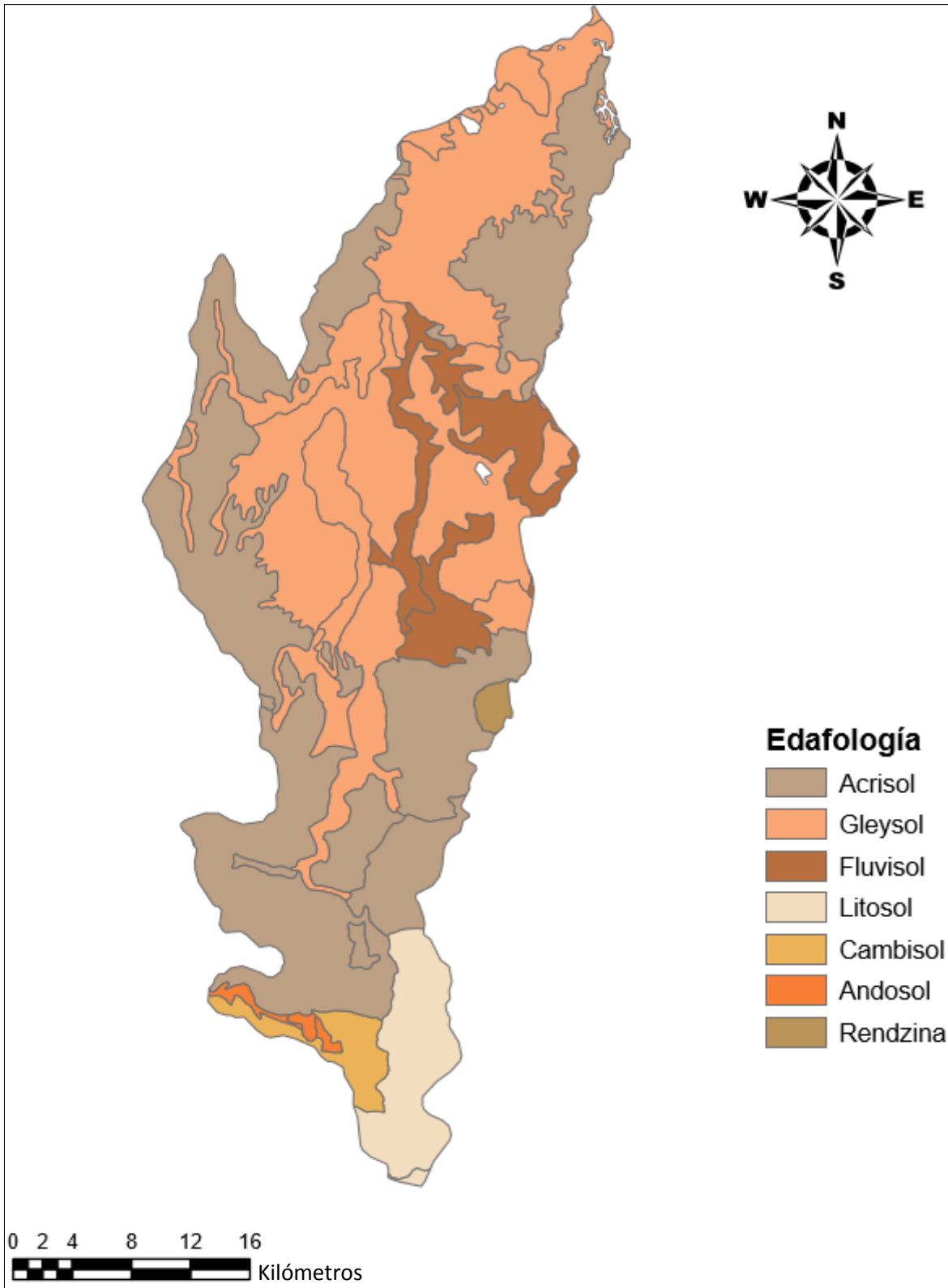


Fig. 4.10 Edafología en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

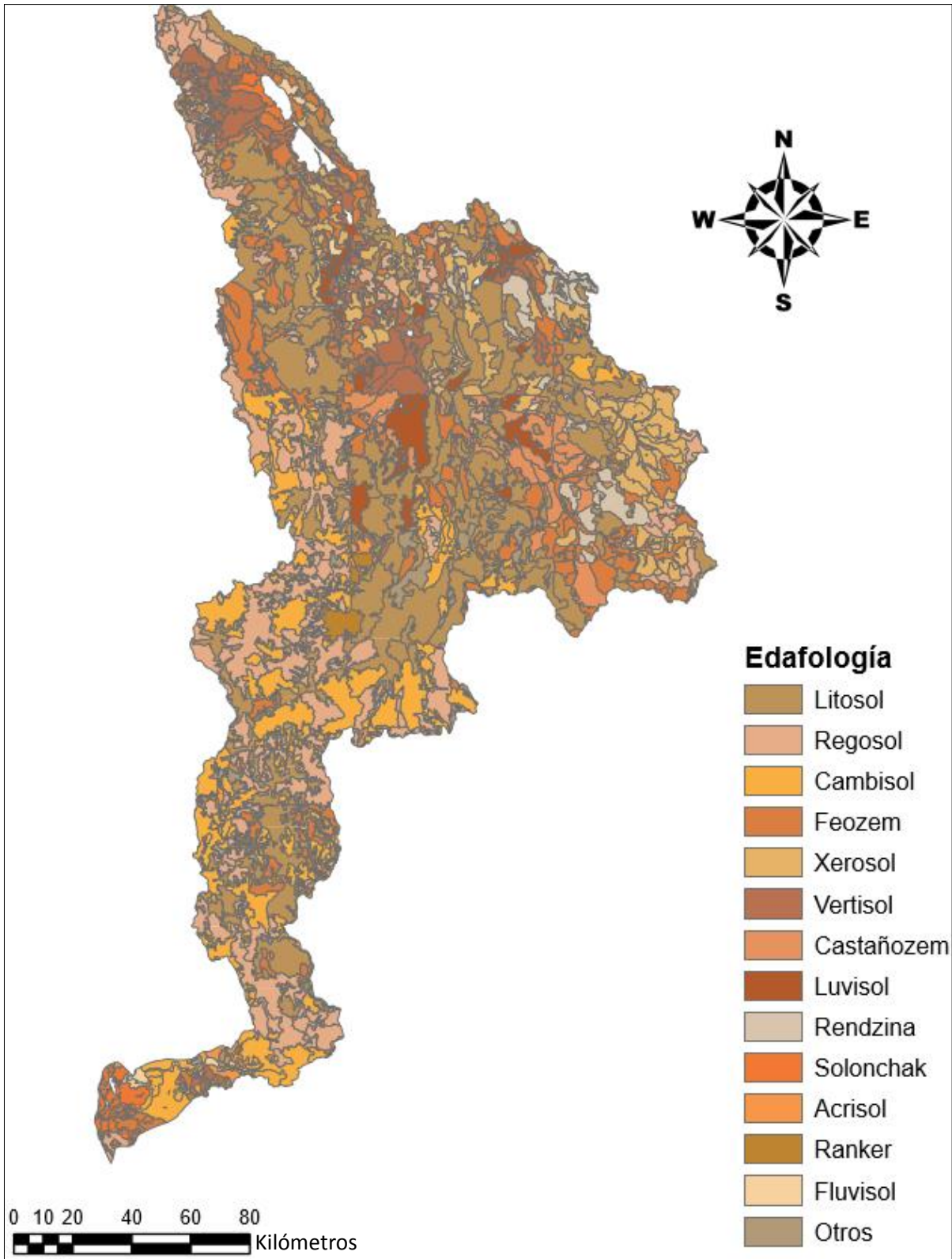


Fig. 4.11 Edafología en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

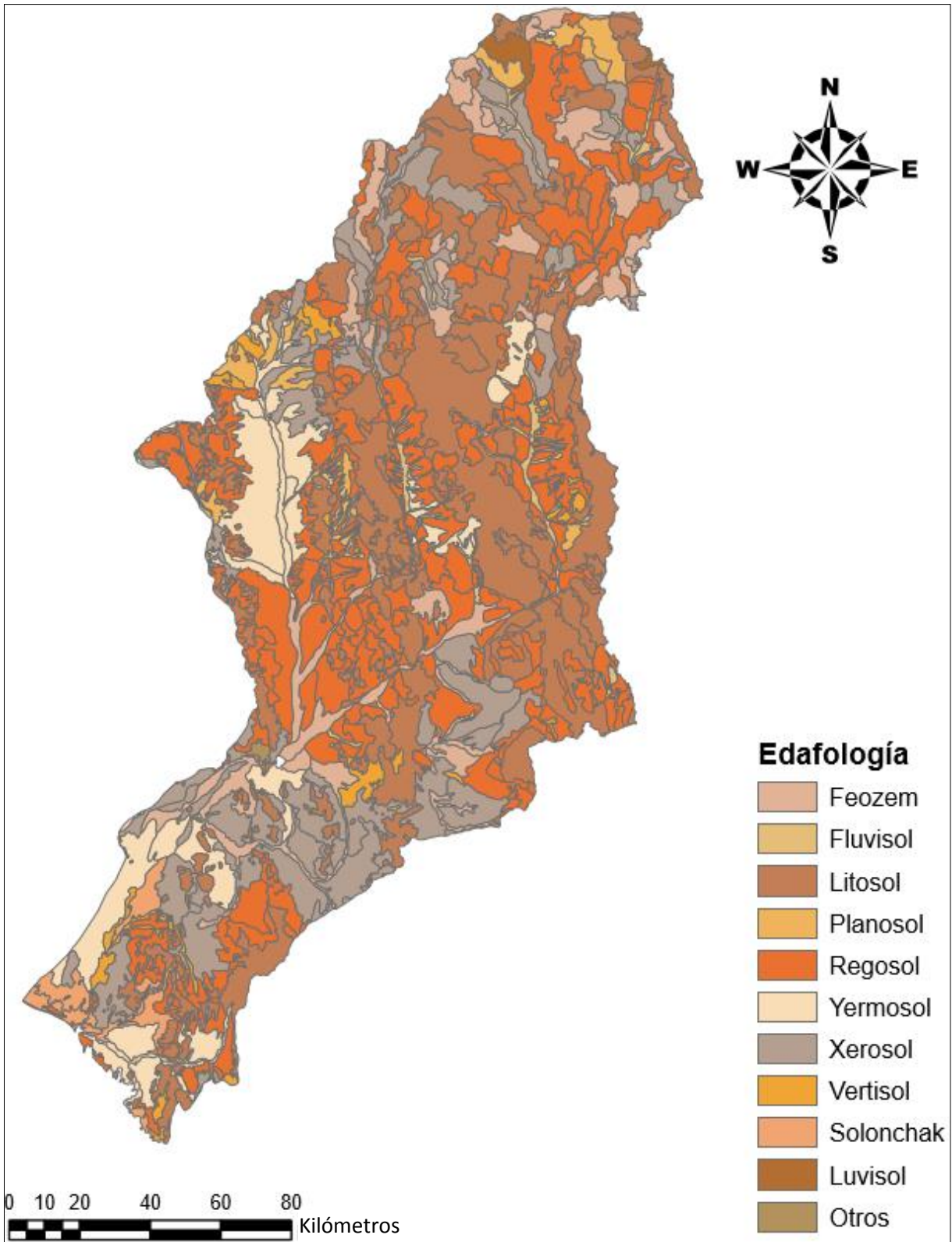


Fig. 4.12 Edafología en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Clima

El clima determina la cantidad e intensidad de lluvia de una región por lo cual es una característica que influye directamente en el factor de erosividad de la lluvia R de la USLE; en esta ecuación se toma en cuenta la intensidad máxima en treinta minutos y la energía cinética para poder obtener este factor.

Además, el clima afecta al tipo de vegetación de una zona, sin embargo no se considera en la USLE ya que se tiene el factor de cobertura vegetal C en el cual se analiza las condiciones bajo las que se encuentra el terreno.

La cuenca del río Pichucalco está clasificada como zona tropical lluviosa.

Tabla 4.11 Clima en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: INEGI.

Zona climática	Área (km ²)	Porcentaje (%)
A	1 246.5	100
Total	1 246.5	100

Para la cuenca del río San Pedro, en la parte sur de la cuenca predomina el clima tropical lluvioso, en la parte central el templado lluvioso y en la parte norte el clima seco, siendo éste el de mayor superficie en la cuenca Tabla 4.10.

Tabla 4.12 Clima en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

Zona climática	Área (km ²)	Porcentaje (%)
B	15 870.0	54.3
C	7 573.5	25.9
A	5 778.9	19.8
Total	29 222.4	100

Por último, para la cuenca del río Sonora el clima es seco (B) para toda la zona, por lo cual, se realizó una clasificación adicional según García E. (2004). (Tabla 4.13).

- BS1k(x'): Semiárido, su superficie abarca la parte norte de la cuenca.
- BWh(x'): Muy árido, se encuentra en la parte sur de la cuenca.
- BSoh(x'): Árido, localizada en la parte central.

Tabla 4.13 Clima en la cuenca del río Sonora. Fuente: INEGI.

Zona climática	Área (km ²)	Porcentaje (%)
BS1k(x')	11 373.8	42.6
BWh(x')	10 407.1	39.0
BSoh(x')	4 922.7	18.4
Total	26 704.9	100

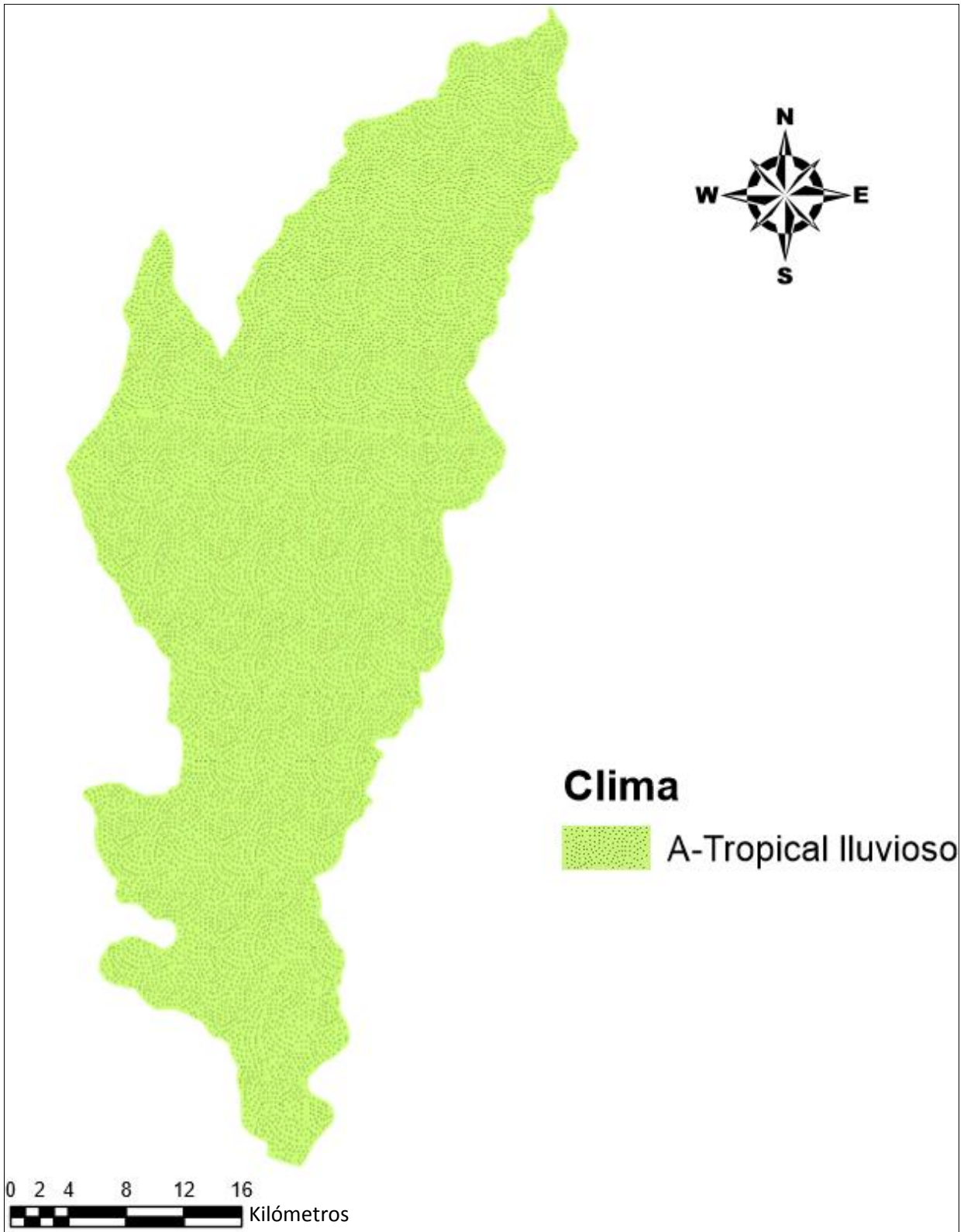


Fig. 4.13 Clima en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

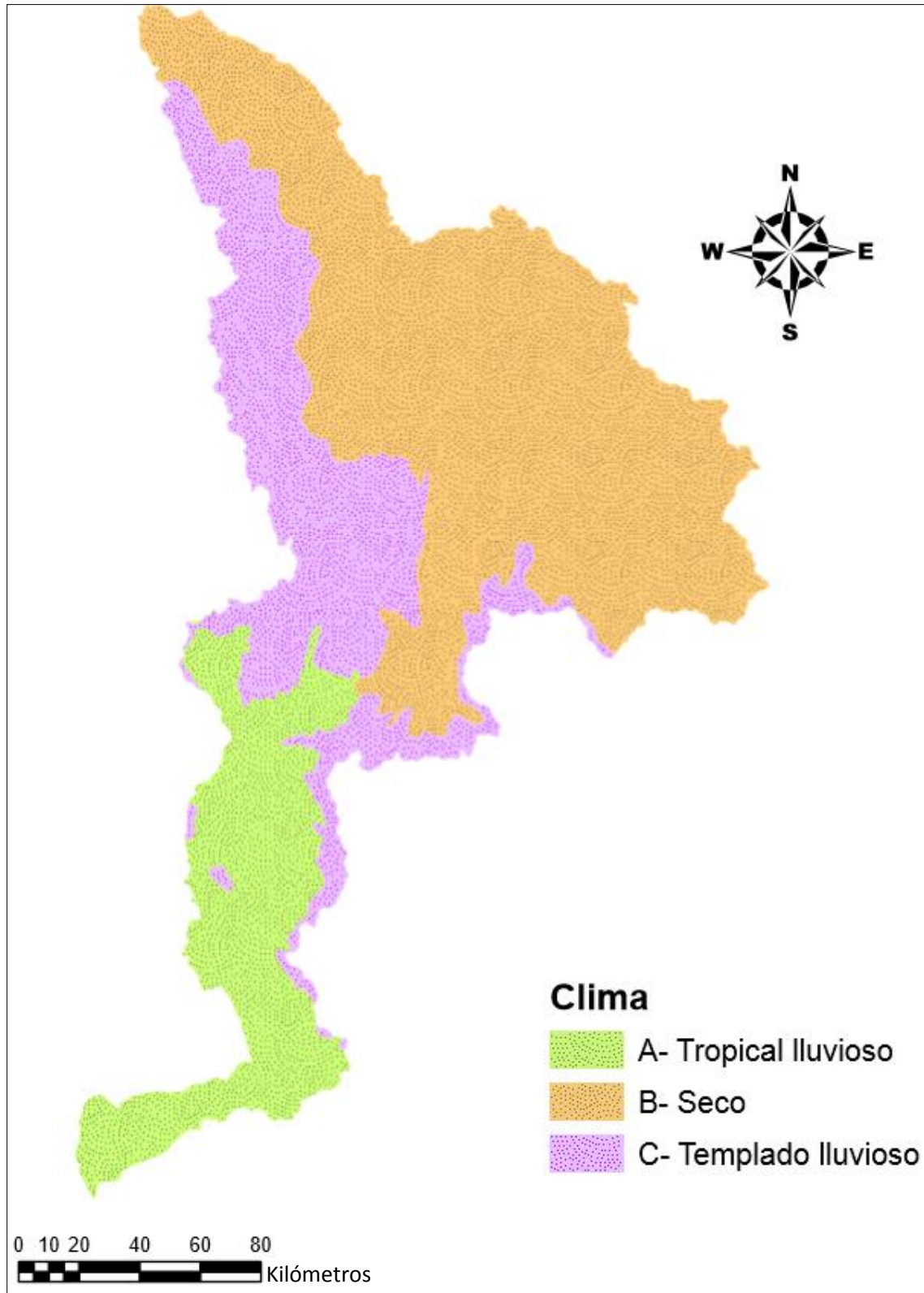


Fig. 4.14 Clima en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

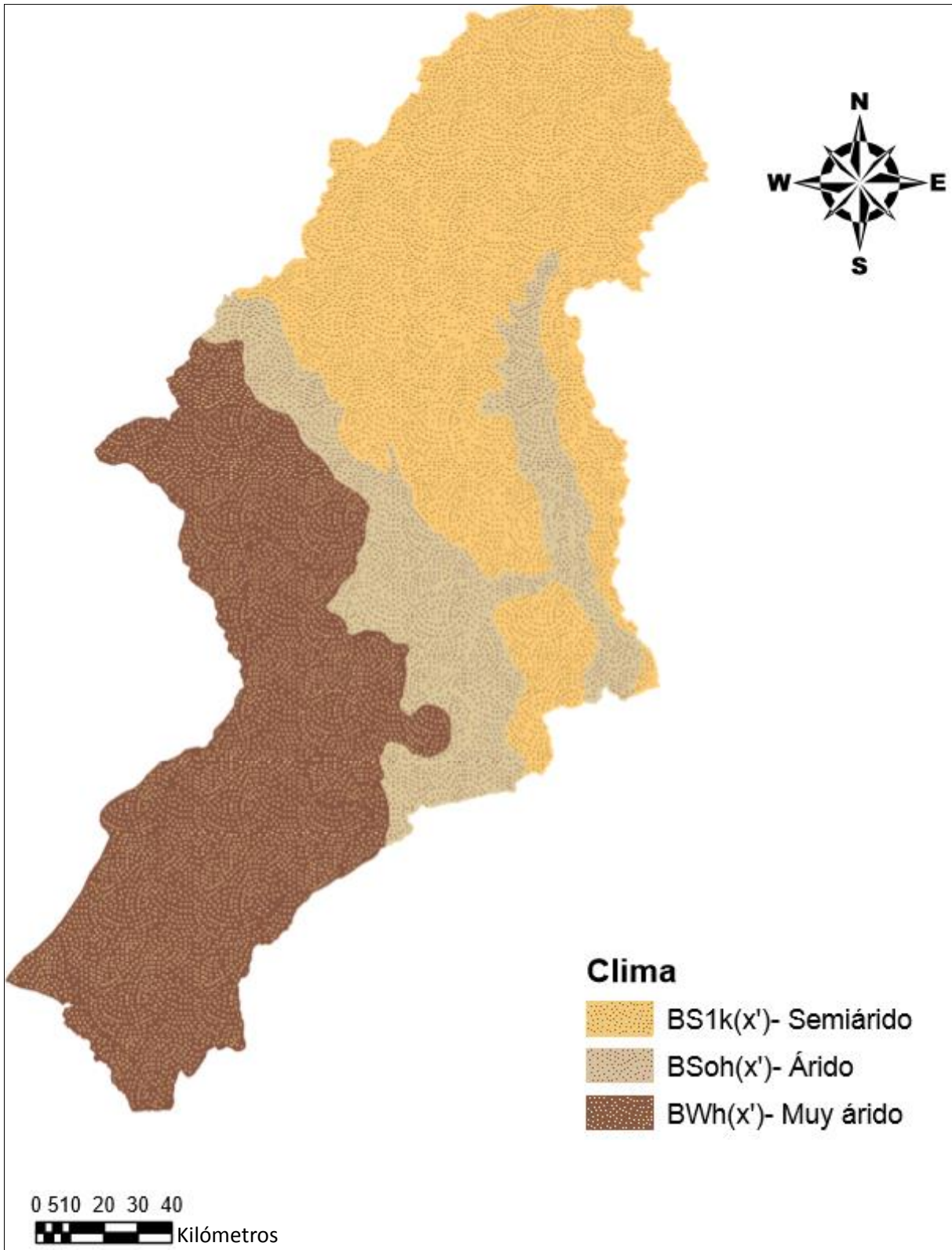


Fig. 4.15 Clima en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Uso de suelo y vegetación

Esta característica influye de forma directa en el factor de cobertura vegetal C de la USLE, el uso de suelo y vegetación de la zona determina que tan protegida esta una cuenca del efecto de erosión. De acuerdo a esta característica, se asignan valores de C como se verá en el Cap. 4.2 “Cálculo de la pérdida de suelos por erosión hídrica en cada cuenca”.

Para establecer la distribución espacial de esta característica se utilizaron los mapas del portal digital del INEGI; primero se identificó el uso de suelo y vegetación de cada zona y después se identificaron los valores con mayor superficie en la cuenca y se calcularon sus porcentajes (Tabla, 4.14, 4.15 y 4.16).

Tabla 4.14 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: INEGI.

USV	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Pastizal cultivado	789.7	63.4
Selva perennifolia	189.8	15.2
Agricultura de temporal	152.9	12.3
Vegetación hidrófila	68.3	5.5
Bosque mesófilo de montaña	26.0	2.1
Agricultura de riego	13.2	1.1
Otros	6.5	0.5
Total	1 246.5	100.0

Tabla 4.15 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río San Pedro. Fuente: INEGI.

USV	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Bosque de coníferas	8 292.0	28.4
Pastizal	4 833.0	16.5
Bosque de encino	4 352.3	14.9

Tabla 4.15 Continuación Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río San Pedro.

Fuente: INEGI.

USV	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Agricultura de temporal	4 298.0	14.7
Agricultura de riego	1 754.2	6.0
Matorral xerófilo	1 700.6	5.8
Selva caducifolia	939.5	3.2
Vegetación inducida	922.1	3.2
Selva subcaducifolia	889.6	3.0
Bosque mesófilo de montaña	247.6	0.8
Vegetación hidrófila	207.1	0.7
Selva perennifolia	167.2	0.6
Otros	619.2	2.1
Total	29 222.4	100.0

Tabla 4.16. Uso de suelo y vegetación en la cuenca del Río Sonora. Fuente: INEGI.

USV	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Matorral xerófilo	12 739.1	47.7
Selva caducifolia	5 240.1	19.6
Bosque de encino	2 657.7	10.0
Pastizal	1 823.1	6.8
Pastizal cultivado	1 427.3	5.3
Agricultura de riego	1 244.9	4.7
Vegetación inducida	589.0	2.2
Bosque de mezquite	460.5	1.7
Otros	523.2	2.0
Total	26 704.9	100.0

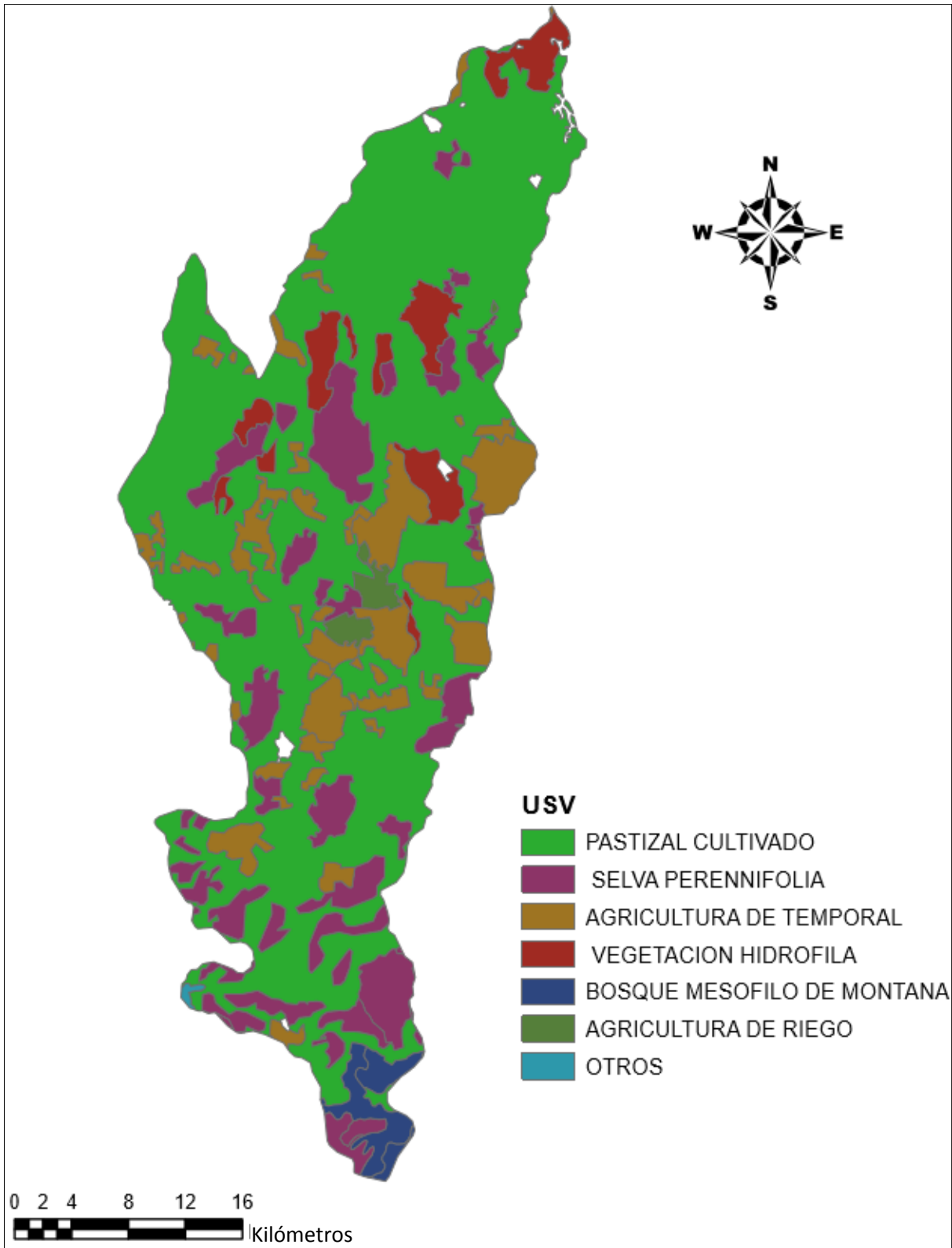


Fig. 4.16 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

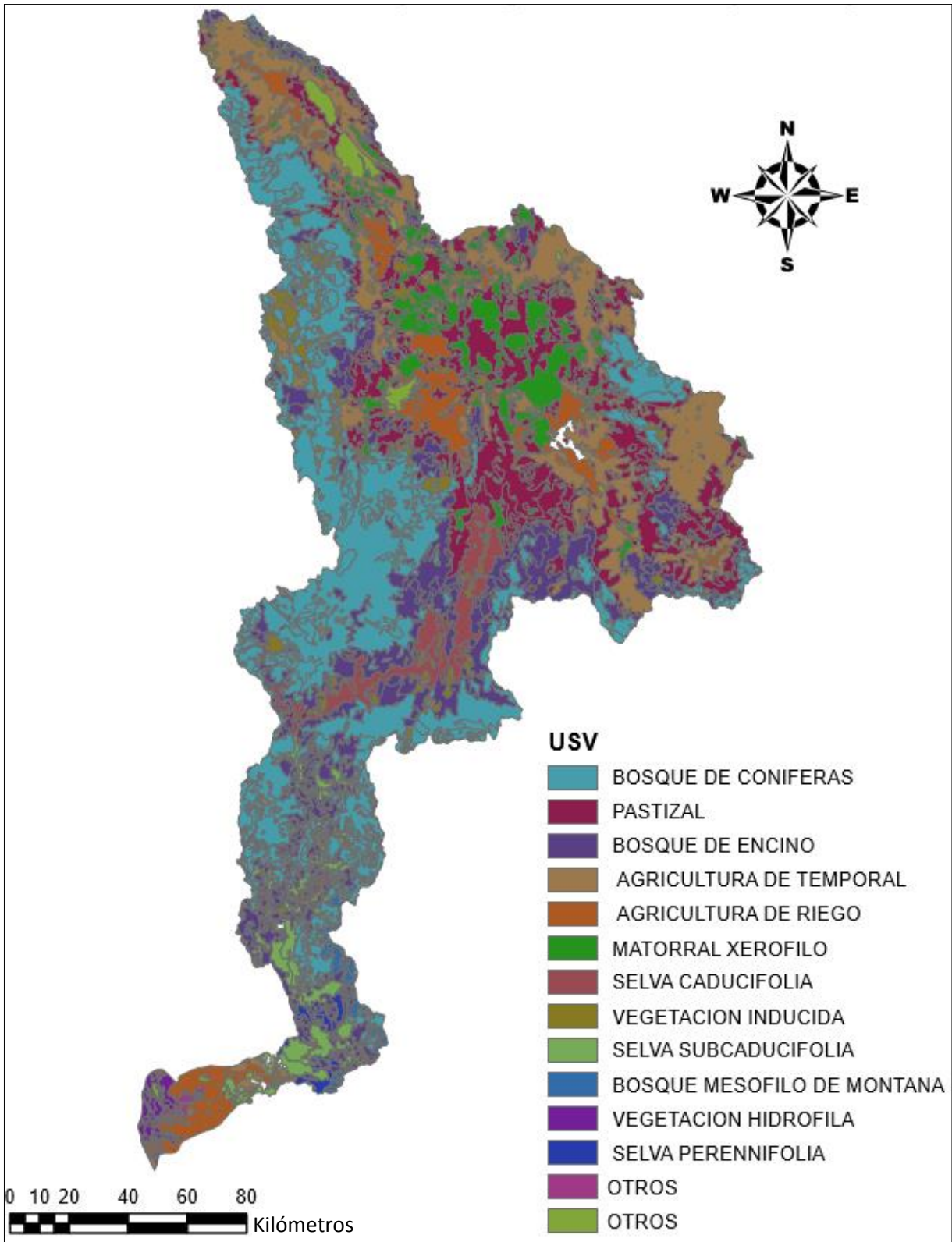


Fig. 4.17 USV en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

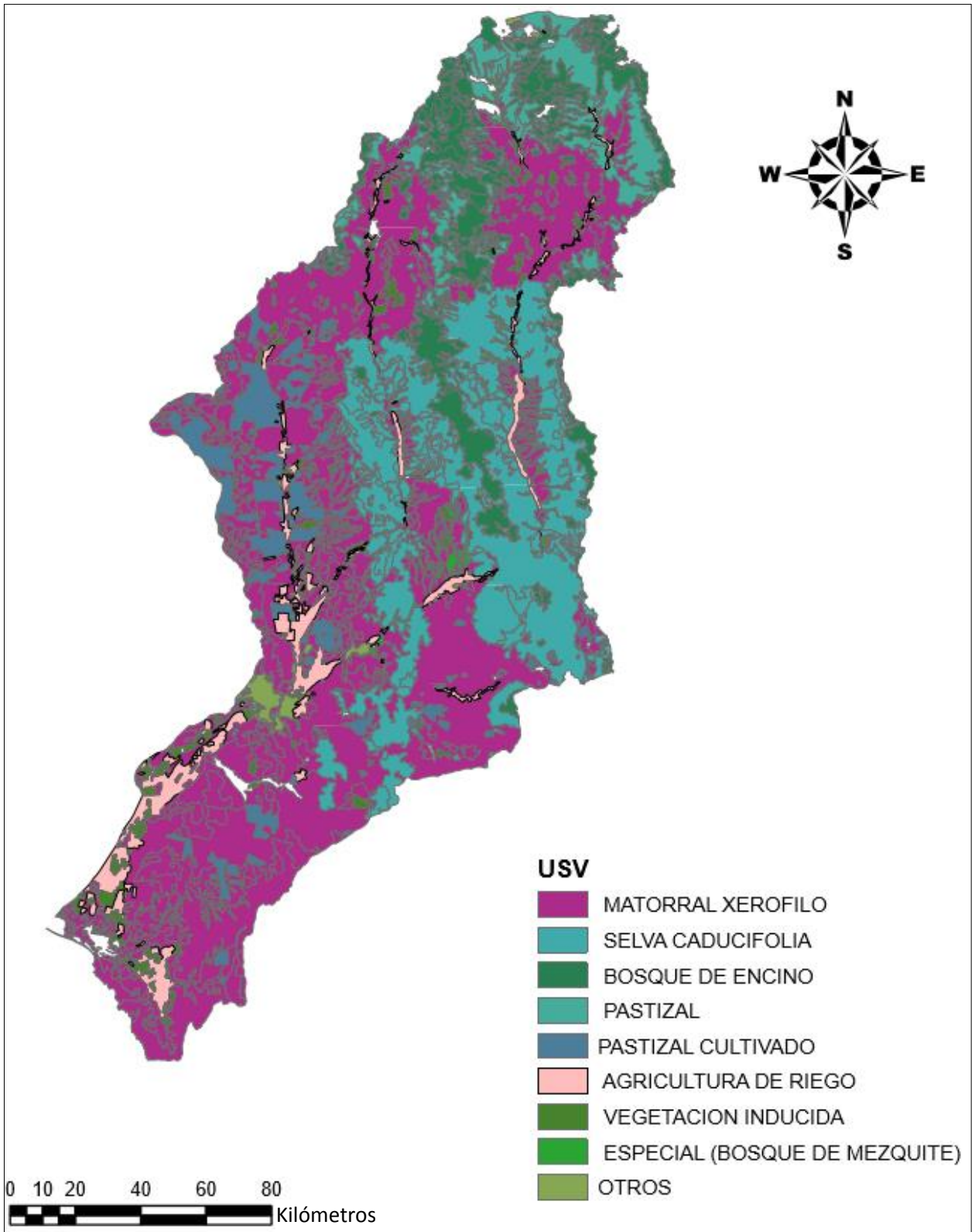


Fig. 4.18 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica en cada cuenca.

En el Cap. 2.2 “Metodología a emplear. Ecuación Universal de Perdida de Suelos” se calcularon los valores de los factores de erosividad de la lluvia (R), erosionabilidad del suelo (K), longitud e inclinación de pendiente (LS) y cobertura vegetal (C) de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos (USLE) para cada cuenca con la metodología que se explica en ese capítulo.

Para el cálculo del factor C de cada cuenca se emplea la Tabla de valores del factor de cobertura vegetal del apartado de “Anexos”, al asignar valores a cada uso de suelo se llega a lo siguiente:

Tabla 4.17 Valores del factor C asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Vegetación hidrófila	0.001
Bosque mesófilo de montaña	0.002
Selva perenifolia y Agricultura de riego	0.004
Pastizal cultivado	0.027
Agricultura de temporal	0.25

Tabla 4.18 Valores del factor C asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Cuerpo de agua, zona urbana	0.0010
Vegetación inducida	0.0020
Agricultura de riego	0.0040
Selva caducifolia	0.0100
Matorral xerófilo	0.0120
Bosque de pino-encino	0.0200
Pastizal inducido	0.0270

Tabla 4.18 Continuación. Valores del factor C asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Bosque de pino	0.0400
Selva baja espinosa subperenifolia	0.04370
Selva subcaducifolia	0.0800
Palmar natural	0.1000
Bosque de mezquite	0.1800
Bosque de encino	0.1880
Selva perennifolia	0.1930
Bosque de coníferas	0.2000
Agricultura de temporal	0.2500
Selva subcaducifolia	0.2700
Pastizal natural	0.2725
Suelo desprotegido	1.0000

Tabla 4.19 Valores del factor C asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Cuerpo de agua, zona urbana	0.001
Agricultura de riego y bosque de encino	0.004
Matorral xerófilo	0.015
Bosque de coníferas	0.02
Vegetación inducida	0.027
Vegetación dunas costeras	0.08
Bosque de mezquite	0.188
Agricultura de temporal	0.25
Selva caducifolia	0.27
Pastizal	0.2725
Suelo desprotegido	1

Para la asignación del factor K de cada cuenca se emplea la tabla 2.4 del Cap. 2.2.2 “Factor de erosionabilidad del suelo”; al asignar los valores a cada unidad de suelo de acuerdo a su edafología y textura se llega a las siguientes tablas: La edafología y textura se obtiene de las cartas temáticas del INEGI serie IV donde el territorio viene clasificado de acuerdo a esta característica.

Tabla 4.20 Valores del factor K asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

Edafología	Textura	Factor K
Acrisol	Fina	0.007
Cambisol	Fina	0.013
Acrisol	Media	0.02
Feozem	Media	0.02
Gleysol	Media	0.02
Litosol	Media	0.02
Rendzina	Media	0.02
Cambisol	Gruesa	0.026
Cambisol	Media	0.04
Castanozem	Media	0.04
Fluvisol	Media	0.04
Luvisol	Media	0.04
Planosol	Media	0.04
Regosol	Media	0.04
Solonchak	Media	0.04
Solonetz	Media	0.079
Xerosol	Media	0.079
Yermosol	Media	0.079

Tabla 4.21 Valores del factor K asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

Edafología	Textura	Factor K
Feozem	Fina	0.007
Acrisol	Fina	0.013
Cambisol	Fina	0.013
Castañozem	Fina	0.013
Feozem	Gruesa	0.013
Litosol	Gruesa	0.013
Luvisol	Fina	0.013
Rendzina	Gruesa	0.013
Solonchak	Fina	0.013
Feozem	Media	0.02
Litosol	Media	0.02
Ranker	Media	0.02
Rendzina	Media	0.02
Castañozem	Gruesa	0.026
Fluvisol	Gruesa	0.026
Luvisol	Gruesa	0.026
Regosol	Gruesa	0.026
Vertisol	Fina	0.026
Xerosol	Fina	0.026
Acrisol	Media	0.04
Cambisol	Media	0.04
Castañozem	Media	0.04
Fluvisol	Media	0.04
Luvisol	Media	0.04
Regosol	Media	0.04
Solonchak	Media	0.04
Xerosol	Media	0.053
Xerosol	Gruesa	0.053

Tabla 4.22 Valores del factor K asociados a cada uso de suelo de la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

Edafología	Textura	Factor K
Feozem	Fina	0.007
Feozem	Gruesa	0.013
Fluvisol	Gruesa	0.013
Litosol	Gruesa	0.013
Solonchak	Gruesa	0.013
Feozem	Media	0.02
Litosol	Media	0.02
Regosol	Gruesa	0.026
Solonchak	Fina	0.026
Vertisol	Fina	0.026
Vertisol	Media	0.026
Yermosol	Media	0.026
Fluvisol	Media	0.04
Regosol	Fina	0.04
Regosol	Media	0.04
Yermosol	Gruesa	0.053
Planosol	Fina	0.079
Planosol	Media	0.079
Xerosol	Gruesa	0.079
Yermosol	Fina	0.079

En las Fig. 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 se presentan los resultados de los factores R , K , LS y C respectivamente para la cuenca del río Pichucalco.

En las Fig. 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 se presentan los resultados de los factores R , K , LS y C respectivamente para la cuenca del río San Pedro.

En las Fig. 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 se presentan los resultados de los factores R , K , LS y C respectivamente para la cuenca del río Sonora.

Para calcular la erosión hídrica en la cuenca es necesario multiplicar estos factores mediante la ecuación (I) (Pág. 29). Consultar el apartado de “Anexos” para ver el procedimiento

En las Fig. 4.23, 4.28 y 4.33 se muestra el resultado de la erosión hídrica para las cuencas del río Pichucalco, San Pedro y Sonora respectivamente.

4.2.1 Pichucalco

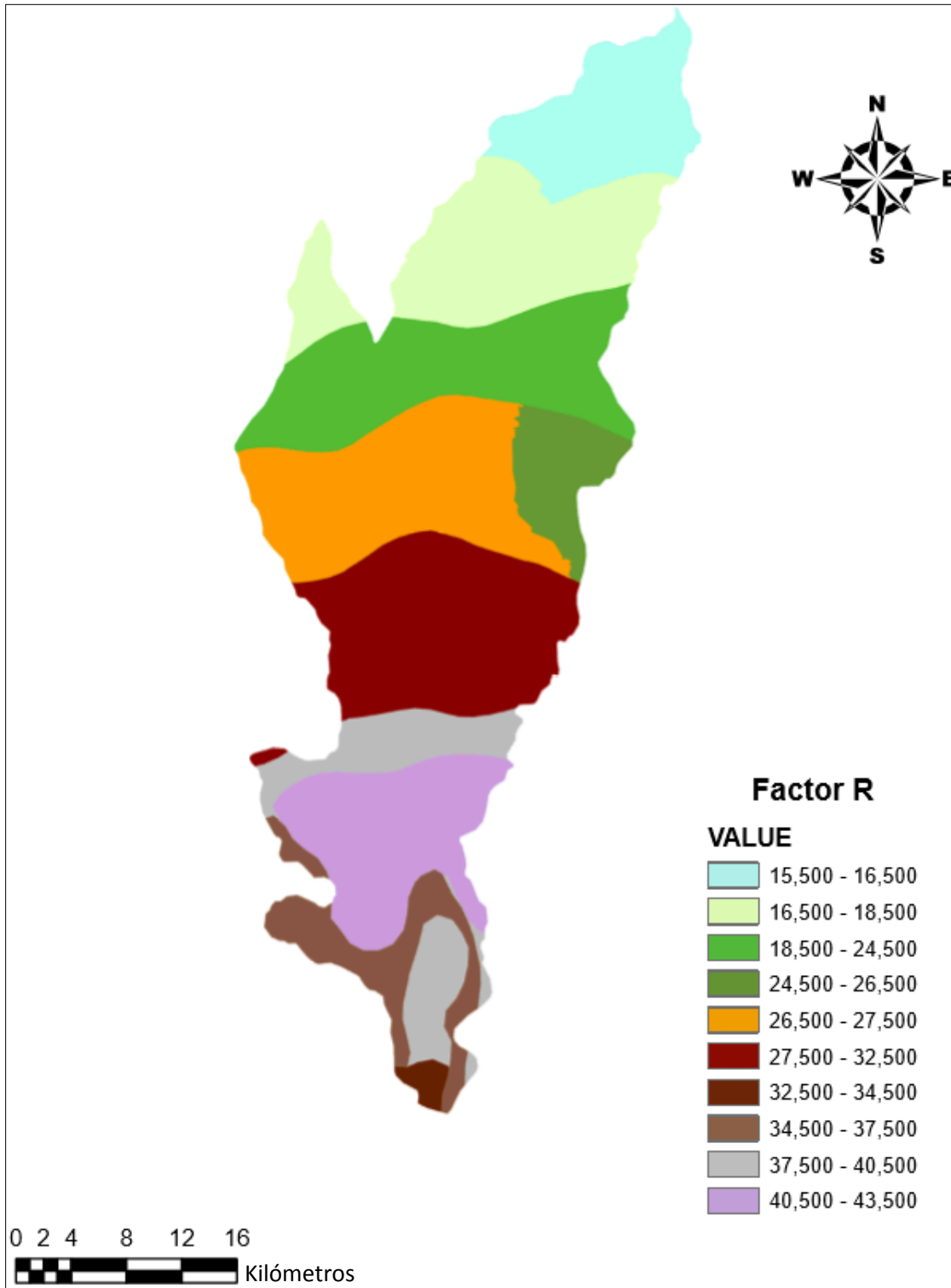


Fig. 4.19 Factor R en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

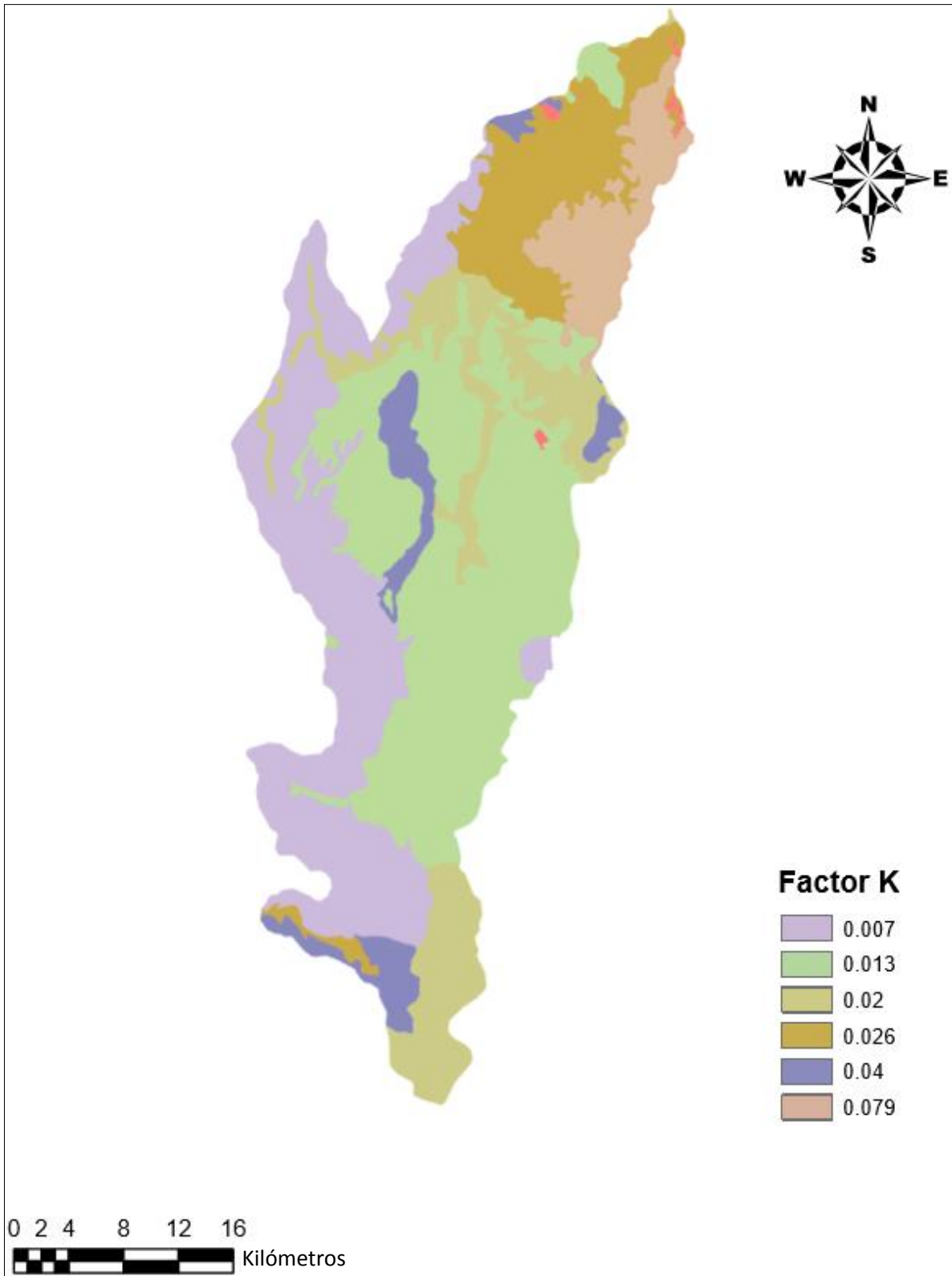


Fig. 4.20 Factor K en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

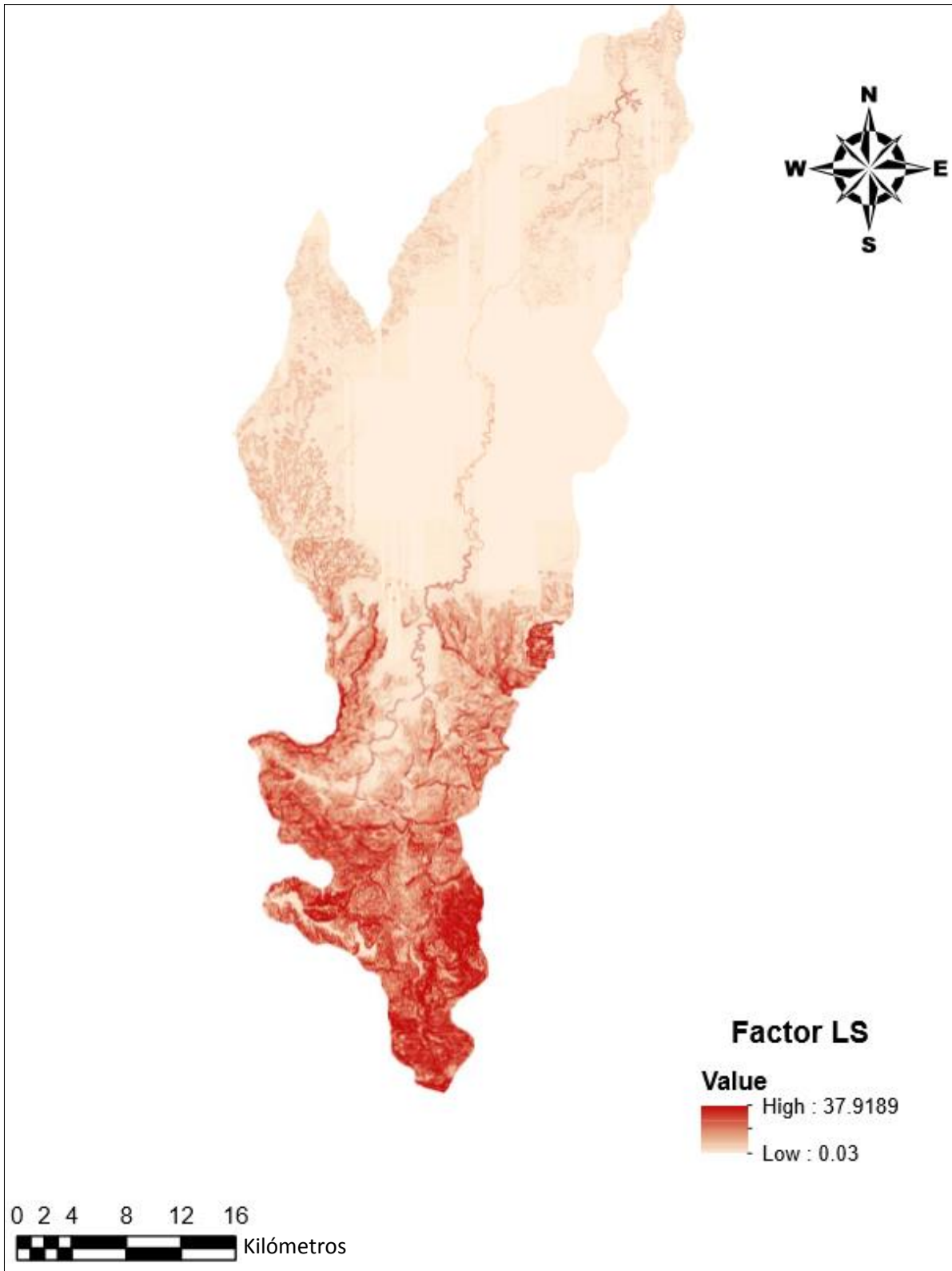


Fig. 4.21 Factor LS en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

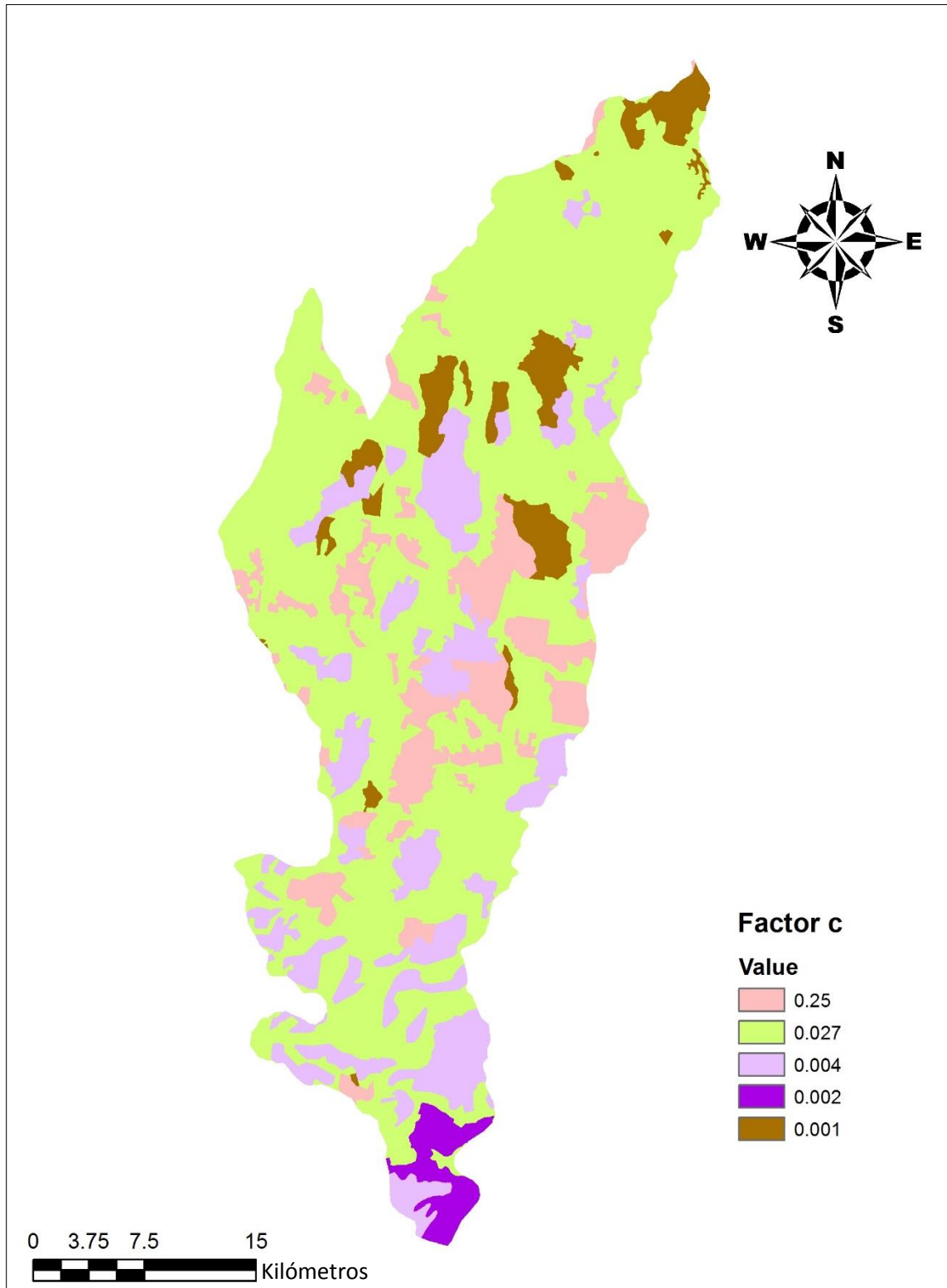


Fig. 4.22 Factor C en la cuenca del río Pichuqualco. Fuente: Elaboración propia.

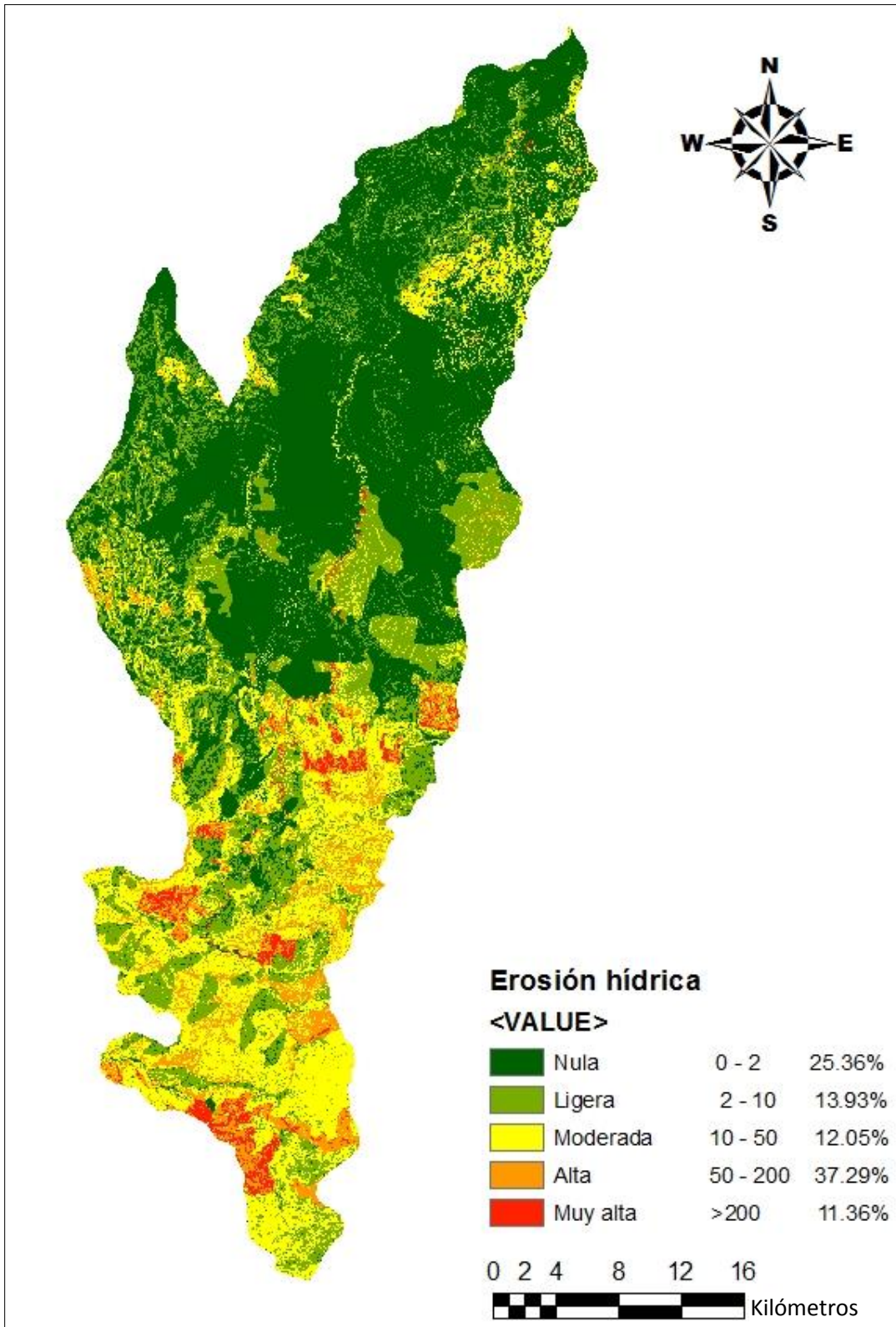


Fig. 4.23 Erosión hídrica en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 San Pedro

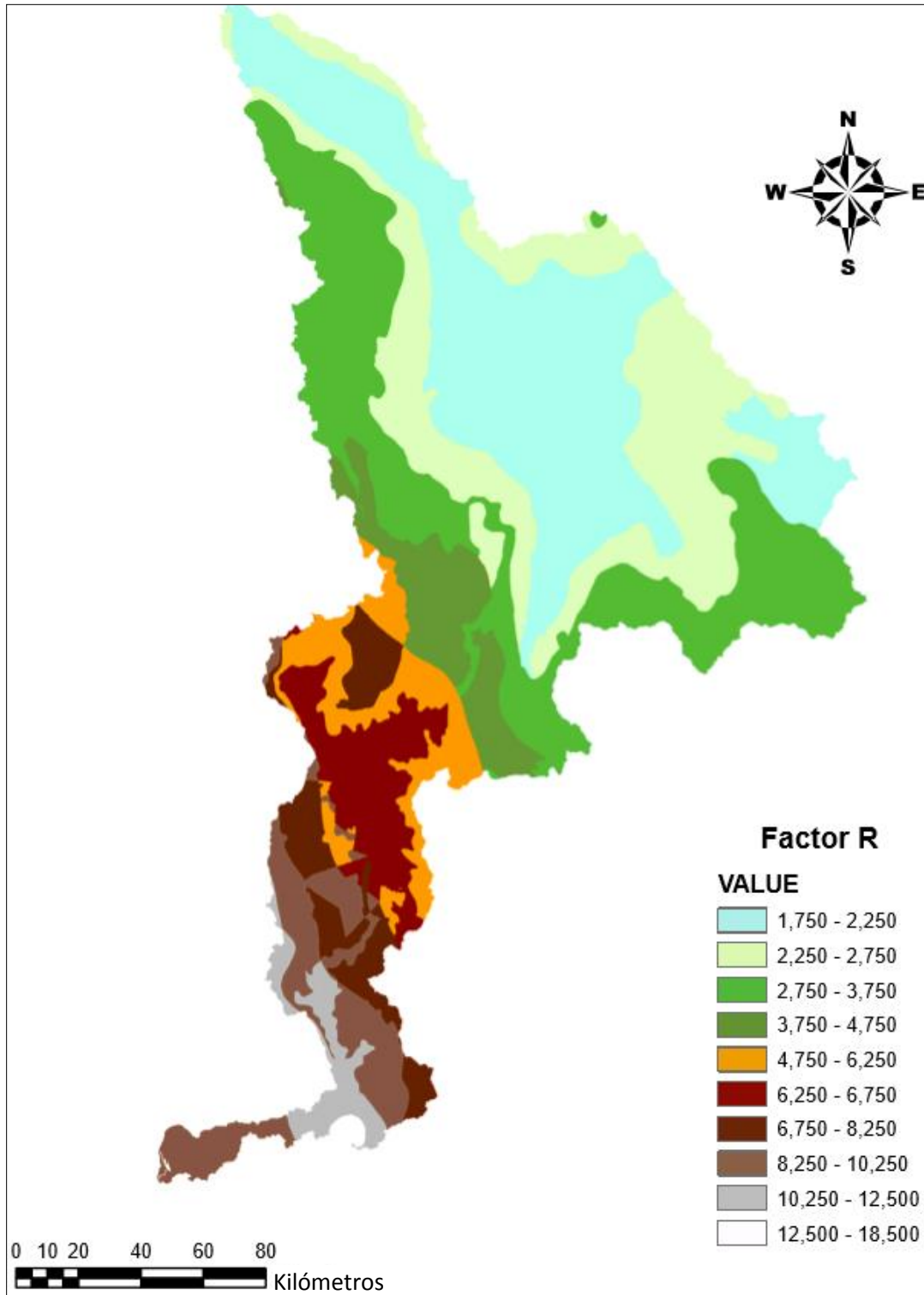


Fig. 4.24 Factor R en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

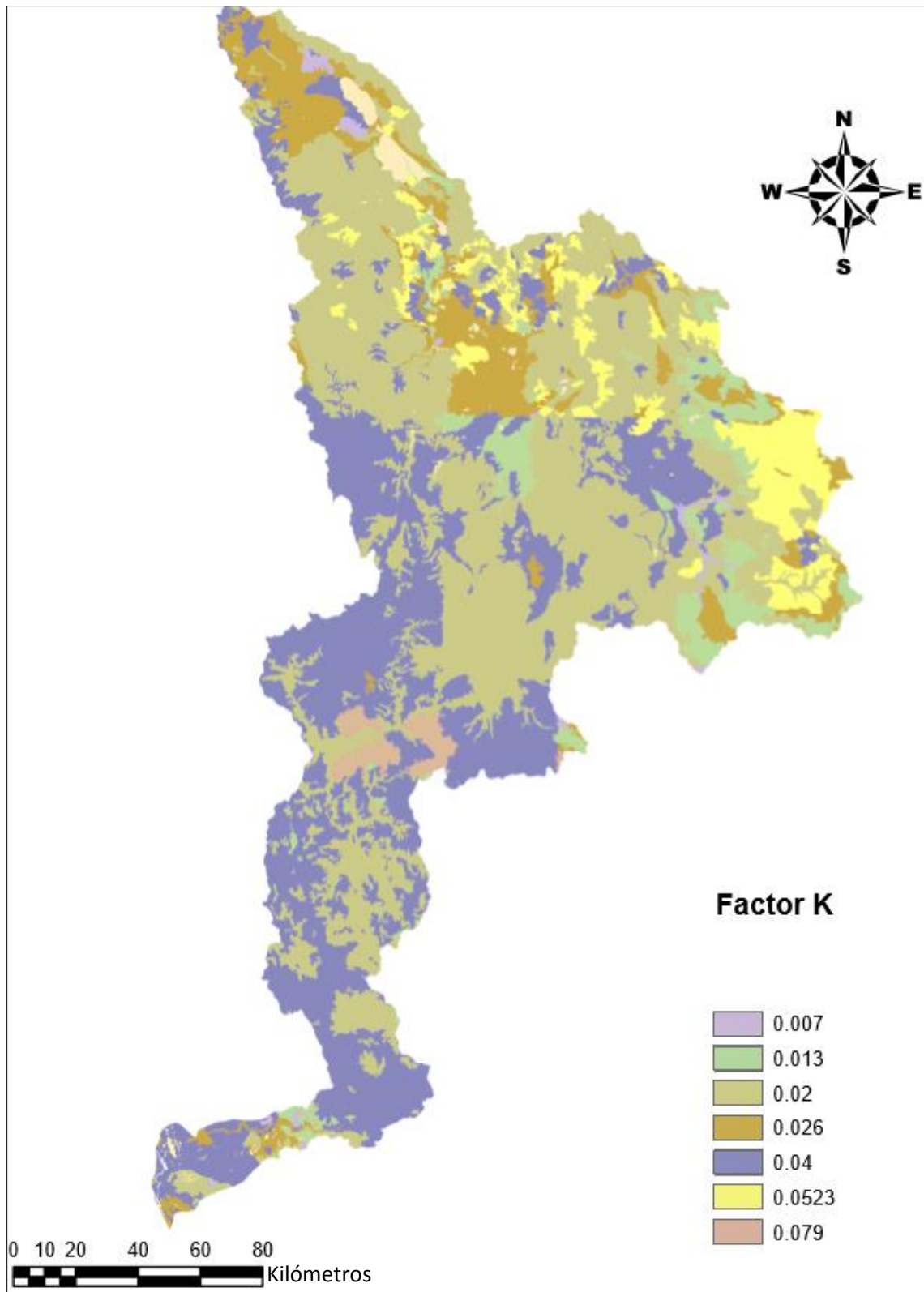


Fig. 4.25 Factor K en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

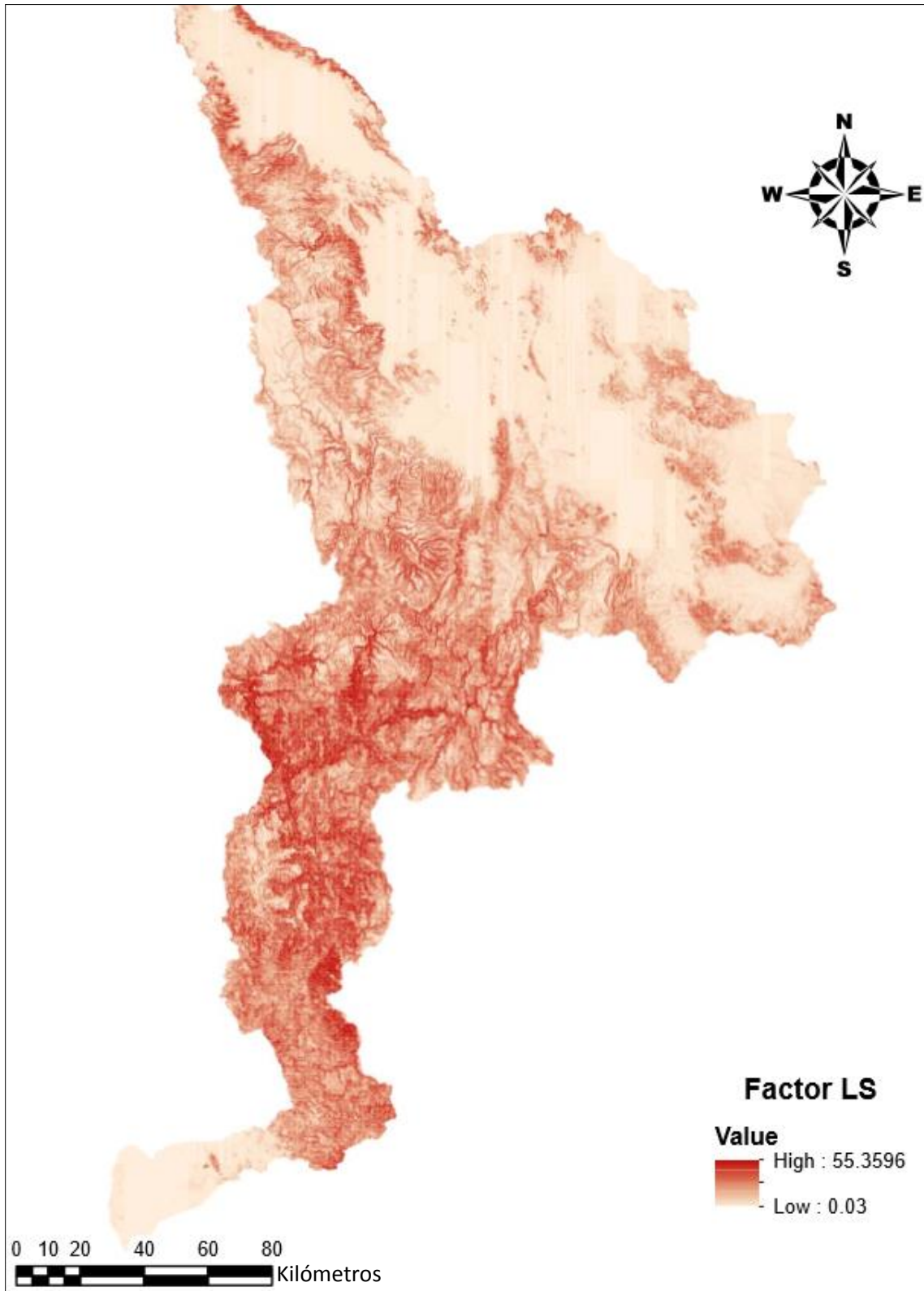


Fig. 4.26 Factor LS en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

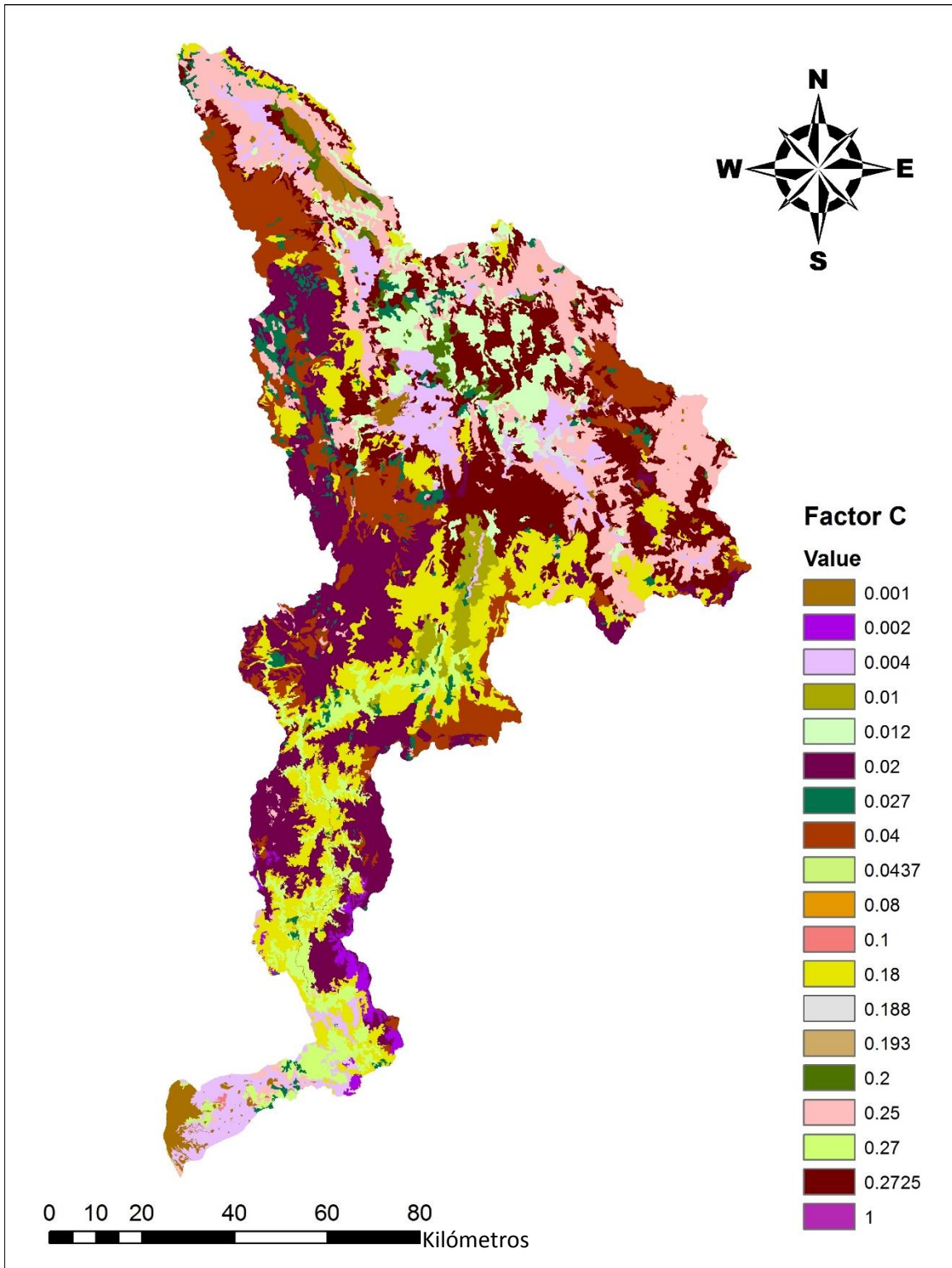


Fig. 4.27 Factor C en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

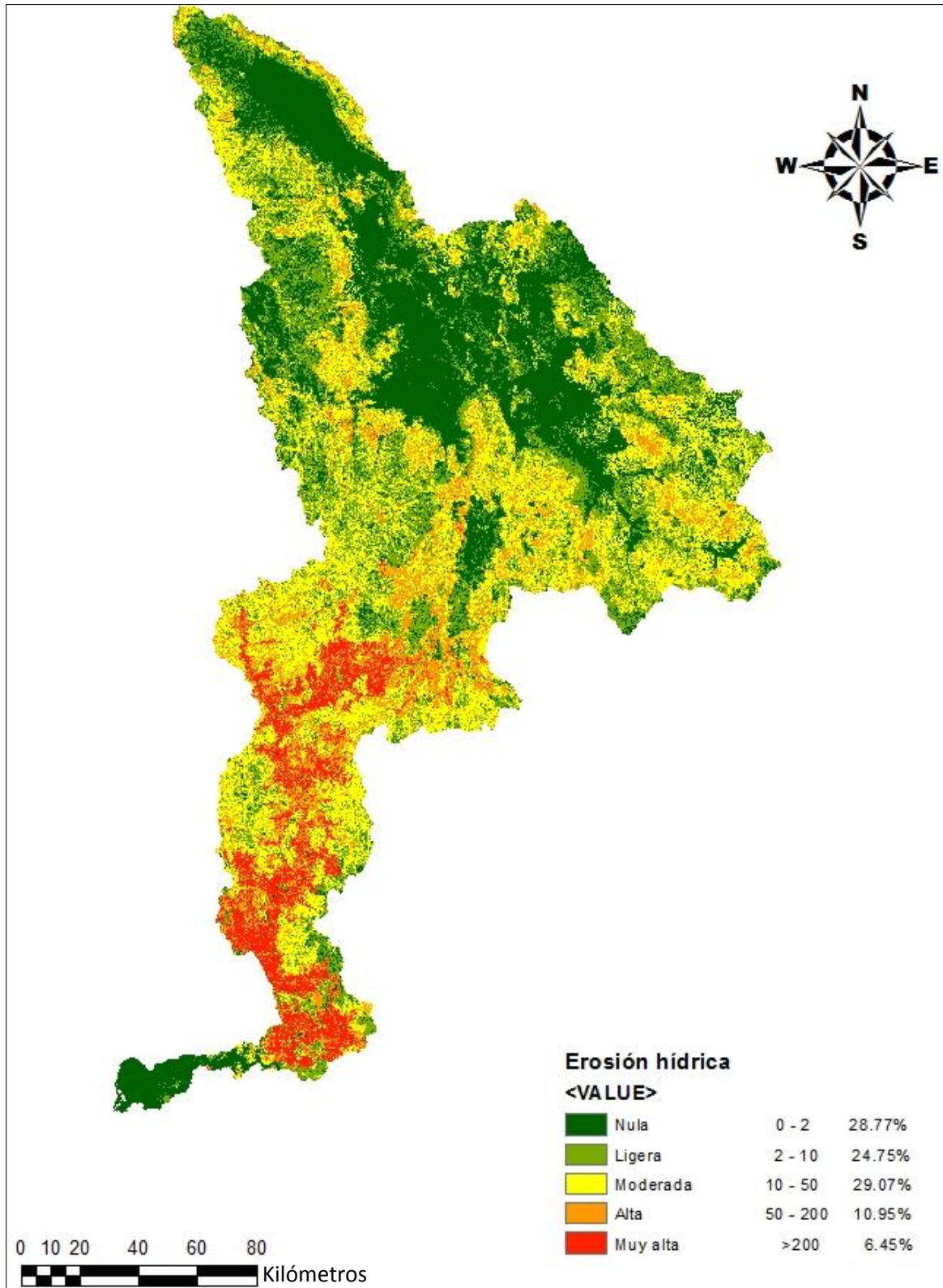


Fig. 4.28 Erosión hídrica en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Sonora

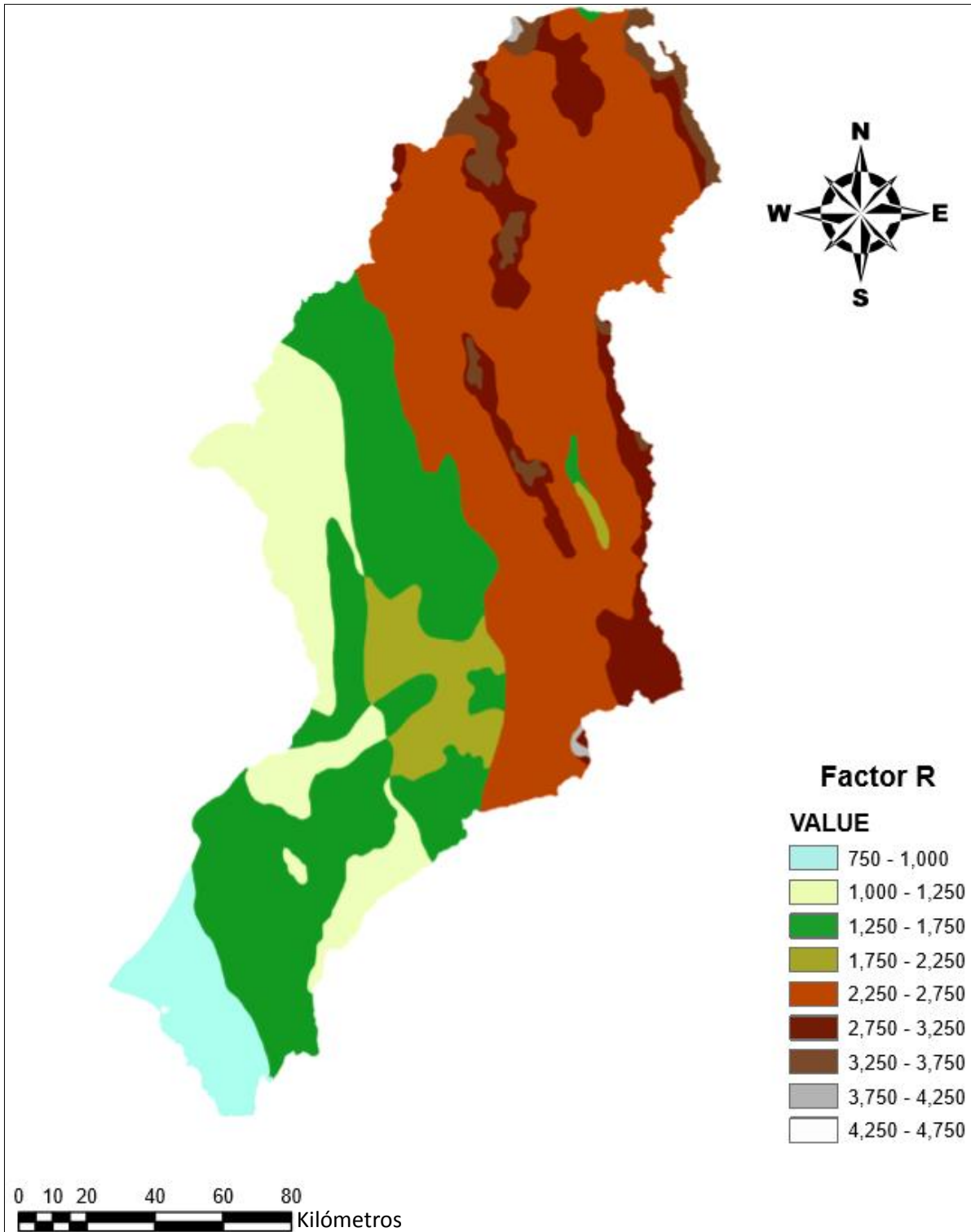


Fig. 4.29 Factor R en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

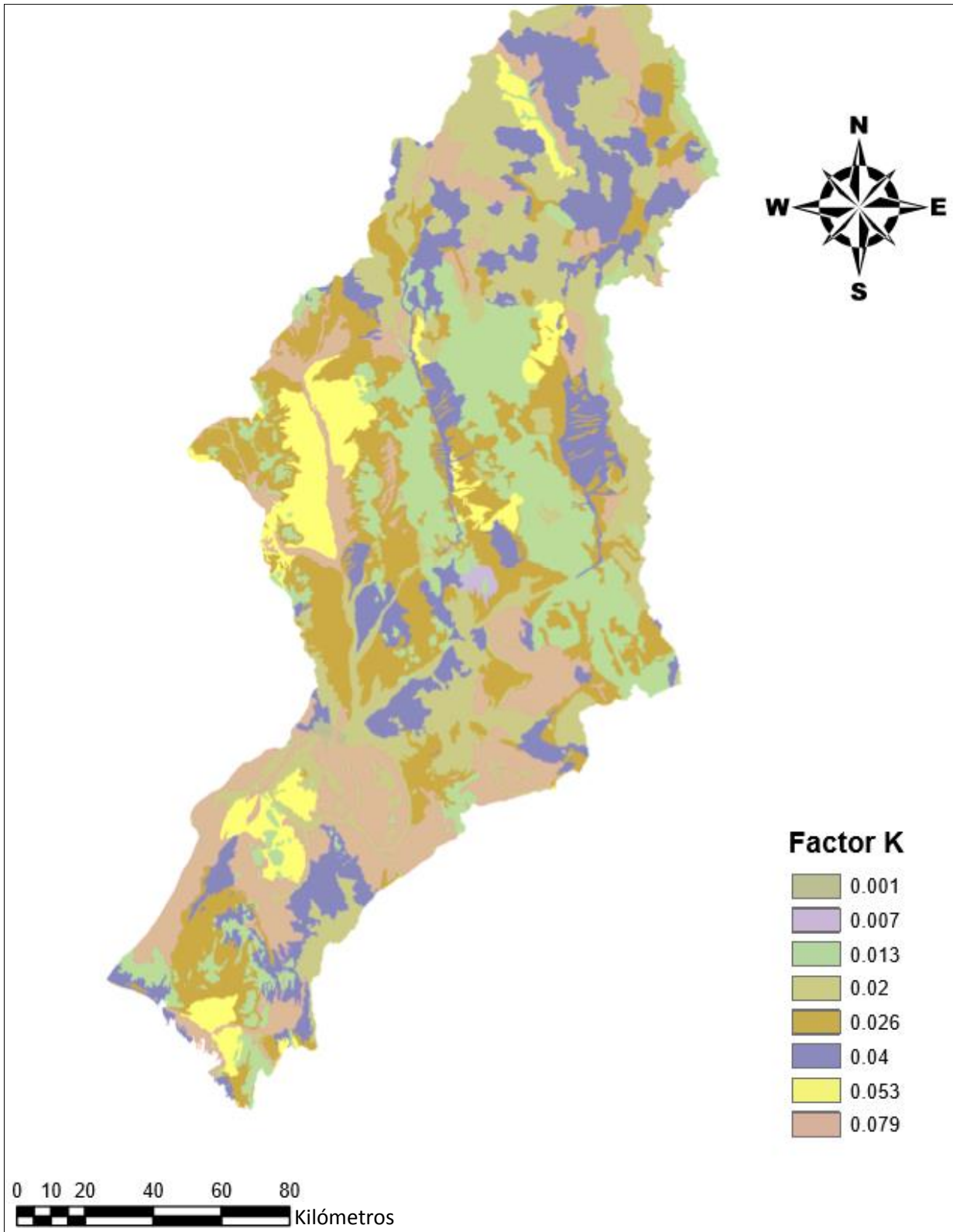


Fig. 4.30 Factor K en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

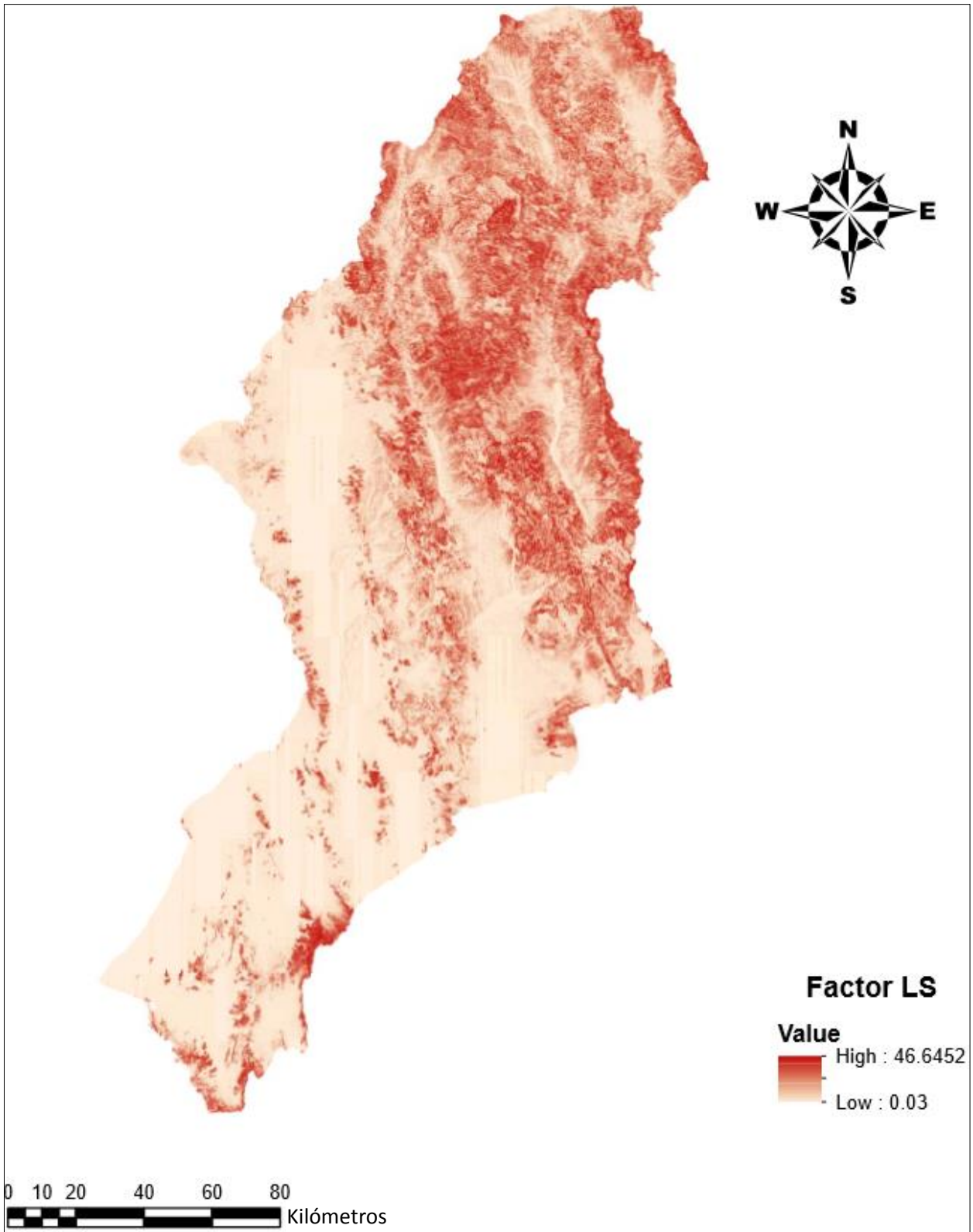


Fig. 4.31 Factor LS en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

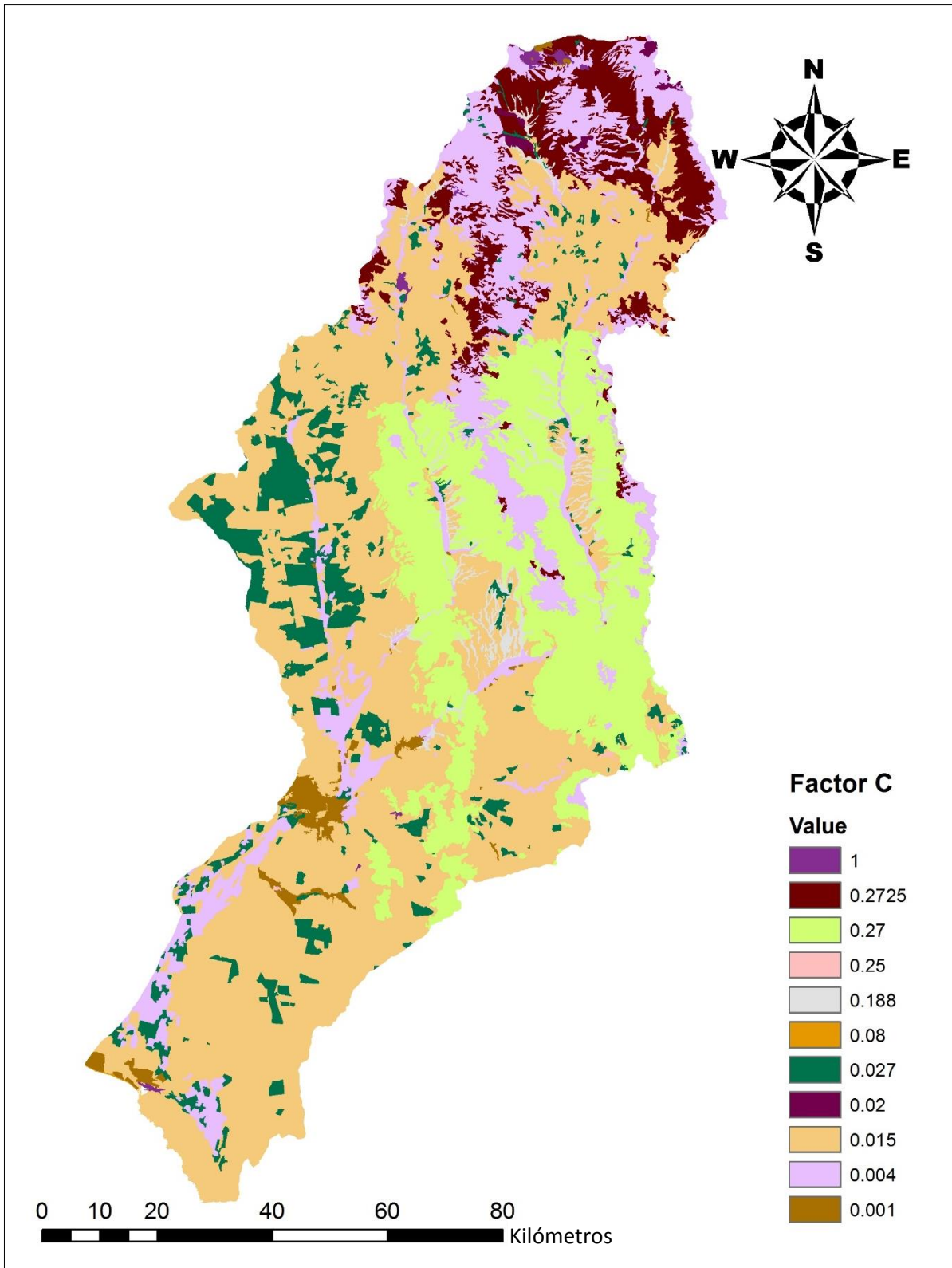


Fig. 4.32 Factor C en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

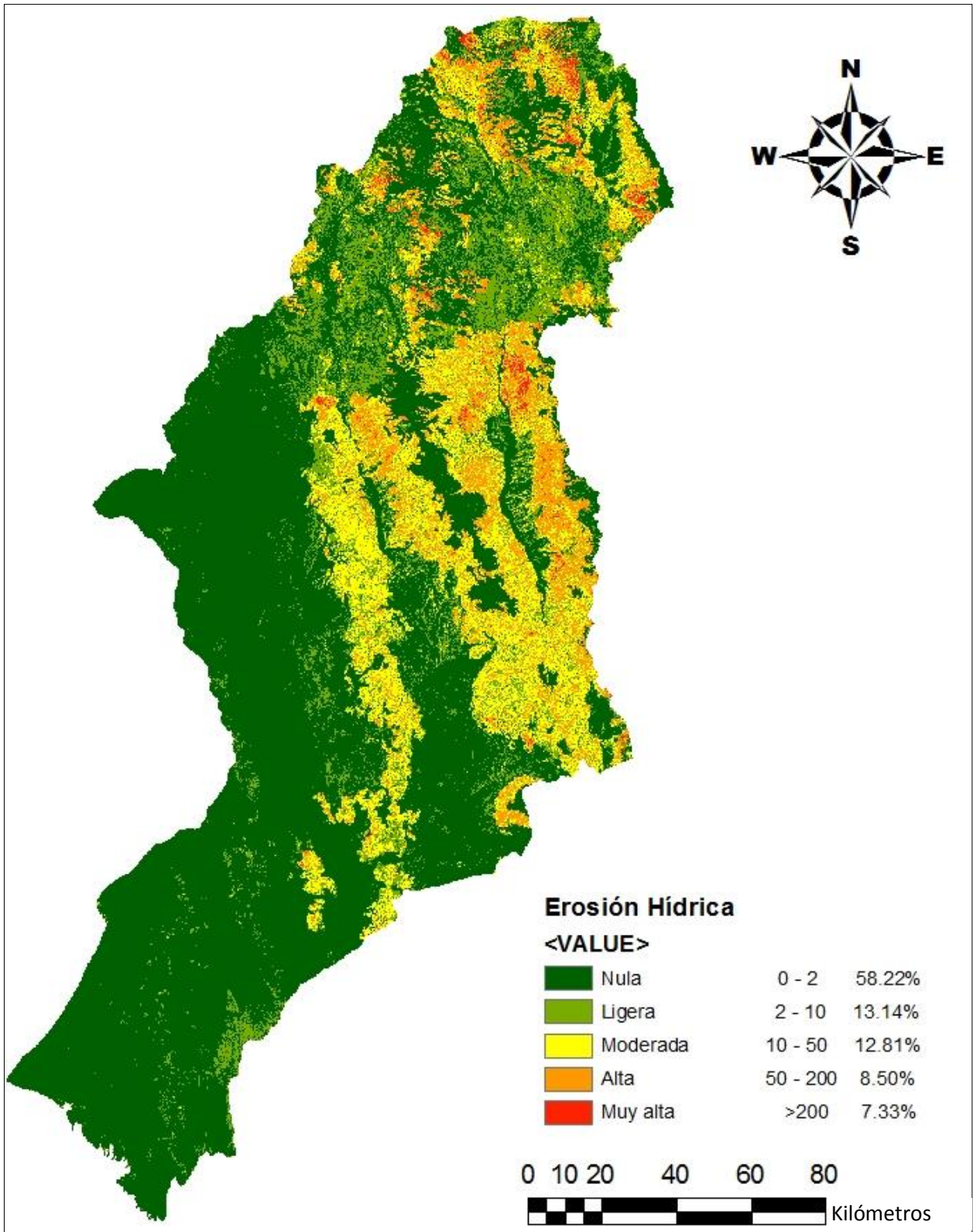


Fig. 4.33 Erosión hídrica en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis de resultados

El propósito de mostrar los mapas, es localizar visualmente las zonas donde la pérdida de suelo es más alta y revisar cuál de los factores pudiera tener mayor influencia en la erosión.

En la tabla 5.1 se muestran los valores medios de los factores que influyen en la erosión hídrica de cada cuenca.

Tabla 5.1. Valores medios de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos por cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Área	Pendiente	Factor <i>R</i>	Factor <i>L</i>	Factor <i>S</i>	Factor <i>C</i>	Factor <i>k</i>
Pichucalco	1 246.5	6.8400	28 672.358	0.1199	1.7131	0.0485	0.0232
San Pedro	29 222.4	12.2641	4 180.318	0.8130	3.1145	0.1306	0.02929
Sonora	26 704.9	8.7236	2 246.3553	0.8379	2.1994	0.0875	0.0358

*Área (km²), pendiente (grados), factor *R* (MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹), factor *L* (adimensional), factor *S* (adimensional), factor *C* (adimensional), factor *K* (t ha h MJ⁻¹mm⁻¹ ha⁻¹)

Se presentan las tablas de erosión de cada cuenca:

Tabla 5.2. Grados y porcentajes de erosión en las cuencas de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Grados de erosión (ton/ha año)		Porcentaje (%)		
		Pichucalco	San Pedro	Sonora
Nula	0 a 2	25.36	28.77	58.22
Ligera	2 a 10	13.93	24.75	13.14
Moderada	10 a 50	12.05	29.07	12.81
Alta	50 a 200	37.29	10.95	8.50
Muy alta	>200	11.36	6.45	7.33
Σ=		100.000	100.000	100.000

Cada una de las cuencas de estudio se localiza en una región diferente de la República Mexicana con diferentes características que influyen en el grado de erosión hídrica. Por ejemplo, el valor del factor R en cada cuenca no tiene un valor parecido (Tabla 5.1) debido a que los elementos como el clima influyen directamente sobre la cantidad e intensidad de la lluvia. En Pichucalco únicamente se tiene clima tropical lluvioso; en San Pedro se tienen tres tipos de clima diferentes (tropical lluvioso, templado lluvioso y seco), siendo el que predomina el clima seco; por último en la cuenca del río Sonora el clima es totalmente seco. Al analizar esto vemos que concuerda con los valores del factor R de la Tabla 5.1, el más alto corresponde a la zona de Pichucalco, posteriormente el de la cuenca San Pedro y por último la cuenca del río Sonora. Los factores topográficos (LS) influyen de manera proporcional, es decir, a menor valor del factor LS , menor será el valor de la erosión hídrica, debido a que físicamente representa una parte plana (con poco pendiente) de la cuenca con bajo potencial erosivo.

Si se visualizan los mapas del Factor LS de cada cuenca (Fig. 4.21, 4.26, 4.31) junto con los de erosión hídrica correspondientes (Fig.4.23, 4.28, 4.33), se observa que en las partes donde el factor LS tiene los valores altos, la tasa de erosión hídrica en este sector también es alta, debido a que los accidentes topográficos de esa zona la hacen más susceptible a este proceso. Estas regiones con altos valores, se identifican con las “raíces o franjas” con un color rojizo en los mapas del factor debido a la topografía (LS), mientras que en los mapas de erosión se observa que estas “raíces o franjas” se conservan debido a la gran influencia de este factor.

El factor C , uso de suelo y vegetación indica qué tan protegida está una cuenca, entre más se acerque su valor a cero, indica que la cuenca tiene una mejor cobertura que le permite protegerse de la lluvia y así disminuir el efecto de la erosión hídrica. En este rubro, se puede ver que la cuenca que mejor cobertura tiene es la del río Pichucalco, después la de Sonora y por último la de San Pedro (Tabla 5.1).

Al visualizar los mapas de erosión en las cuencas de estudio, se observa que existen “manchas o zonas”, muy definidas, las cuales también se aprecian en los mapas del factor C , se conservan la forma y el tamaño. De esto podemos concluir, que existen usos de suelo (a los que se les asocia valores de C muy cercanos a cero o a uno) que a

pesar de que los otros valores que influyen en la USLE sean muy extremos, esta característica del suelo le permite conservarse o erosionarse en función de su cobertura vegetal. Por ejemplo, en la Fig. 4.22 “Factor C en la cuenca del río Pichucalco”, se encuentra el valor más alto (0.25), lo que repercute en el mapa de la Fig. 4.23 “Erosión hídrica en la cuenca del río Pichucalco” generando zonas con valores de erosión considerable.

El factor K , indica la susceptibilidad de un suelo a erosionarse, por ejemplo, cuanto mayor sea la capacidad de suelo para transmitir agua, menor será el volumen de escurrimiento generado, y con ello su capacidad erosiva disminuirá. La capacidad de almacenar y transmitir agua está íntimamente ligada tanto a la textura como a la estructura del suelo. En los párrafos siguientes, se presenta un análisis de la edafología en cada cuenca y su comportamiento ante el fenómeno de erosión.

En la cuenca del río Pichucalco, el grado de erosión predominante es Alta (50 a 200 t/ha año) con 37.29 % de la superficie (Tabla 5.2). La zona que presenta mayor erosión se encuentra en la parte sur de la cuenca donde se presentan mayores accidentes topográficos (la parte norte no presenta accidentes topográficos y es por donde el drenaje de la cuenca desemboca al mar) y valores altos del factor R (lluvia); la parte norte no tiene accidentes topográficos considerables y se encuentra la desembocadura al Golfo de México. Además, la unidad de suelo que predomina en esta zona es el Acrisol, Litosol y Cambisol; retomando lo visto en el Cap. 4.1 “Caracterización de las cuencas” este tipo de suelos van de moderada a alta susceptibilidad a la erosión, lo cual se comprobó en esta modelación (Tabla 5.2).

En la cuenca del río San Pedro, el grado de erosión predominante es de tipo moderado (10 a 50 t/ha año) con 29.07 % de la superficie (Tabla 5.2). La mayoría de la cuenca se encuentra por debajo del grado moderado de erosión, es decir, si sumamos los grados que se encuentran en el rango de nula a moderada se tiene un total de 82.59 % de la superficie de la cuenca. Si observamos la Fig. 4.28 “Erosión hídrica en la cuenca del río San Pedro”, se observa que en la parte central de la cuenca se concentra el mayor grado de erosión; en esta zona los factores de uso de suelo y vegetación se encuentran más alejados de cero, por tanto, el suelo no tiene un buen grado de resistencia a este

efecto. El tipo de cobertura vegetal que se tiene en esta zona es el bosque de pino-encino predominantemente (Tabla 5.2).

Además, el factor topográfico *LS* tiene valores mayores en esta zona mencionada, los cuales se pueden identificar con color rojo (Figura 4.26. Factor *LS* en la cuenca del río San Pedro). Cabe mencionar que en esta zona con mayores accidentes topográficos, las unidades de suelo que predominan son el Cambisol y Regosol, los cuales son susceptibles a erosión.

En la cuenca del río Sonora, el grado de erosión predominante es Nulo (0 a 2 t/ ha año) con 58.22 % de la superficie (Tabla 5.2), lo cual representa un poco más de la mitad de la superficie de la cuenca. Los grados de erosión altos los podemos visualizar en la parte noreste de la cuenca, donde el tipo de vegetación que se presenta es pastizal y matorral subtropical con valores de cobertura vegetal que indican suelo desprotegido (cercano a 1). Se tiene una zona con accidentes topográficos en las zonas de mayor erosión (Tabla 5.2).

A continuación, se muestran los datos de la pendiente para la cuenca del río Pichucalco:

Tabla 5.3. Grados de pendiente en la cuenca del río Pichucalco. Fuente: Elaboración propia.

Grado	Rango	Porcentaje (%)
Pendiente plana	0 a 1	15.7
Ligeramente Suave	1 a 3	33.9
Suave	3 a 5	25.4
Moderada	5 a 15	17.4
Fuerte	>15	7.6

En la cuenca del río Pichucalco, el uso de suelo y vegetación en las zonas con mayor erosión es el de agricultura de temporal, mientras que en las zonas de menor erosión se tiene vegetación hidrófila y selva perennifolia. El USV que predomina en la cuenca es pastizal cultivado (Tabla 4.6) por lo que si comparamos la Fig. 4.16 “Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Pichucalco” y la Fig. 4.23 “Erosión hídrica en la cuenca del río Pichucalco” se observa que al pastizal cultivado le corresponden valores muy

variados según el grado de erosión. Esto se debe a que al combinar el efecto de la lluvia sobre la cobertura vegetal y la pendiente, los valores resultan bajos debido a que la pendiente es plana.

En la Tabla 5.3 se observa que los valores están prácticamente repartidos en los cuatro primeros rangos lo cual significa que en la cuenca se encuentra con una gran variedad de pendientes pero la predominante es la ligeramente suave por lo cual se esperaría que la erosión en la mayor parte de la cuenca tuviera un grado de erosión ligera.

En la cuenca del río San Pedro, los datos del grado de pendiente son:

Tabla 5.4. Grados de pendiente en la cuenca del río San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

Grado	Rango	Porcentaje (%)
Pendiente plana	0 a 1	31.1
Ligeramente Suave	1 a 3	14.7
Suave	3 a 5	11.5
Moderada	5 a 15	8.3
Fuerte	>15	34.4

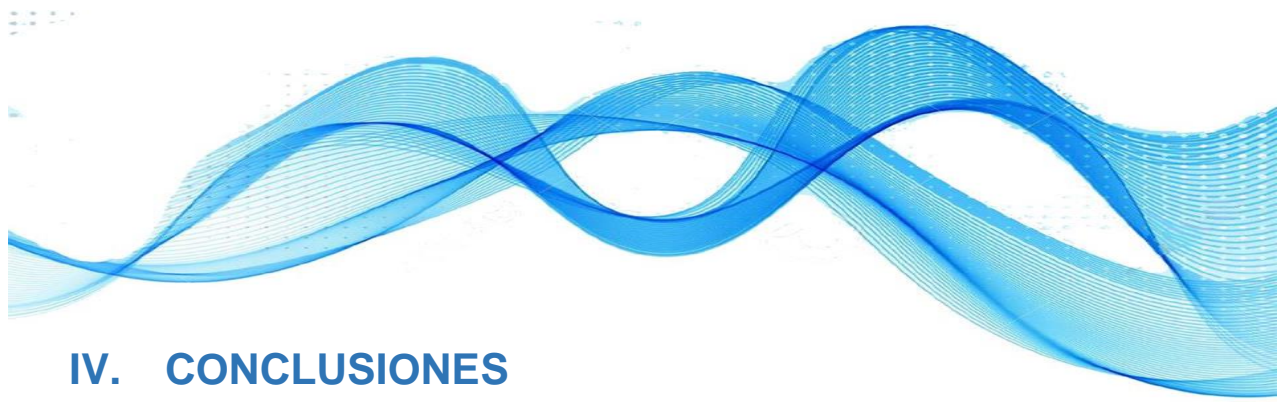
En la cuenca del río San Pedro, el USV que se tiene en la zona con mayor erosión es bosque de encino y selva subcaducifolia y en las zonas con menor erosión se tiene cultivos en regadío. El USV con mayor porcentaje en la cuenca es el bosque de coníferas, el cual tiene un valor del factor C de 0.02, esto indica que es poco susceptible a la erosión por lo que en esta zona se esperaría que los valores de erosión no sean altos. Esto se puede confirmar al comparar la Fig. 4.17 “Factor C en la cuenca del río San Pedro” y la Fig. 4.28 “Erosión hídrica en la cuenca del río San Pedro”.

Para la cuenca del río Sonora, los grados de erosión que están presentes son:

Tabla 5.5. Grados de pendiente en la cuenca del río Sonora. Fuente: Elaboración propia.

Grado	Rango	Porcentaje (%)
Pendiente plana	0 a 1	37.0
Ligeramente Suave	1 a 3	11.7
Suave	3 a 5	9.7
Moderada	5 a 15	7.4
Fuerte	>15	34.2

En la cuenca del río Sonora, el USV que se tiene en las zonas de mayor erosión son matorrales. Mientras que en las zonas con menor valor de erosión se tiene pastizales naturales. El USV predominante en esta zona es el matorral xerófilo que tiene asociado un valor de 0.015 del factor C , que de igual forma se esperaría un valor pequeño de erosión.



IV. CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados permiten obtener una visión a gran escala de los sectores más susceptibles a la erosión hídrica en cada cuenca y orientan en la toma de decisiones para la conservación y desarrollo sustentable del recurso suelo. Algunas acciones de conservación de suelos que se pueden llevar a cabo se presentan en el Cap. 2.2.5 “Factor de prácticas de conservación de suelo” las cuales están clasificadas de acuerdo al uso de suelo para poder aplicarlas de forma más efectiva a cada superficie de suelo.

Además, se podría realizar un análisis posterior del transporte de sedimento hasta un punto específico de la corriente, lo que permitiría determinar la cantidad de material arrastrado. Para poder determinar la ubicación de una presa existen factores determinantes como la topografía, la geología del lugar, volumen de escurrimientos, ancho de estrechamiento y carga disponible; los sedimentos afectan principalmente a la carga disponible ya que en el transcurso de los años se acumulan cada vez más materiales en el fondo del almacenamiento, lo que provoca que disminuya gradualmente la carga disponible.

El procedimiento de integración de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo con los factores expresados en imágenes tipo ráster y procesadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), permite el análisis, evaluación y representación cartográfica de la distribución espacial de la erosión hídrica, localizando geográficamente las áreas más afectadas.

Se puede clasificar a los valores de la ecuación USLE por el origen de los mismos, es decir, los factores R , LS y K provienen de la naturaleza y son variables que no podemos controlar, por otro lado los factores C y P tienen origen antropogénico, pueden ser modificables por el hombre. Esta característica de la USLE permite que al iniciar la etapa de análisis de una zona, la modelación estime la pérdida

potencial de suelo considerando únicamente los factores R, LS y K, con estos datos es posible proponer usos de suelo y prácticas de conservación en las zonas de mayor afectación y ofrecer recomendaciones a la sociedad como evitar el sobrepastoreo, construcción de diques o realizar campañas de reforestación. Después de que se analice y propongan soluciones, se procede a realizar una simulación considerando estas nuevas condiciones para la zona de estudio. Esto se puede repetir hasta que se aprecie en los resultados de la simulación los efectos de erosión permitidos. Otra ventaja de la USLE es que su manejo implica la utilización de poco capital, la relación beneficio-costos es muy grande ya que ofrece información para una planeación adecuada.

El grado de deterioro del suelo depende de la vulnerabilidad del sistema y de la magnitud de la perturbación. A su vez, la vulnerabilidad del sistema depende de las características del sitio, como son la precipitación, el tipo de vegetación, el tipo de suelo y topografía. Sin embargo, después de realizar los análisis se concluye que los factores que más influyen en la erosión de una cuenca son la lluvia, el uso de suelo y la pendiente.

Las tasas de erosión hídrica suelen ser mayores en zonas tropicales que en zonas templadas, ya que poseen ecosistemas altamente vulnerables al proceso erosivo (mayor frecuencia de lluvias intensas), además están sujetos a transformaciones agropecuarias y forestales por la acción del hombre.

Al hacer la comparación de los mapas de *LS* y erosión hídrica, podemos concluir que mientras mayor sea el desnivel o pendiente mayor velocidad y fuerza erosiva tendrá el agua, por lo que la energía del agua de escurrimiento es proporcional a la pendiente del terreno.

La vegetación protege a la superficie del suelo del impacto directo de las gotas de lluvia, intercepta y disminuye la energía con la que caen éstas, reduce la velocidad del agua de escurrimiento, aumenta la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua, y aumenta la resistencia del suelo debido al “amarre” de las raíces de las plantas.

Los suelos de textura gruesa tienen una mayor permeabilidad y por lo tanto, una probabilidad inferior de tener escurrimiento superficial y erosión hídrica. Las partículas gruesas tendrán menos desplazamiento durante el salpicamiento de las gotas y en caso de tener algún transporte por las aguas de escurrimiento, sedimentaran más rápidamente que las partículas finas.



ANEXOS

Se presenta el procedimiento que se sigue con el software *ArcMap* para calcular la erosión hídrica para la cuenca del río san Pedro.

- a) **Pre-proceso de la cuenca a modelar.**
- b) **Cálculo de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos**
 - b.i) **Factor LS**
 - b.ii) **Factor de erosionabilidad del suelo (K)**
 - b.iii) **Factor de usos de suelo y vegetación (C)**
 - b.iv) **Factor de erosividad de la lluvia, (R)**
- c) **Resultados**

Nota: Las figuras que se muestran en este apartado son capturas de pantalla que realice al elaborar la modelación.

a) Pre-proceso de la cuenca a modelar.

1. Disponer del Modelo Digital de Elevación (MDE) georreferenciado en el software. (Fig. 1). Puede ser descargado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>

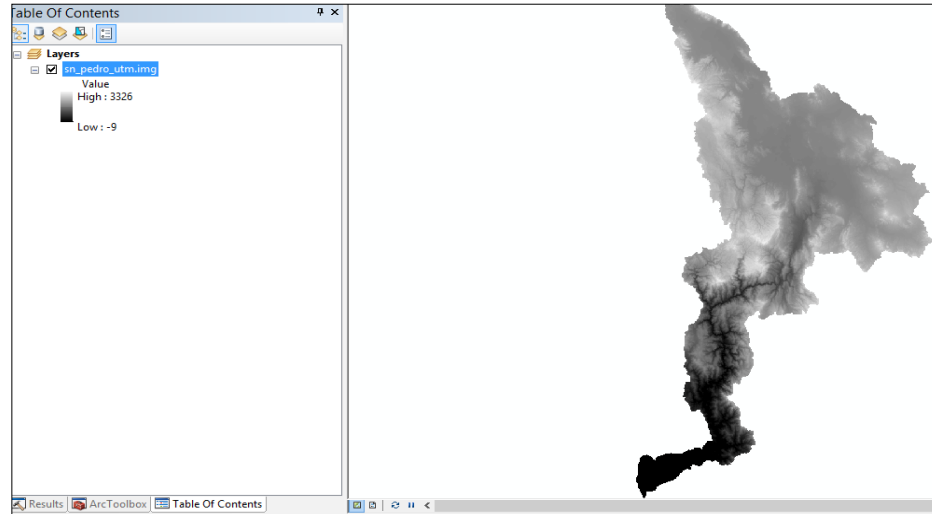


Fig. 1 Modelo Digital de Elevación.

La localización del menú *Spatial Analyst Tools* que se utilizará en este y otros procesos se muestra en la Fig. 2.

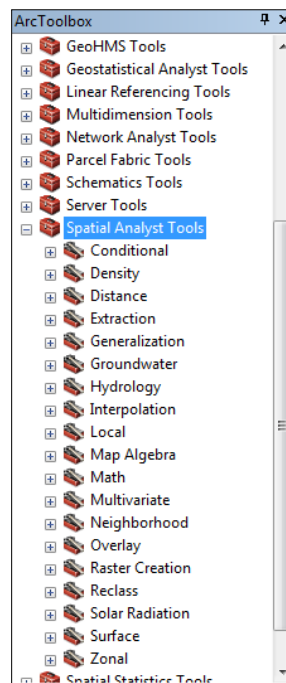


Fig. 2 Localización del menú *Spatial Analyst Tools*.

En el menú *Spatial Analyst Tools, Hydrology*, se selecciona el proceso *Fill*, se abre una ventana dónde se debe rellenar la información mostrada en la Fig. 3. La Fig. 3bis muestra el resultado de este proceso.

- *Input surface raster*: Se selecciona el DEM que se utilizara para su procesamiento, en este caso es “sn_pedro_utm.img”. *Output surface ráster*: Aquí se selecciona la ruta y el nombre del archivo de salida; se le colocará el nombre “fil”.
- *Z limit (optional)*: se deja en blanco.

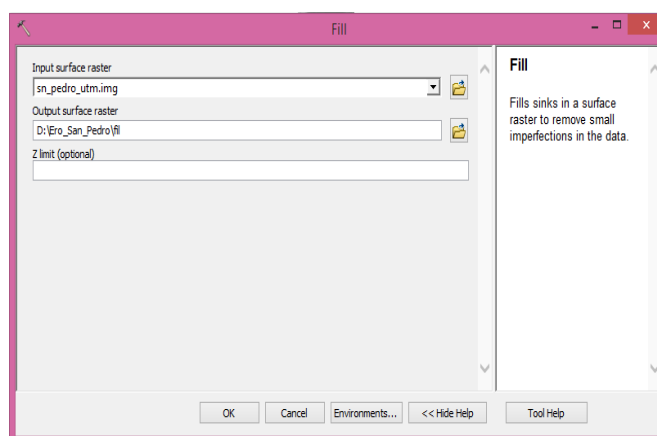


Fig. 3 Menú Fill.

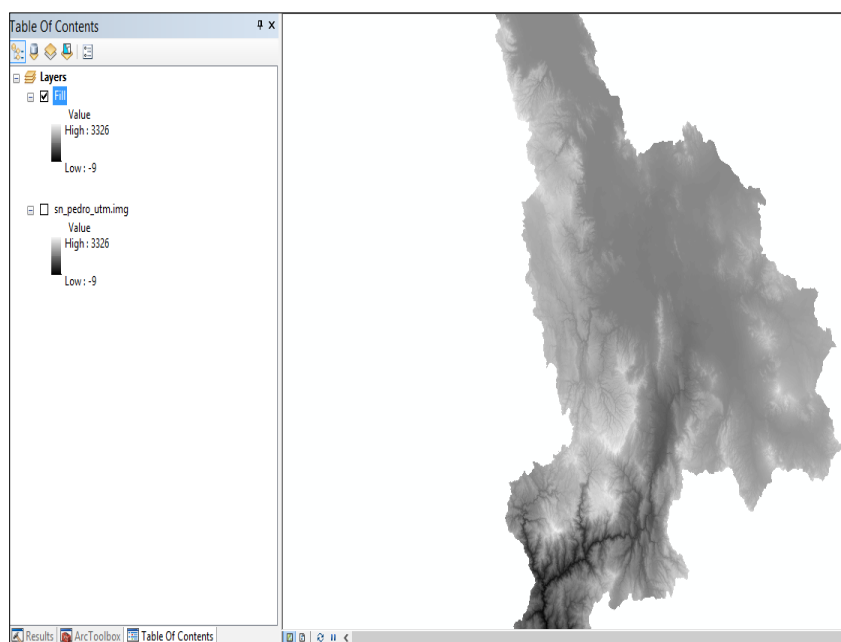


Fig. 3bis. Resultado del proceso (Fill).

En el menú *Spatial Analyst Tools, Surface*, se selecciona el proceso *Slope*, se abre una ventana dónde se debe rellenar la información de la Fig. 4. La Fig. 4bis muestra el resultado de este proceso.

- *Input ráster*: Se selecciona el archivo ráster creado en el paso anterior “fill”.
- *Output ráster*: aquí se selecciona la ruta y el nombre del archivo de salida; se le asigna el nombre de “slope”.
- *Output measurement (optional)*: se escoge grados como unidades de salida.
- *Z factor (optional)*: se deja valor por omisión.

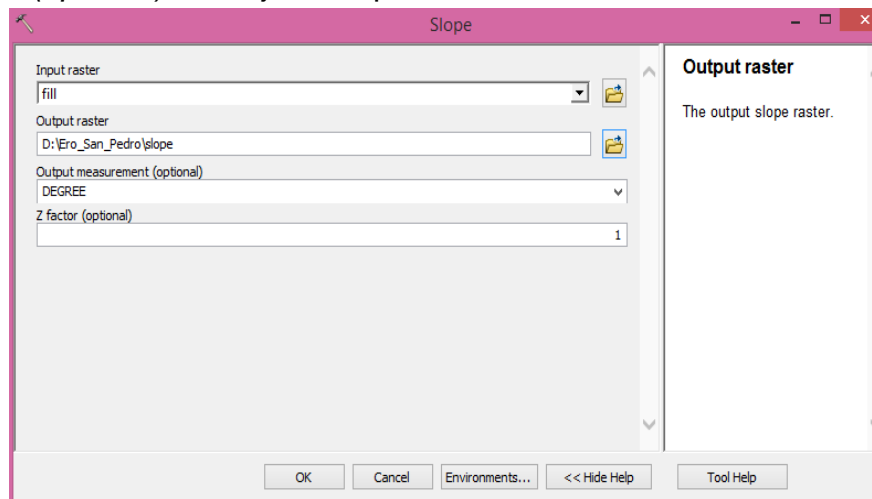


Fig. 4 Menú Slope.

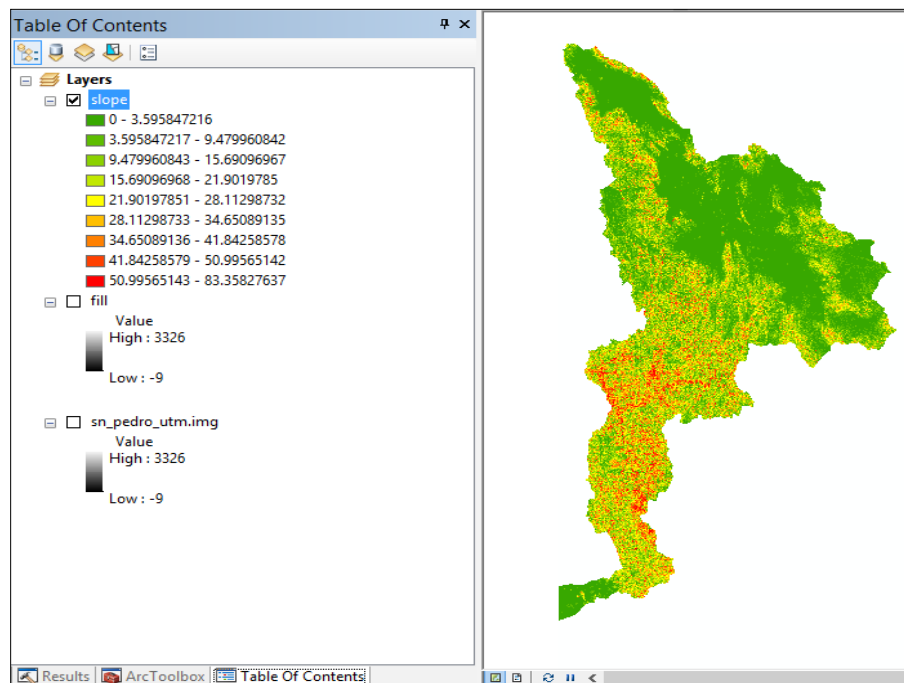


Fig. 4bis. Resultado del proceso (Slope).

b) Cálculo de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

b.i) Factor LS

Factor longitud de pendiente (L)

Para iniciar con el cálculo de los factores, se utiliza la herramienta *Map Algebra* (la localización de ésta se encuentra dentro del menú *Spatial Analyst Tools* como se muestra en la Fig. 5 y se obtiene L y S con las fórmulas del Cap. 2.2.3 “Factor longitud e inclinación de la pendiente LS”.

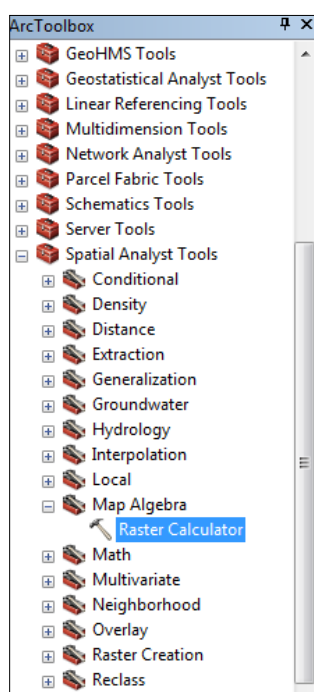


Fig. 5 Resultado del proceso (*Map Algebra*).

El factor L está en función de los parámetros λ , β y m , para su estimación se utiliza la herramienta *Map Algebra* y se introduce la fórmula de la ecuación correspondiente según el parámetro de interés. Para comenzar, introducir la ecuación V (Pág. 33) en la calculadora Fig. 6. Su resultado se muestra en la Fig. 6bis.

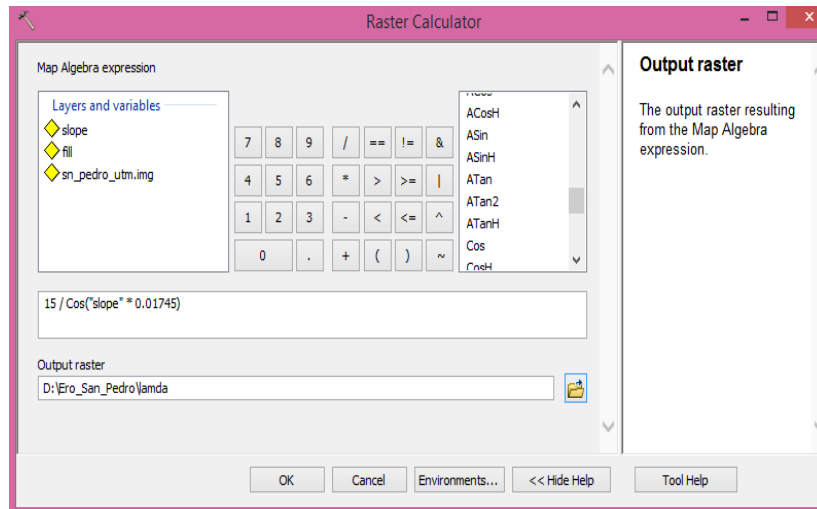


Fig. 6 Cálculo de lamda (Map Algebra).

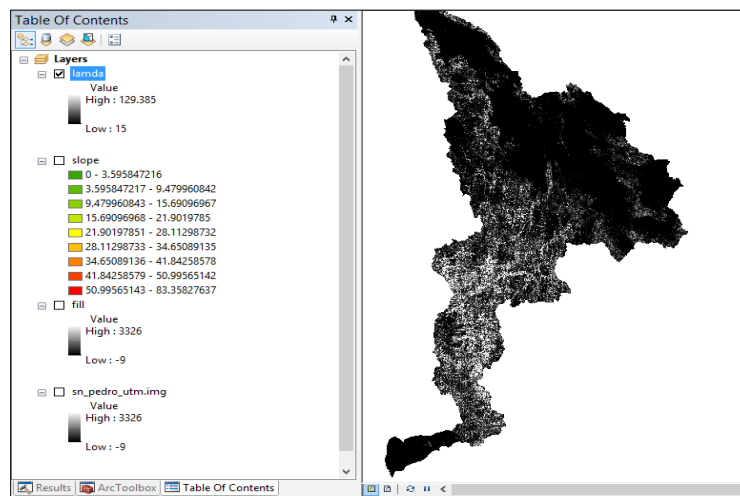


Fig. 6bis. Resultado del proceso (Lamda).

2. En el menú *Spatial Analyst Tools*, clic en *Map Algebra*, se introduce la ecuación IV (Pág. 33) para obtener el factor beta (Fig. 7). El resultado del proceso se observa en la Fig. 7bis.

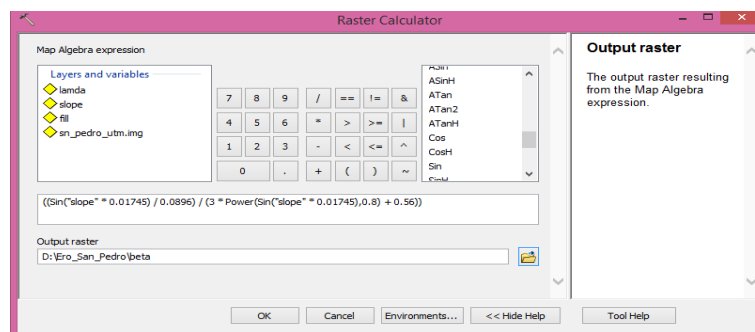


Fig. 7 Cálculo de beta (Map Algebra).

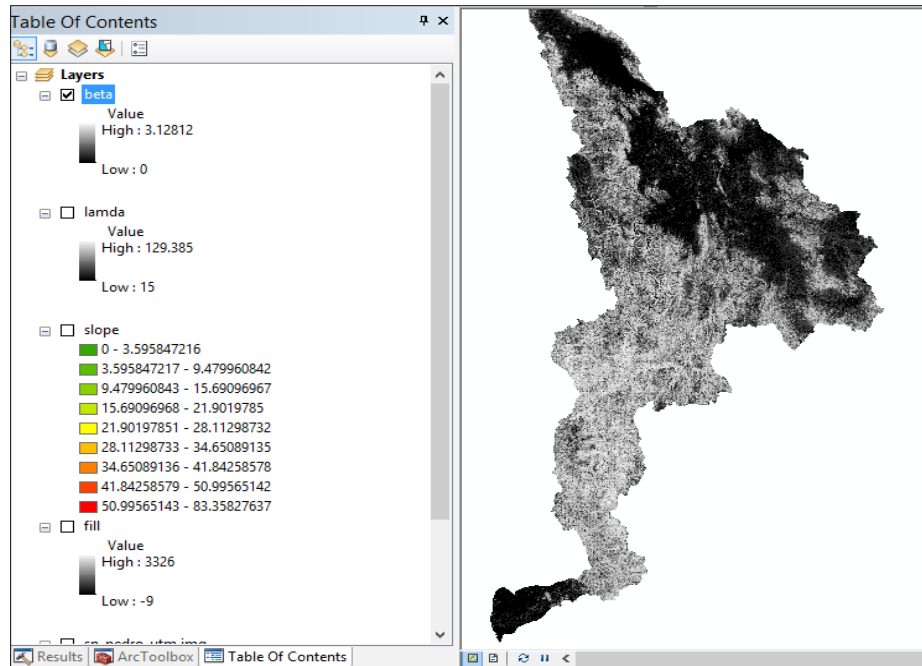


Fig. 7bis. Resultado del proceso (beta).

3. En el menú, *Spatial Analyst Tools*, clic en *Map Algebra*, se introduce la fórmula del exponente m , ecuación III (Pág. 33) ver Fig. 8. El resultado del proceso se observa en la Fig. 8bis.

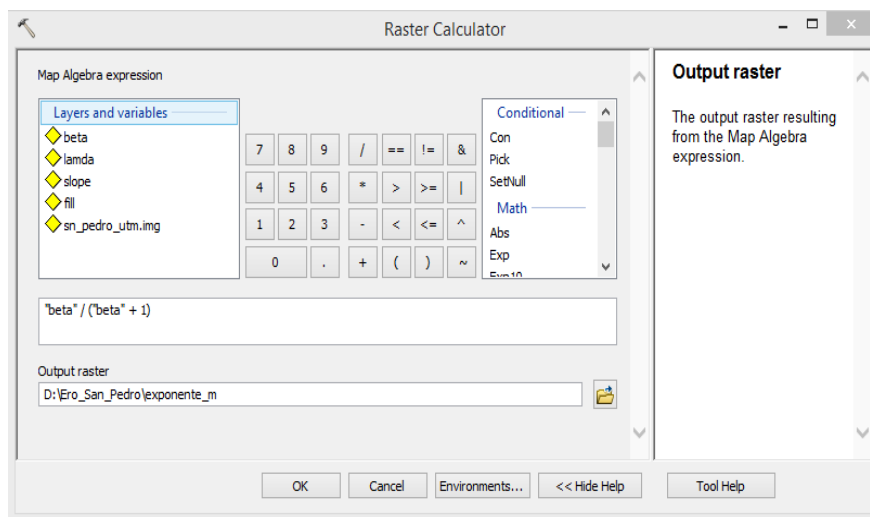


Fig. 8 Cálculo del exponente m (Map Algebra).

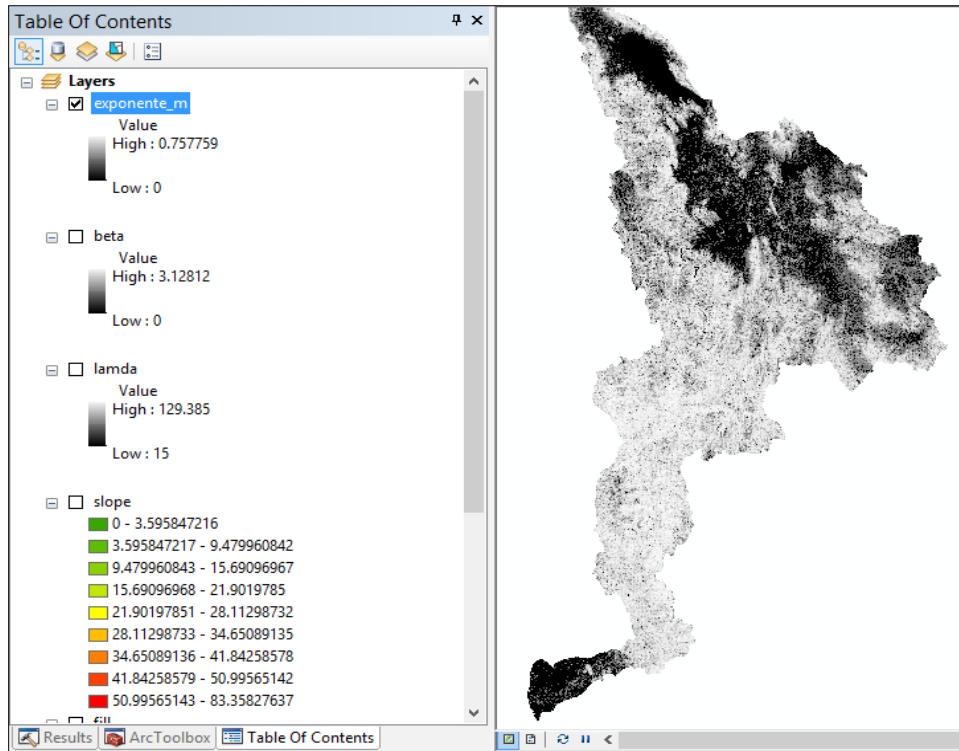


Fig. 8bis. Resultado del proceso (exponente m).

- En el menú, *Spatial Analys Tools*, clic en *Map Algebra*, se introduce la fórmula para obtener L, ecuación II (Pág. 32) ver Fig. 9. El resultado del proceso se observa en la Fig. 9bis.

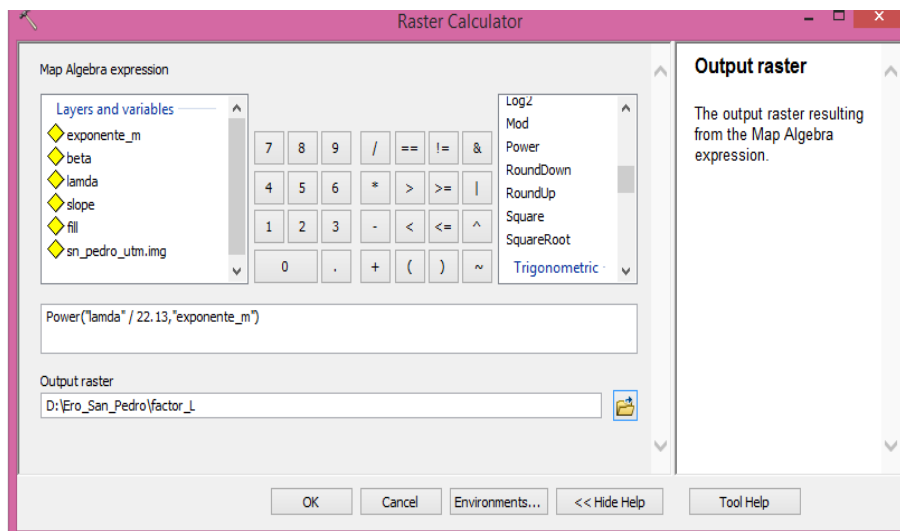


Fig. 9 Cálculo de L (Map Algebra).

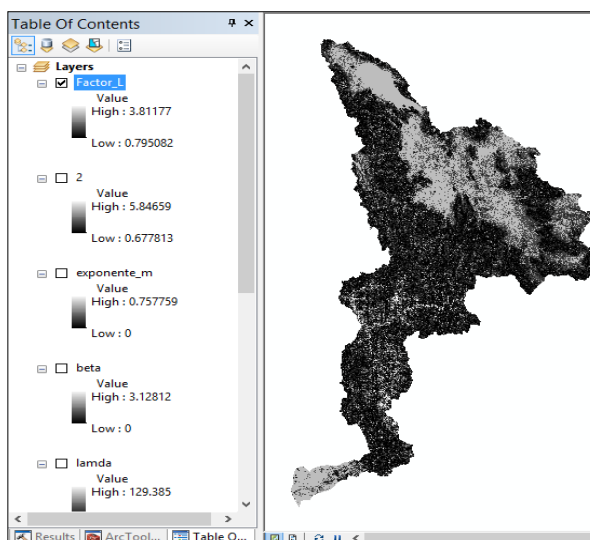


Fig. 9bis. Resultado del proceso (L).

Factor del grado de pendiente (S)

El ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que circula por el terreno. En los terrenos con poca inclinación, el agua tiene más posibilidad de infiltrarse que en las zonas inclinadas, en las que el escurrimiento circula más rápidamente hacia las zonas de menor cota. Este factor se determina a partir de la ecuación VI (Pág. 34).

5. En el menú *Spatial Analyst Tools*, clic en *Map Algebra*, se introduce la fórmulas del factor *S* con un condicional (*Con*, se encuentra en el apartado de *Conditional* en el recuadro de comandos), para obtener *S* (Fig. 10). El resultado del proceso se observa en la Fig. 10bis.

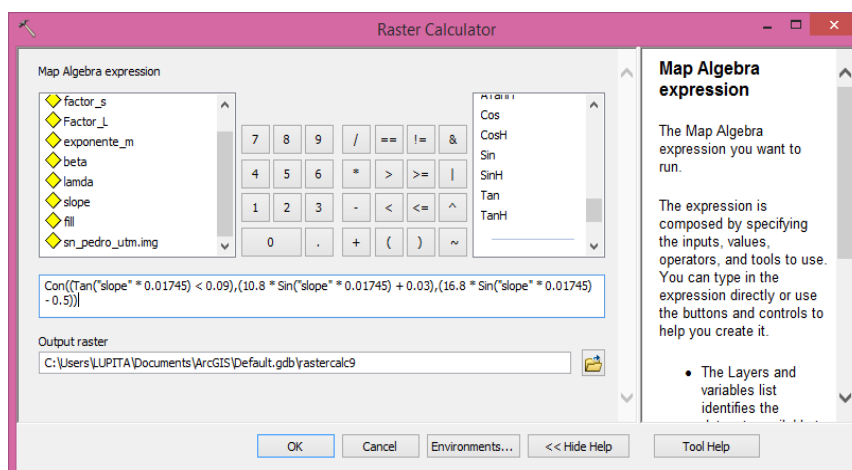


Fig. 10 Cálculo de S (Map Algebra).

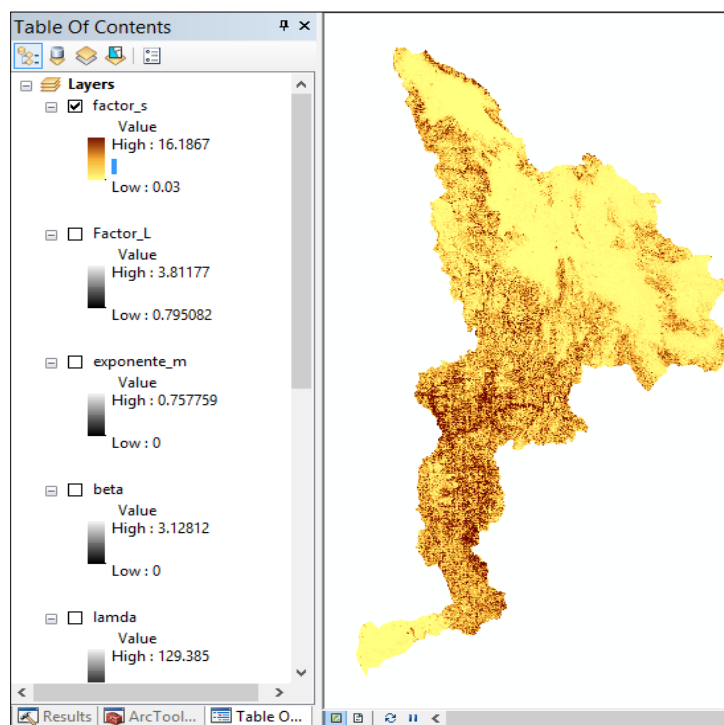


Fig. 10bis. Resultado del proceso (S).

b.ii) Factor de erosionabilidad del suelo (K)

Como ya se mencionó en el Cap. 2.3.2 “Factor de erosionabilidad del suelo” para calcular K de cada cuenca, se emplea el método de la Food and Agriculture Organization. Para ello se necesita la textura y unidad de suelo, los cuales pueden obtenerse de la carta Edafológica que publica el INEGI. Según las cartas del INEGI. La edafología de la zona la podemos ver en la Tabla 4.9 la cual indica que en la zona predomina Litosol, Regosol, Cambisol, Feozem, Xerosol, Vertisol, entre otros. Los valores a asignar están en la Tabla 2.4

6. Con la asignación de los valores de K correspondientes a la edafología de la zona, se obtiene el mapa de la Fig. 11:

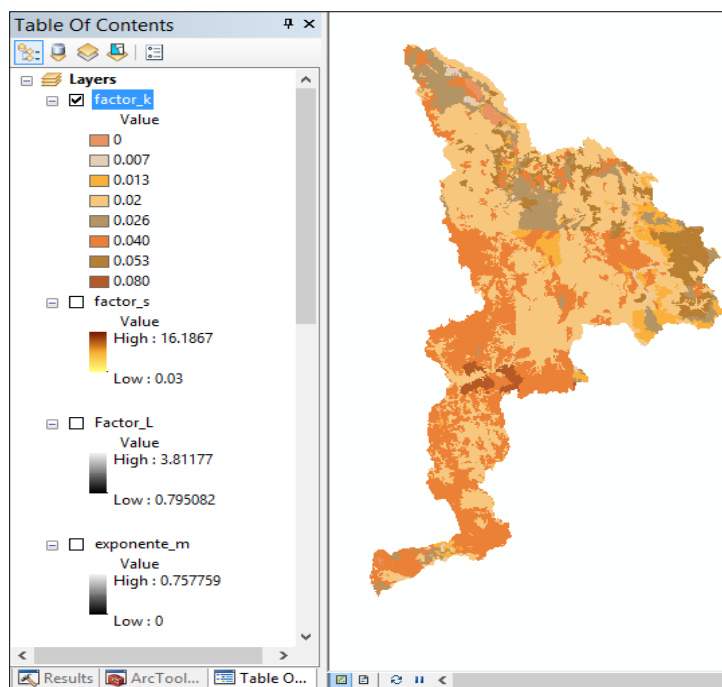


Fig. 11 Factor K.

b.iii) Factor de usos de suelo y vegetación (C)

Se utilizó las tablas elaboradas por Wischmeier y Smith (1978) para considerar valores anuales promedio de C , los cuales se asignan a la zona correspondiente de cada zona.

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad del escurrimiento superficial. La vegetación no se extiende únicamente de manera horizontal, pues las raíces además de tener influencia en la materia orgánica del suelo, incrementan la cohesión del mismo.

Tabla de valores factor C en la cuenca del río San Pedro.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Cuerpo de agua	0.0010
Vegetación inducida	0.0020
Agricultura de riego	0.0040
Selva caducifolia	0.0100
Matorral xerófilo	0.0120

Tabla de valores factor C en la cuenca del río San Pedro.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Bosque de pino-encino	0.0200
Pastizal inducido	0.0270
Bosque de pino	0.0400
Selva baja espinosa subperenifolia	0.04370
Selva subcaducifolia	0.0800
Palmar natural	0.1000
Bosque de mezquite	0.1800
Bosque de encino	0.1880
Selva perennifolia	0.1930
Bosque de coníferas	0.2000
Agricultura de temporal	0.2500
Selva subcaducifolia	0.2700
Pastizal natural	0.2725
Suelo desprotegido	1.0000

Al asignar los valores correspondientes de USV, se obtiene el siguiente mapa Fig. 12.

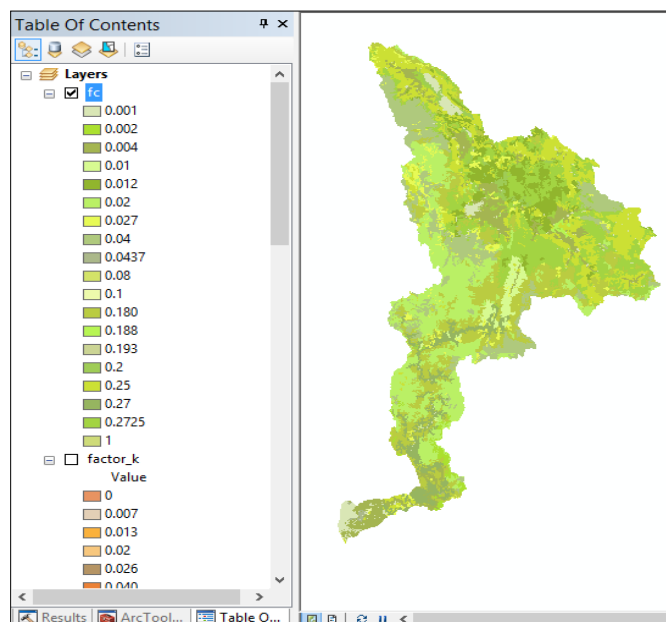


Fig. 12 Factor C.

b.iv) Factor de erosividad de la lluvia, (R)

7. Como ya se mencionó, este factor se obtuvo del trabajo de la SEMARNAT denominado “Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana” (Fig. 13).

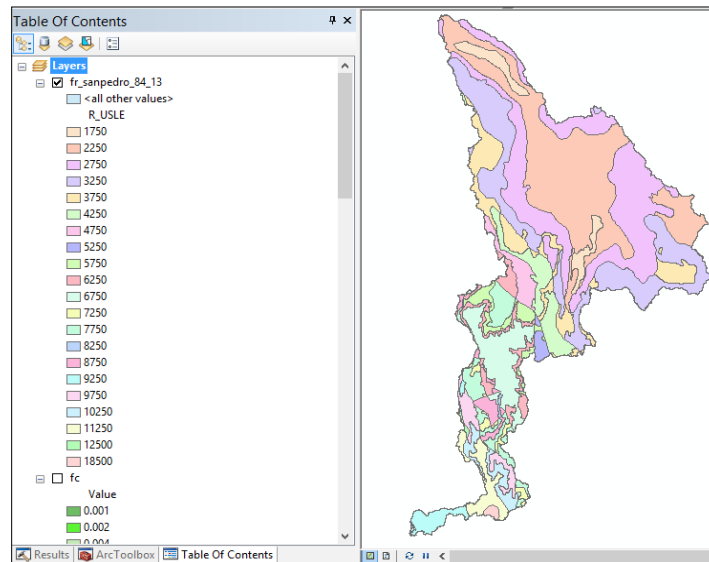


Fig. 13 Factor R .

b.v) Erosión hídrica (A)

8. Para calcular la erosión hídrica en la cuenca, es necesario utilizar la herramienta *Map Algebra* y emplear la ecuación (I) (Pág. 25) para multiplicar los ráster de cada uno de los factores, Fig. 14.

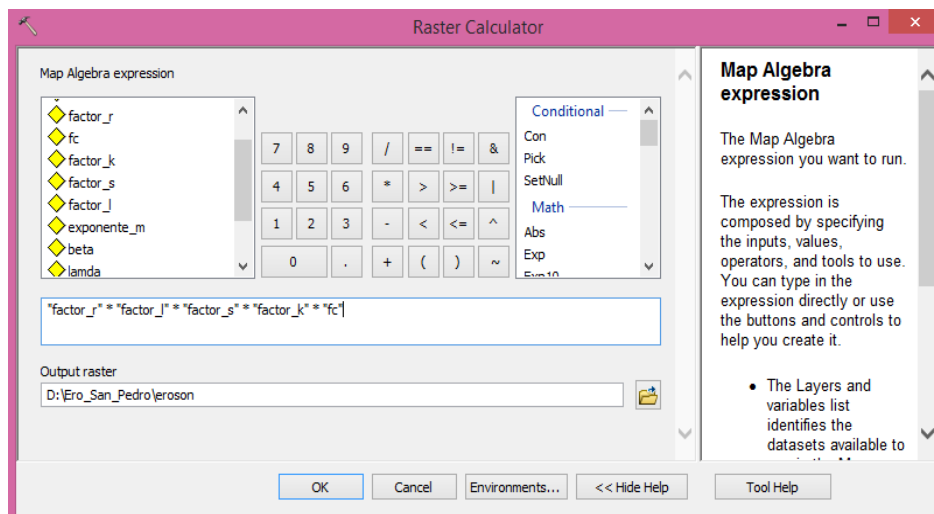


Fig. 14 Multiplicación de factores (*Map Algebra*).

Como resultado de este producto, se obtiene un modelo ráster que representa la erosión hídrica en la cuenca (Fig. 15).

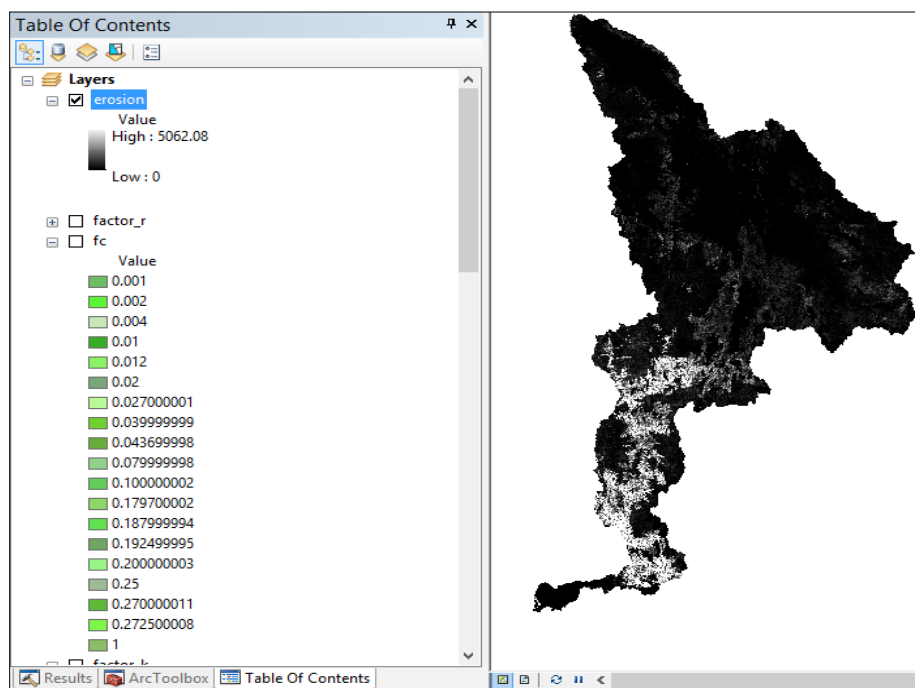


Fig. 15 Erosión hídrica en la cuenca.

c) Resultados

La FAO recomienda clasificar los grados de erosión de la cuenca de acuerdo a los siguientes rangos.

Tabla de rangos de erosión según la FAO.

Clase	Rango de erosión (ton/ha /año)
Nula	<2
Ligera	2-10
Moderada	10-50
Alta	50-200
Muy alta	>200

Para clasificar la erosión en ArcMap, se realizan los pasos siguientes:

9. Clic derecho sobre el *layer* de erosión → *Properties* → *Simbology* → Continuar a *Categories* → Seleccionar *Classify*, en *Method* seleccionamos *Manual*, y en el recuadro rojo escribimos los límites de los intervalos (Fig. 16).

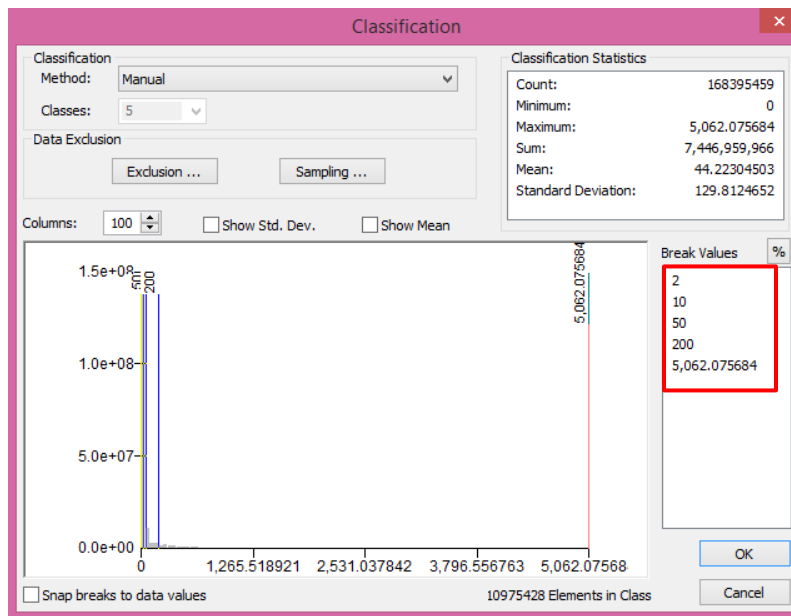


Fig. 16 Clasificar erosión en intervalos.

10. Después de aceptar, se cambian los valores que estén en el recuadro (Fig. 17), para que no aparezcan decimales.

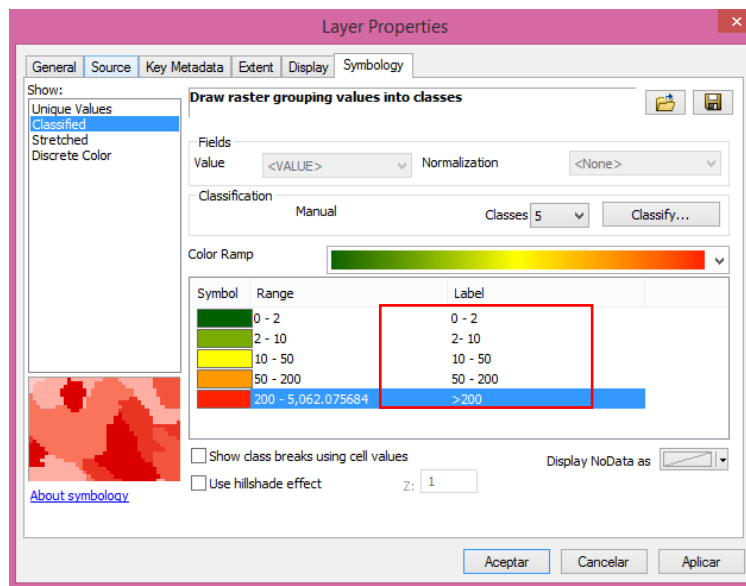


Fig. 17 Cambio de propiedades al layer.

11. Finalmente, al aceptar los valores se tiene como resultado el mapa de la Fig. 18.

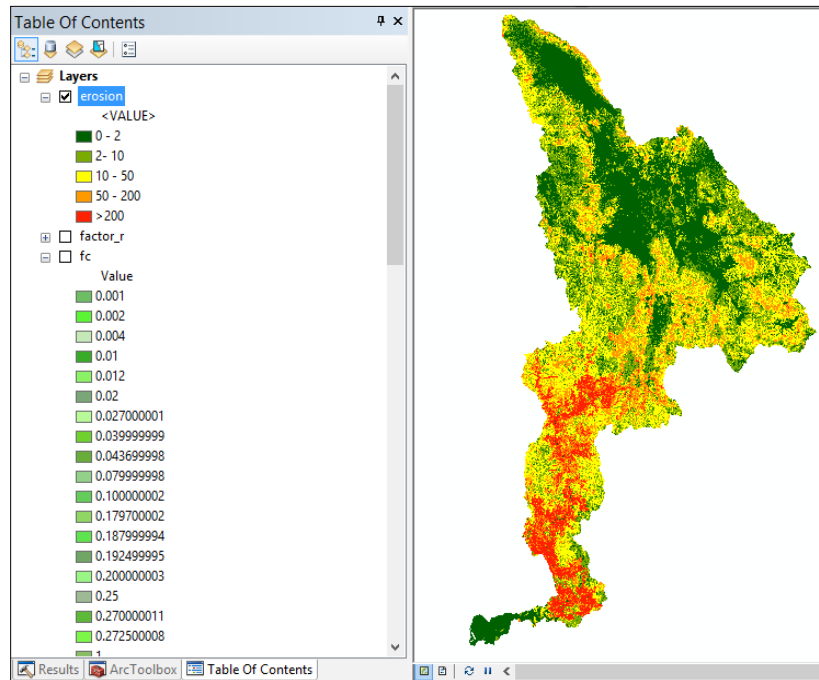


Fig. 18 Erosión hídrica en la cuenca San Pedro.

Posteriormente, para poder obtener los porcentajes de erosión en la cuenca se consideran los pasos siguientes:

- Hacer un reclassify del layer “erosion“, por medio de la siguiente ruta: *Spatial Analysis Tools* → *Reclass* → *Reclassify*. (Fig. 19).

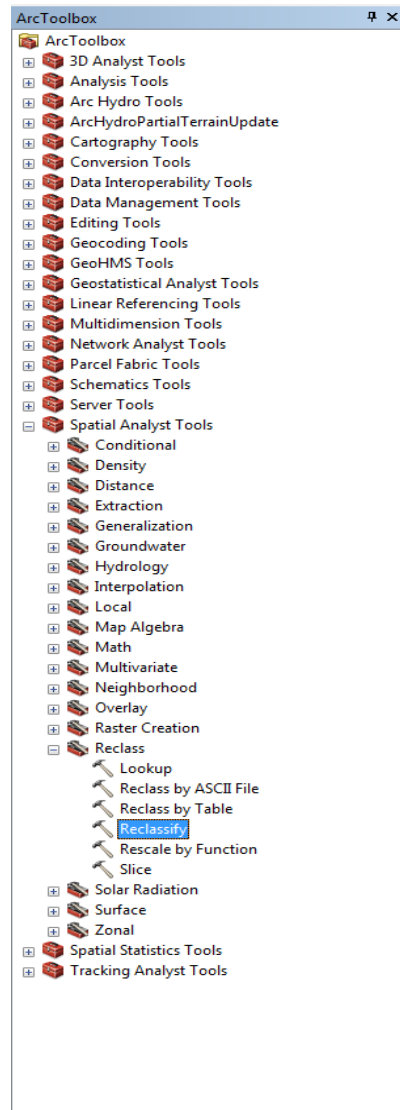


Fig. 19 Reclassify.

- Llenar el cuadro de diálogo como en la Fig. 20.
 - *Input raster*: seleccionar el láyer de “erosion” de la cuenca.
 - *Reclass field*: dejar opción por default, “value”.
 - *Reclassification*: dejar opciones por default.
 - *Output raster*: seleccionar la ruta y nombre de salida del archivo.

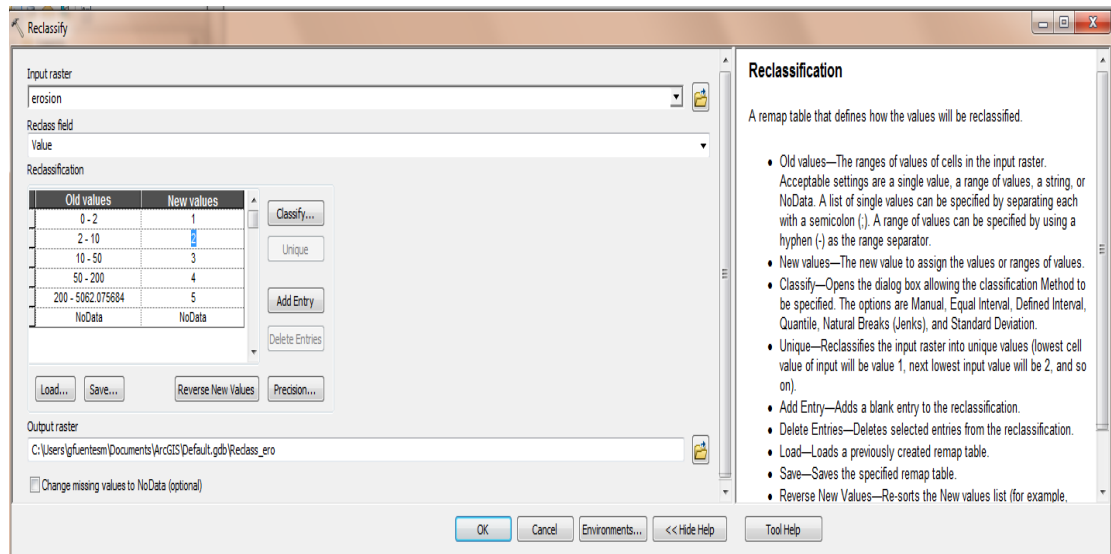


Fig. 20 Reclassify.

- Abrir la tabla de propiedades del nuevo *layer*, seguir la siguiente ruta *Simbology*→*Unique Values*. Tomar los datos de la columna “Count” (Fig. 21) y pasarlos a una hoja de cálculo para obtener los porcentajes.

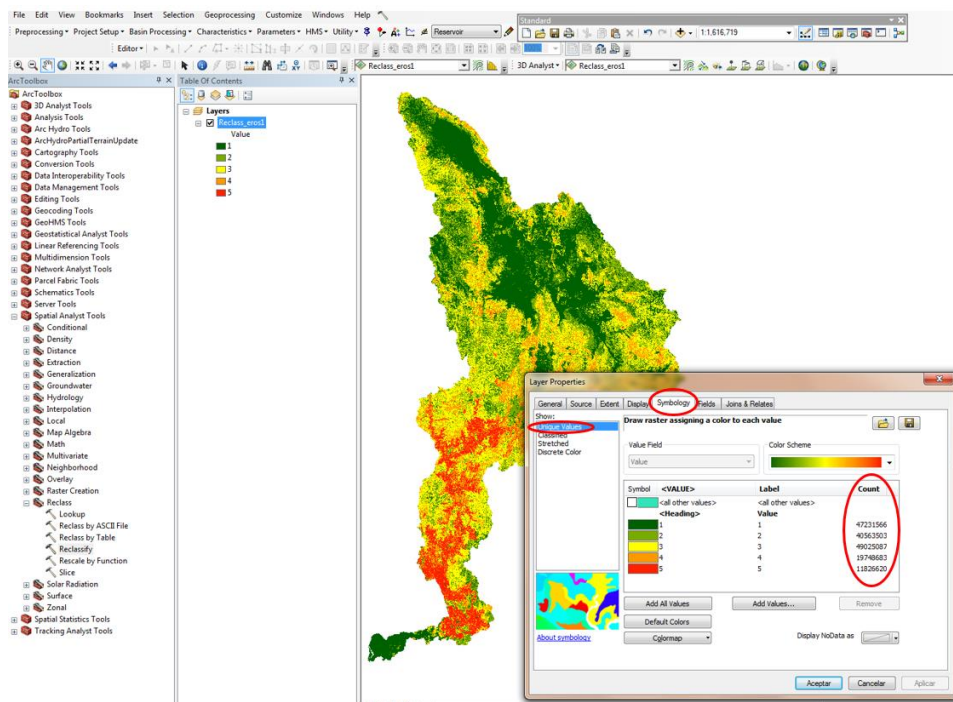


Fig. 21 Count.

Tabla de cálculo de porcentajes.

Value	Count	Porcentaje (%)
1	4844604	28.77
2	4168260	24.75
3	4894970	29.07
4	1844576	10.95
5	1086884	6.45
Total	16839294	100

Tabla de resultados de la pérdida de suelo por erosión hídrica.

Value	Denominación	Rango de erosión (ton/ha año)	Porcentaje (%)
1	Nula	0-2	28.77
2	Ligera	2-10	24.75
3	Moderada	10-50	29.07
4	Alta	50-200	10.95
5	Muy alta	>200	6.45

Tabla de valores del factor de cobertura vegetal, factor C. Fuente: SEMARNAT (s.f), Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana

Cobertura vegetal	Valor de C	Cobertura vegetal	Valor de C
Agua	0.001	Maíz riego buena	0.030
Alfalfa	0.010	Maíz riego temporal regular	0.475
Algodón	0.200	Maíz temporal regular	0.030
Apio	0.200	Manzano	0.001
Arroz	0.030	Manzano mala	0.030
Avena	0.030	Manzano regular	0.030
Avena	0.270	Matorral buena	0.003
Avena Canadiense	0.030	Matorral mala	0.012
Berenjena	0.030	Matorral regular	0.025
Brócoli	0.200	Melón	0.200
Cacahuete	0.200	Melón chino	0.030
Calabaza	0.030	Mesquite	0.001
Caña de azúcar	0.001	Nopal	0.030
Cebada	0.100	Papa	0.200
Cebolla	0.200	Papa dulce	0.050
Centeno	0.030	Pastizal regular	0.020
Chile	0.030	Pastos	0.003
Col	0.200	Peral	0.030
Coliflor	0.200	Pino buena	0.007
Coníferas buena	0.005	Pino regular	0.004
Coníferas mala	0.004	Reforestación eucalipto mala	0.035
Coníferas regular	0.002	Reforestación eucalipto regular	0.035
Ejote	0.200	Reforestación pino mala	0.035
Encino buena	0.001	Reforestación pino regular	0.035
Encino mala	0.006	Sandía	0.030
Encino regular	0.004	Sorgo de grano	0.200
Espárrago	0.200	Sorgo para forraje	0.005
Espinaca	0.200	Soya	0.200
Forraje de silo	0.200	Tabaco	0.200
Fresa	0.030	Tierras empantanadas	0.001
Frijol	0.200	Tomate	0.030
Girasol	0.200	Trébol dulce	0.003
Lechuga	0.010	Trébol rojo	0.003
Lenteja	0.200	Trigo buena	0.160
Lino	0.200	Trigo de invierno	0.005
Magüey	0.030	Trigo de primavera	0.030
Maíz de alta densidad	0.200	Trigo regular	0.270
Maíz dulce	0.200	Vivero forestal mala	0.013
		Zanahoria	0.200



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alatorre y Beguería (2009). *Los modelos de erosión: una revisión*. España. Instituto Pirenaico de Ecología.

Almorox A. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica*. España. Universidad de Murcia.

Aparicio J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México. Editorial LIMUSA

Beasley et al. 1980, Beasley y Huggins, 1991; Fisher et al. 1998. *ANSWERS: A Model for watershed planning*. ASAE.

Becerra A. (2005). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. México. Universidad Autónoma de Chapingo.

Bubbenzer G.D. & Jones B.A. (1971). *Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall*. Trans. of the ASAE.

Chisci y Morgan, 1988. *The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide*. Silsoe College, Cranfield University.

Cortés T. (1991). *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México, 1991.

Dendy y Bolton (1976). *Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United States*. *Journal of Soil and Water Conservation*. Disponible en: http://www.wou.edu/las/phyci/taylor/g473/refs/dendy_bolton_1976.pdf

Djorovic, M. and Gravidovic (1974). *Quantitative classification of torrent waterways*. Intitute for Forestry and Wood Industry.

Dissmeyer y Foster (1983). *Modifying the universal soil loss equation for forest land*. Soil Erosion and Conservation.

Gallart, 1992; García Ruiz, 1992; Rojo Serrano y Sánchez Fuster, 1997. *Red de estaciones experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y la desertificación, RESEL*. España. Ministerio de Medio Ambiente, 298 pp.

García E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen*. México. Instituto de Geografía-UNAM. Quinta edición.

García Ruiz y López Bermúdez (2009). *La erosión del suelo en España*. España. Sociedad Española de Geomorfología.

Gavrilovich (1988). *The use of empirical method (erosión potencial method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or terrential streams*. International Conference on River Regime.

Gisbert, J. (2012). *El factor K de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE)*. España. Universidad Politécnica de Valencia.

Hubp J. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. México. Instituto de Geografía UNAM.

Ibáñez L. (Sin fecha). *Sedimentos*. México. Universidad Autónoma de Chapingo. Disponible en: http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/SEDIMENTOS.pdf

Ibañez, S. (2012). *El factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)*. España. Universidad Politécnica de Valencia.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2004), *Guía para la Interpretación de Cartografía*. Edafología. México.

Janzen y Painter (1974). *Predicting sediment yield from climate and Topography*. Journal of Hidrology. Pg. 371-380.

Núñez J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. Costa Rica. EUNED.

Palau A. (2004). *Sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras*. Madrid. Dirección de Medio Ambiente y Calidad.

Renard et al.(1991). *RUSLE Revised Universal Soil loss equation*. Journal of Soil and Water Conservation.

Rivera et al. (2005). *La medición de sedimentos en México*. México. Ediciones IMTA-UJAT.

Sancho et al. (1991). *Evaluating soluble and insoluble ash, alkalinity of soluble and insoluble ash and total alkalinity of ash in honey using electrical conductivity measurements at 20 C*.

Sancho et al., 1991. *Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos*. Cuadernos Técnicos de la S.E.G.

Silva O. (1995). *Ecuaciones para EValuar, estimar y predecir la erosión hídrica*. Venezuela. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

SEMARNAT (Sin Fecha), *Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000*. México.

Torres E. (1984). *Manual de conservación de suelos agrícolas*. México. Ed. DIANA.

Williams J. R. (1989). *The EPIC Crop Growth Model*. Trans. ASAE.

Williams, J. R., and H. D. Berndt. 1977. *Sediment yield prediction based on watershed hydrology*. Transaction of ASAE.

Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537*. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. Disponible en: <http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) <http://www.fao.org/home/es/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía.(INEGI) <http://www.inegi.org.mx/>

Guía para la interpretación de cartografía Edafológica, INEGI www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf