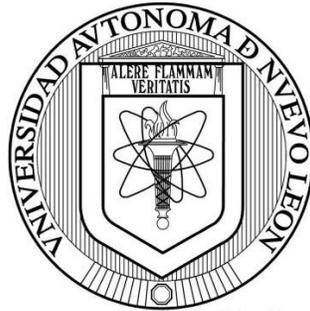


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EFECTO DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO
SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA EN UNA LOCALIDAD DE
LINARES, NUEVO LEÓN”**

POR:

BIOL. CAROLINA GUADALUPE HERNÁNDEZ GARCÍA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS FORESTALES

FEBRERO 2023

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EFECTO DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO
SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA EN UNA LOCALIDAD DE
LINARES, NUEVO LEÓN”**

POR:

BIOL. CAROLINA GUADALUPE HERNÁNDEZ GARCÍA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS FORESTALES

FEBRERO 2023

EFFECTO DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO SOBRE LA
EROSIÓN HÍDRICA EN UNA LOCALIDAD DE LINARES, NUEVO
LEÓN

APROBACIÓN DE TESIS



DRA. MARISELA PANDO MORENO



DRA. MARÍA INÉS YÁÑEZ DÍAZ



DR. LUIS GERARDO CUÉLLAR RODRÍGUEZ



DRA. MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Declaro que la presente investigación es original y se desarrolló para obtener el grado de Maestría en Ciencias Forestales; donde se utiliza información de otros autores, se otorgan los créditos correspondientes.



BIOL. CAROLINA GUADALUPE HERNÁNDEZ GARCÍA

Febrero del 2023

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CVU: 1077436) por el otorgamiento de la beca nacional para que me fuera posible seguir preparándome académicamente.

A la Facultad de Ciencias Forestales (UANL) por ser "mi casa" durante estos años y fungir como el eje de los conocimientos y experiencias adquiridas durante la realización de esta maestría.

A la Dra. Marisela Pando-Moreno, por dirigirme durante todo este camino, siempre de la manera más amable y paciente, por su total apoyo y comprensión tanto en cuestiones académicas como personales, demostrando que además de ser una excelente profesional; siempre disponible para compartir su sabiduría, nos brinda la calidez de su amistad y sus sabios consejos. Sin duda alguna, un gran ejemplo a seguir. Gracias por las salidas a campo, por apoyarme e impulsarme a mejorar, por el acompañamiento y disponibilidad para cada duda, por todo, ¡muchas gracias!

A la Dra. Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Dra. Inés Yáñez Díaz y el Dr. Gerardo Cuellar Rodríguez, por aceptar ser miembros de mi comité, por sus acertados comentarios y sugerencias para aumentar continuamente la calidad de esta tesis.

A los técnicos de campo Carlos Cortés, el señor Alfredo, Juan Ángel Reyna, y demás que siempre estuvieron al pie del cañón y fueron en repetidas ocasiones mis compañeros de campo. ¡Gran parte de este trabajo es también gracias a ustedes!

Al M.R.E. Ángel Mario Reyna, por el apoyo y la colaboración durante la elaboración de esta tesis, por la facilitación de los datos, las salidas a campo, la elaboración de mapas y por no dudar en compartir su conocimiento.

A los docentes de la FCF con quienes tuve oportunidad de tomar clases, sin lugar a duda, de cada uno siempre hubo algo nuevo que aprender. Pero sobre todo, a aquellos que por su dedicación e incluso su amistad dejaron huella en nosotros sus alumnos, destacando al Dr. Eduardo Estrada por siempre ayudarme cuando “se me atoraba la carreta” en estadística, por su amistad, compartir su alegría y sus consejos. También a la Dra. Laura Scott por su apoyo en cuestiones académicas y por sus consejos.

Al Dr. Jordi Cortina-Segarra de la Universidad de Alicante, España, por sus observaciones y sugerencias tanto en la presente investigación como en el ámbito profesional. Asimismo, le agradezco grandemente por el cálido recibimiento en la Universidad y permitirme aprender de su amplia experiencia en restauración ecológica. Del mismo modo, agradezco a la Dra. Susana Bautista por el tiempo dedicado en campo y compartirme parte de su trabajo. De manera general, agradezco al resto del cuerpo académico y administrativo de la universidad por la disposición y las atenciones prestadas.

A mis compañeros de posgrado y mis amigos por el apoyo, los aprendizajes, por las carcajadas y todas las vivencias juntos.

A todas aquellas personas que, en el camino, de manera directa o indirecta dejaron una enseñanza en mí.

DEDICATORIA

A mi madre, quien no duda ni un segundo en mostrarme su incondicional e infinito apoyo y mi padre junto con ella.

Mis hermanos y sobrinos

... son mi eterna adoración!

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS	I
INDICE DE ANEXOS	I
RESUMEN	I
ABSTRACT	III
INTRODUCCION	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
ANTECEDENTES	4
ÁREA DE ESTUDIO	11
METODOLOGÍA	12
Método directo	13
Método indirecto	14
Análisis de los datos	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
Estimación Mediante el Método Directo en Áreas con Obras de Conservación de Suelo	20
Estimación mediante el método indirecto	22
Comparación de los métodos directo e indirecto	24
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
REFERENCIAS	28

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN Y ESTRATIFICACIÓN DE SUBÁREAS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL SUELO.....	13
FIGURA 2. PORCENTAJE DE COBERTURA VEGETAL PRESENTE EN LOS DIFERENTES ESTRATOS.	24

INDICE DE CUADROS

CUADRO 1. PÉRDIDA Y DEPOSICIÓN DE SUELO EN LAS SUBÁREAS.....	20
CUADRO 2. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS GRADOS DE INTENSIDAD DE LA EROSIÓN	22
CUADRO 3. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA EROSIÓN ANUAL.....	22
CUADRO 4. RESULTADOS DE EROSIÓN APLICANDO LOS TRES DIFERENTES MÉTODOS PARA ESTIMAR EL FACTOR R.....	23

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. CLAVES PARA LA DESIGNACIÓN DE CLASES TEXTURALES EN LA EVALUACIÓN DE SUELOS EN EL CAMPO.	34
ANEXO 2. NOMOGRAMA PARA DEFINIR EL PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA (RENGER ET AL., 1987)	35
ANEXO 3. NOMOGRAMA PARA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	36
ANEXO 4. NOMOGRAMA PARA DETERMINAR LA ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K) (WISCHMEIER ET AL., 1971).....	36
ANEXO 5. MAPA DE CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES (REALIZACIÓN: REYNA, A. M.)	37
ANEXO 6. CUADRO DE VALORES PARA CALCULAR FACTOR DE COBERTURA “C” (U. S SOIL CONSERVATION SERVICE TOMADO DE KENNETH ET AL., 1993).	37

RESUMEN

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es un aspecto clave para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelo más adecuados; por ello, es importante realizar evaluaciones cuantitativas acerca del proceso. En este estudio, se evaluó el efecto que tienen las obras de conservación de suelo sobre la erosión hídrica en el poblado Las Barretas, en el municipio de Linares, Nuevo León y se analizó el uso de la ecuación RUSLE. Las hipótesis planteadas fueron: i) Las obras de conservación de suelo contribuyen a la disminución de la erosión hídrica, ii) Los valores de erosión en el área serán mayores en los suelos someros que en los suelos profundos, iii) La ecuación RUSLE permite evaluar, con un rango aceptable de precisión, la erosión hídrica del área de estudio y iv) La forma en que se determina el factor R da origen a valores de erosión diferentes hasta en un orden de magnitud de 10. Se estimó la erosión hídrica para dos condiciones de suelo diferentes, con tres repeticiones en cada una dentro de un área restaurada y fuera de ésta mediante la aplicación del método indirecto RUSLE. Previo a ello y a fin de asegurar la precisión de la estimación con dicho método, se evaluó la erosión con el método directo utilizando la técnica de clavos y rondanas. El resultado de este último método permitió comparar los resultados de la ecuación y ajustar los valores obtenidos a partir de la ecuación. Además, se estimó la erosión comparando tres métodos diferentes de cálculo del factor R en la ecuación RUSLE. Como resultados se obtuvo que, para la superficie evaluada, la erosión de suelo anual fue de 97 ton ha^{-1} y una deposición de 77.2 ton ha^{-1} . Sin embargo, la erosión neta fue de 20 ton ha^{-1} . No hubo diferencias entre las subáreas evaluadas. Al resolver la ecuación de RUSLE se obtuvieron tres diferentes resultados por el uso de tres distintos métodos para calcular el factor R, los cuales subestimaron en gran medida los valores reales de erosión del área de estudio. La erosión estimada con RUSLE fue más baja en la zona con obras de conservación de suelo que en el área testigo. La erosión estimada utilizando tres diferentes formas de calcular el factor R varió desde 0.23 hasta 2.00 ton ha^{-1} para el área con obras de conservación de suelo y desde 0.98 hasta 8.56 ton ha^{-1} para el área testigo. Los valores de erosión obtenidos con la variante de la energía cinética de la lluvia (EI_{30}) fueron 8.7 veces superiores a los obtenidos con la variante del índice de Fournier y 9.8 (erosión neta) y casi 50 (erosión anual) veces menores

a los obtenidos por el método directo. A pesar de esta gran diferencia en los valores, la pérdida de suelo real podría estimarse mediante la aplicación de RUSLE, con un rango de precisión aceptable, si existe una correlación significativa entre estos. Este último aspecto no ha sido analizado en este trabajo. Se concluye que las obras de conservación del suelo manifiestan tener una influencia en la disminución de la pérdida de suelo, sin embargo, se recomienda importante consideración de la topografía de los sitios en donde se desee implementar zanjas trinchera.

ABSTRACT

Knowledge of the erosion rate at a site is a key aspect for deciding the most appropriate management and soil conservation measures; therefore, it is important to carry out quantitative evaluations of the process. In this study, the effect of soil conservation works on water erosion in the ejido of Las Barretas, in the municipality of Linares, Nuevo León, was evaluated and the use of the RUSLE equation was analyzed. The hypotheses proposed were: i) Soil conservation works contribute to the reduction of water erosion, ii) Erosion values in the area will be higher in shallow soils than in deep soils, iii) The RUSLE equation allows evaluating, with an acceptable range of precision, the water erosion of the study area, and iv) The way in which the R factor is determined gives rise to erosion values that differ by up to an order of magnitude of 10. Water erosion was estimated for two different soil conditions, with three replicates in each within a restored area and outside it by applying the indirect RUSLE method. Prior to this, and in order to ensure the accuracy of the estimation with this method, erosion was evaluated with the direct method using the nails and washers technique. The result of the latter method allowed comparing the results of the equation and adjusting the values obtained from the equation. In addition, erosion was estimated by comparing three different methods of calculating the R factor in the RUSLE equation. The results showed that, for the area evaluated, annual soil erosion was 97 ton ha⁻¹ and deposition was 77.2 ton ha⁻¹. However, the net erosion was 20 ton ha⁻¹. There were no differences between the subareas evaluated. When solving the RUSLE equation, three different results were obtained by using three different methods to calculate the R factor, which greatly underestimated the real erosion values of the study area. Erosion estimated with RUSLE was lower in the area with soil conservation works than in the control area. Erosion estimated using three different ways of calculating the R factor ranged from 0.23 to 2.00 ton ha⁻¹ for the area with soil conservation works and from 0.98 to 8.56 ton ha⁻¹ for the control area. The erosion values obtained with the rainfall kinetic energy variant (EI30) were 8.7 times higher than those obtained with the Fournier index variant and 9.8 (net erosion) and almost 50 (annual erosion) times lower than those obtained by the direct method. Despite this significant difference in values, the real soil loss could be estimated by the application of RUSLE, with an acceptable range of precision, if there is a significant correlation between them. This last aspect has not

been analyzed in this work. It is concluded that soil conservation works have an influence on the reduction of soil loss; however, it is recommended that important consideration be given to the topography of the sites where trench ditches are to be implemented.

INTRODUCCIÓN

Desde años atrás se tiene conciencia sobre la gravedad del aumento demográfico y de la cadena de consecuencias negativas que éste genera. Una de estas consecuencias es el desequilibrio que existe entre la creciente demanda poblacional de recursos y los altos niveles decrecientes de los mismos (Hudson, 2006). La alimentación y la economía en América Latina está basada principalmente en la agricultura y con el crecimiento exponencial de la población, surge la necesidad de más tierras de cultivo y más pastizales para el ganado (Benites, 2004), provocando con ello la fragmentación de los ecosistemas y una fuerte degradación de los suelos, originada por la pérdida de calidad y una acelerada erosión de estos (Hellin, 2004).

La erosión del suelo siempre ha existido, se considera un proceso natural ya que la superficie terrestre está cambiando lenta y continuamente. El verdadero problema radica cuando la acción del hombre acelera este proceso, por medio de las acciones antes mencionadas, entre algunas otras. El agua, es probablemente el agente erosivo más importante, ya que las intensas precipitaciones al impactar sobre un suelo desprovisto de cobertura vegetal, poco resistente (Hudson, 2006) y con bajo contenido de materia orgánica, coadyuvan en este proceso (Pizarro *et al.*, 2010).

En todo el mundo, las pérdidas de suelo por erosión son altas; se estima que se han perdido hasta 75 mil millones de toneladas de suelo por año en el mundo (Lal *et al.*, 1988) y, para México, la SEMARNAT calculó en el año 2000, se perdieron alrededor de 535 millones de toneladas (SEMARNAT-COLPOS, 2002). Esta pérdida de un recurso natural no renovable, aunado a las pérdidas económicas que esto conlleva, lo convierte en un problema prioritario en las agendas internacionales de muchos países.

Esta situación ha llevado al diseño e implementación de obras para la conservación de suelo, tales como barreras vivas, cercos de piedra, zanjas de infiltración, terrazas, taludes de contención (Hellin, 2004), entre otros, las cuales comúnmente se emplean con la finalidad de proteger el suelo del impacto de la lluvia, aumentar la infiltración del agua en el suelo y con

ello disminuir la escorrentía y mejorar la estabilidad de los agregados (Palma-López y Shirma, 2011).

En México, estas actividades han sido establecidas comúnmente por medio de programas de política pública, los cuales son evaluados externamente en el aspecto de su funcionamiento y del uso correcto de los subsidios destinados para la práctica. Sin embargo, el impacto que estas obras generan post establecidas, con relación al efecto que producen sobre la recuperación de la calidad del suelo, ha sido escasamente evaluado (Cotler *et al.*, 2013, por lo que se desconoce en qué medida contribuyen estas obras a contrarrestar la pérdida de suelo. Si no es comprobable una mejoría, o si se determina un nivel más alto de degradación, se consideraría un indicador de que las obras de conservación no fueron eficaces (Cotler *et al.*, 2013).

Es por esto que estudios como la presente investigación, donde se evalúan los efectos que dichas prácticas provocan en el suelo, toman relevancia. Estos estudios permiten definir si las prácticas realizadas son adecuadas y contribuyen a la conservación de ese recurso natural tan importante llamado suelo. A partir de esos resultados, podrá definirse la pertinencia de aplicar prácticas semejantes en otras áreas afines.

Entre los métodos más comunes para estimar la erosión del suelo están: el método de clavos o varillas de erosión, las parcelas de escurrimiento, transecto de cárcavas y pozos de sedimentación como métodos directos y principalmente la ecuación RUSLE como método indirecto.

La ecuación RUSLE, es una metodología ampliamente utilizada para la estimación indirecta de la erosión hídrica. Sin embargo, su eficacia ha sido pocas veces cuestionada, específicamente en la forma de estimar los valores del factor R y P, por lo que es necesario que su aplicación se realice “con precaución”, además de requerir “algún tipo de validación o comprobación” en las condiciones del sitio en donde se emplean (Bodoque *et al.*, 2001).

HIPÓTESIS

- Las obras de conservación de suelo realizadas en la localidad Las Barretas, en el municipio de Linares, Nuevo León contribuyen a la disminución de la erosión hídrica del sitio y estos efectos son cuantificables a 4 años de realizadas las obras.
- Los valores de erosión en el área serán mayores en los suelos someros que en los suelos profundos.
- La ecuación RUSLE permite evaluar, con un rango aceptable de precisión, la erosión hídrica del área de estudio.
- La forma en que se determina el factor R da origen a valores de erosión diferentes hasta en un orden de magnitud de 10.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar el efecto que tienen las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en el poblado Las Barretas, en el municipio de Linares, Nuevo León.

Objetivos específicos

- Comparar los valores de erosión en áreas donde se realizaron obras de conservación de suelo y en áreas testigo.
- Comparar los valores de erosión en suelos profundos y suelos someros del área de estudio.
- Estimar la erosión con el método RUSLE comparando tres métodos de estimación del factor R.
- Estimar la precisión del método indirecto RUSLE en la cuantificación de la erosión hídrica para el área de estudio.

ANTECEDENTES

Al realizar una revisión integral y la aplicación de un metaanálisis de 1589 parcelas muestra en 22 países con la finalidad de comparar los efectos de técnicas de conservación de suelos (SCT) sobre la erosión hídrica, Xiong *et al.* (2018), encuentran que éstas mostraron efectos positivos significativos en el control de la erosión. Las técnicas de conservación consideradas se dividieron en tres grupos: técnicas biológicas (BT) como forestaciones; técnicas de gestión del suelo (ST) como la labranza; y técnicas de ingeniería (ET) como terrazas y zanjas bordo. Las BT y ET se mostraron más efectivos en la conservación de suelo que las ST. En cuanto a la reducción de escorrentía, los más eficientes fueron las BT y ST que las ET. En términos de pendiente, la eficacia de las SCT fue más alta en pendientes de 25° a 40° y 5° a 10° en tierras de cultivo y 20° a 25° en huertos.

En laderas semiáridas de la Sierra Peruana, Vásquez y Tapia (2011), evaluaron el efecto de zanjas de infiltración mediante la cuantificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica. Sus resultados demostraron erosión con valores entre 17.9 y 39.5 ton ha⁻¹ año⁻¹, mientras que para áreas testigo observaron tasas de erosión entre 31 y 73 ton ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica que dicha práctica para el control de la erosión y la infiltración de agua en laderas es efectiva, ya que reduce la erosión hídrica en un 80%.

Sin embargo, en otro estudio llevado a cabo por Cotler *et al.* (2015), evalúan el impacto de las zanjas trincheras en 28 sitios dispuestos en los estados de Baja California sur, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz (México), obteniendo como resultado la identificación de importantes impactos negativos sobre la calidad de los suelos debido a la implementación de estas obras. Se resalta la gran exposición de suelo (60– 123 ton ha⁻¹) y la exposición de 0.4 – 6.3 ton ha⁻¹ de carbono orgánico, además de evidenciar que no existe mejoría en cuanto a la retención de humedad.

Numerosos investigadores han trabajado en la determinación de los índices de erosión, a diferentes escalas y utilizando diferentes métodos, tanto directos como indirectos.

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Pando *et al.* (2002), realizan una estimación de pérdida de suelo superficial mediante clavos y rondanas en un área con pendientes predominantemente (54% del área) suaves. La pérdida promedio de suelo para toda el área evaluada fue de 38.6 ton ha⁻¹ anual, la cual la relacionan fuertemente a la combinación del impacto antropogénico con un tipo de suelo poco estructurado, esto, con base en lo evidenciado en una unidad geomorfológica específica del área, donde las pendientes son suaves (2-5°), hay escasa cobertura vegetal y sobrepastoreo, en donde se dieron los valores de pérdida de suelo más altos (99.8 Ton ha⁻¹ año⁻¹).

Mientras que, para áreas del estado de Veracruz, México, Pereyra *et al.* (2005) reportan pérdidas de suelo de hasta 224 Ton ha⁻¹ año⁻¹).

En un clima semiárido con presencia de condiciones de escasa cobertura vegetal (<25%) y pendientes fuertes (35 y 42%), Martínez *et al.* (2019) cuantifican la erosión superficial neta (erosión neta= erosión – sedimentación) mediante la aplicación de redes de clavos de erosión en la parte alta, media y baja de laderas. En sus resultados registran en el periodo final la mayor erosión neta de 102 Mg ha⁻¹ en la parte media de la ladera con un 36% superior a las partes alta y baja, lo cual lo asocian a la intensidad de las precipitaciones, además de considerar el factor de la erosión eólica.

Al analizar la pérdida de suelo en cárcavas, en dos áreas del estado de Tamaulipas en México, se cuantificaron pérdidas de 1,046 ton ha⁻¹ año⁻¹ en el sitio Chihue y de 374 ton ha⁻¹ año⁻¹ en el sitio Alamar. La principal diferencia, que propició una mayor erosión en una de las áreas fue el caudal recibido, siendo casi 8 veces mayor en Chihue que en el sitio Alamar (Rivera *et al.*, 2012). En otro estudio, también de estimación de erosión en cárcavas, Casalí *et al.* (1999) estimaron pérdidas de 266 Ton ha⁻¹ año⁻¹) en una región de Navarra, España.

La Ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) es un modelo empírico que fue diseñado con la finalidad de predecir pérdidas promedio de suelo por lapsos largos de tiempo en sitios específicos en sistemas de cultivo. Debido a la amplitud de su aplicación de manera generalizada ha demostrado su utilidad y validación para tal fin. Este modelo fue desarrollado en el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelos en 1954, por la Administración de Ciencia y Educación en cooperación con la Universidad de Purdue (Wischmeier y Smith, 1978).

Con la combinación de valores asignados a seis factores importantes a considerar como coadyuvantes de la erosión hídrica, este modelo calcula la erosión para un lugar determinado. Estos valores varían considerablemente respecto a las medias de una tormenta a otra, pero los efectos de dichas fluctuaciones son promediados en periodos de tiempo continuos debido a la imprevisibilidad de las variaciones aleatorias de corto plazo. No obstante, las actuales ecuaciones de pérdida de suelo resultan ser menos precisas para la predicción de eventos específicos que para la predicción de promedios a largo plazo (Wischmeier y Smith, 1978).

El modelo RUSLE (Ecuación Universal Revisada para estimar la pérdida de suelo), conserva la estructura básica de USLE, con la particularidad de que éste se puede calcular a partir de diferentes procedimientos incluyendo los SIG. Además, puede aplicarse en tierras de cultivo, bosques perturbados, y otras áreas donde la escorrentía sucede a consecuencia de mayores precipitaciones y menores infiltraciones (Salumbo, 2020). Gracias a los beneficios que ofrece para su aplicación, se ha evidenciado que este modelo informático es el más utilizado, ya que facilita la visibilidad de la interacción que existe entre la erosión y sus factores causales (Phinzi y Ngetar, 2019). Incluso se habla de la adaptabilidad de todos los parámetros de RUSLE para diferentes países y regiones climáticas en todo el mundo (Tian *et al.*, 2021). No obstante, a causa de esas grandes variaciones climáticas, edafológicas y topográficas que se dan en el planeta, manejadores e investigadores de todo el mundo han desarrollado ecuaciones con base en dicha variabilidad ambiental, para su aplicación de manera más específica al ambiente en el que se emplea (Ghosal y Das Bhattacharya, 2020).

Diversos autores han buscado validar los resultados obtenidos con la aplicación de la ecuación RUSLE, mayormente mediante la comparación entre los valores obtenidos por el método directo y los obtenidos con dicha ecuación. Por ejemplo, Pando *et al.* (2003), comparan resultados al evaluar erosión hídrica en un área específica en Linares, Nuevo León, mediante el método directo de los clavos y rondanas, y el método indirecto de la ecuación RUSLE probando dos variantes para el factor R (índice de Fournier e índice P/2). Los resultados mostraron que, mediante el método directo, la mayor tasa de erosión se dio en la unidad geomorfológica denominada SURELUT con $100 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; mientras que las dos variantes del método indirecto estimaron la mayor tasa de erosión en TELILUT con 38 y 149 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El índice de Fournier tendió a sobreestimar valores en pendientes medias y

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

tendidas y a subestimar en pendientes suaves. Sin embargo, fue la variante que más se aproximó al método directo ya que el índice P/2 sobreestimó los valores reales de erosión. Se concluye que el índice de Fournier mostró ser bastante preciso siempre y cuando no haya presencia de cárcavas en el área a evaluar.

Aburto *et al.* (2020) estimaron la pérdida y movilidad del suelo en el centro-sur de Chile utilizando pernos de erosión en microcuencas plantadas con *Pinus radiata* comparándolas con un bosque nativo de *Nothofagus* sp. Como resultado, reportan la pérdida neta anual de suelo 65.03 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en la plantación de *Pinus* y el bosque nativo con 21.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Además, aplicaron el modelo RUSLE, el cual predijo una pérdida neta anual de suelo “moderadamente fuerte” en ambos sitios, con una tendencia a subestimar los valores de erosión en los bosques nativos.

En otro estudio, la ecuación RUSLE mostró igualmente alta precisión ($R^2=.89$) al correlacionar los valores de ésta con los valores obtenidos en parcelas de escurrimiento en una región montañosa de China. En este trabajo, el factor P de la ecuación RUSLE fue ajustado considerando medidas de control de suelo y agua, determinados mediante sensores remotos. Los autores remarcan la importancia de que, en futuras investigaciones, se consideren las divisiones de las pendientes existentes en el área con sus datos específicos de erosión (Tian *et al.*, 2021).

Al hacer una revisión de estudios de erosión a nivel mundial en los que se ha aplicado la ecuación RUSLE, Ghosal y Das Bhattacharya (2020) encuentran que cada factor tiene variaciones al ser dependientes de condiciones climáticas, edáficas y topográficas ampliamente diversas, a lo cual los investigadores han dado respuesta desarrollando diferentes ecuaciones para algunos de los factores.

El factor de erosividad de la lluvia “R” es uno de los factores principales que propician la erosión del suelo. A continuación, con base en Ghosal y Das Bhattacharya (2020), se mencionarán algunas variaciones de este factor en diferentes zonas climáticas.

Zonas Húmedas Tropicales

En Malasia, Agele *et al.* (2013) utiliza la siguiente ecuación:

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

$$R = 117,6 \times (1.00105 \wedge (PMA))$$

Donde R, es el factor de erosividad de la lluvia; PMA es la precipitación media anual.

Prasannakumar *et al.* (2011) en la India, utilizo la ecuación para la cuenca del rio Siruvani, valle de Attapady, Kerala.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(\frac{P_i}{P}) - 0.08188)}$$

En la cual, R es el factor de erosividad de la lluvia; P_i es la precipitación mensual (mm); P es la precipitación anual (mm).

Zonas Tropicales Húmedas y Secas

En Etiopia, Hurni (1985) aplicó la siguiente ecuación:

$$R = -8.12 + (0.562 \times P)$$

en donde R, es el factor de erosividad de la lluvia; P es el promedio anual de precipitación disponible. En 1981, Singh desarrolla otro modelo:

$$R = 79 + 0,363 PMA$$

Donde R, es el factor de erosividad de la lluvia; PMA es la precipitación media anual en mm.

Zonas Semiáridas o Esteparias

Bu *et al.* (2003), desarrolló una ecuación para el factor R para su aplicación principalmente en China:

$$R_j = (0.1281 \times I_{30B} \times P_f) - (0.1575 \times I_{30B})$$

Donde, R es el factor de erosividad de la lluvia; P_f es la precipitación anual en mm; I_{30B} es la intensidad máxima de una tormenta en 30 min (mm/h).

Angima *et al.* (2003) aplicaron el siguiente modelo desarrollado por Renard *et al.* (1997) en una cuenca en Embu, Kenia Central:

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E_k I_{30}) \right] j$$

En donde R es el factor de erosividad de la lluvia; E es la energía cinética producida por la lluvia; I_{30} es la intensidad máxima de 30 min; j es un índice que muestra el número de tormentas que ocurren en un año; n el número de años en los que obtuvo información para el factor R y m es el número de tormentas que ocurren en un año.

De los seis factores que conforman la ecuación RUSLE, el factor P se considera el más incierto (Morgan y Nearing, 2011; Tian, 2021). Este factor está establecido entre los valores de 0 y 1, disminuye conforme existen más prácticas de conservación de suelo en un área, tales como terrazas, bordos a curvas de nivel, zanjas trincheras, revegetaciones u otras. Conforme mejor es la práctica realizada para el control de la erosión, menor será el valor asignado al factor P (Diyabalanage *et al.*, 2017), pero la magnitud de este valor no está plenamente determinada y queda a criterio del evaluador.

Terranova *et al.* (2009) han utilizado ecuaciones para determinar este factor basándose en la topografía del lugar. Sin embargo, Panagos *et al.* (2015), consideran inadecuado este método ya que la ecuación RUSLE ya incorpora los aspectos topográficos con los factores S (magnitud de la pendiente) y L (longitud de la pendiente).

Ghosal y Das Bhattacharya (2020) comentan, con base en su recopilación de información de las variaciones de los factores de la ecuación RUSLE, que muchos estudios se basan en una tabla de valores del factor P desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) para distintas prácticas de conservación de suelos. Dichos autores, al referirse al efecto de los cultivos en curvas de nivel, mencionan que esta práctica tiene su máxima efectividad en pendientes entre 3 y 8%. En pendientes menores o mayores a éstas, decrece su efectividad y el valor del factor P se aproxima a 1. Tian *et al.* (2021), tras analizar en 96 parcelas, el efecto de diversas obras de conservación de suelo (de carácter biológico, de ingeniería y aplicadas a cultivos) en el factor P de la ecuación, concluyen que el aspecto más importante para determinar el factor P es identificar el impacto cuantitativo de dichas obras en el control de la erosión. De ahí que autores como Smith y Whitt, (1948) manifiestan que en áreas con pendientes de 0% donde

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

fueron establecidos cultivos en curvas de nivel, el valor de P debería ser igual a 1, ya que no existe una dirección definida del flujo de agua. Para pendientes de 2% consideran un valor de $P= 0.6$.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la subprovincia fisiográfica de Llanuras y Lomeríos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] 2017) en el estado de Nuevo León (Figura 1); específicamente en el ejido Las Barretas (coordenadas extremas 24° 50' 55.47" latitud norte, y 99° 26' 07.72" longitud oeste) a una altitud de 285 msnm. El ejido se encuentra ubicado a 12 kilómetros al este de la cabecera municipal de Linares, Nuevo León y a 5 km al sur de la presa Cerro Prieto.

El material geológico predominante de la zona es la roca sedimentaria marga, la cual está compuesta principalmente de calcita y arcillas (INEGI, 2005), en donde predominan los lomeríos suaves, de altitudes de 280 a 300 msnm (INEGI, 1999). El suelo predominante en el área es el vertisol (INIFAP-CONABIO, 1995) con textura arcillo arenosa principalmente. La profundidad de las subáreas denominadas como "suelo profundo" tienen un promedio de 33.79 ± 3.01 cm en las subáreas de "suelo somero" la profundidad promedio es de 19.37 ± 2.3 cm (determinaciones propias).

El clima es semicálido subhúmedo en donde la temperatura media anual es de 23.3° C. La temperatura máxima promedio puede llegar a los 49° C y la mínima a -6° C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2020). La precipitación media anual oscila entre los 600-700 milímetros (INEGI 2017), siendo los meses de septiembre y mayo cuando se presenta mayor cantidad de precipitación con 178 mm y 85 mm respectivamente, mientras que la menor precipitación es en el mes de febrero con 16.1 mm en promedio (CONAGUA, 2020). Para el año 2021, en el que se realizaron las mediciones de erosión de esta investigación, la precipitación total fue de 477 milímetros. La mayor precipitación se registró en los meses de julio y junio (132 y 76 mm respectivamente), mientras que la mínima registrada en el mismo año fue en los meses de febrero y diciembre (1.7 mm). Los datos de precipitación corresponden a los registrados en la Estación Climatológica de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL (coordenadas 24° 47' 43.82" latitud norte, y 99° 32' 27.43" longitud oeste).

La vegetación corresponde principalmente a un matorral espinoso tamaulipeco (INEGI, 1982), donde se encuentran especies como *Vachellia rigidula* (Benth.) Seigler y Ebinger (chaparro prieto), *Karwinskia humboldtiana* (Schult.) Zucc. (tullidor), *Cordia boissieri* A. DC. (anacahuita), *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. (huizache), *Croton* sp L., *Celtis pallida* Torr. (granjeno), *Guaiacum angustifolium* Engelm, (guayacán), *Jatropha dioica* Sessé (sangre de drago), *Castela texana* (Torr. & A. Gray) Rosa (chaparro amargoso), *Tiquilia canescens* (DC.) ATR Richardson (hierba de la virgen), entre otros. Además de la presencia de una zona con dominancia de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) MCJohnst (mezquital).

Obras de conservación de suelo

En el año 2016, se llevó a cabo una obra de conservación de suelo en una superficie de 81 hectáreas, cercadas para la exclusión de ganado, en terrenos pertenecientes al ejido. Estas obras consistieron en el establecimiento de 2865 zanjas tipo trinchera, con medidas de 2.00 x 0.40 x 0.40 m de profundidad. Además, se realizó una plantación de un promedio de 450 plántulas por ha. Las especies de plantas seleccionadas para reforestar el área fueron *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. (huizache), *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) MCJohnst. (mezquite), *Cordia boissieri* A. DC. (anacahuita) y *Parkinsonia aculeata* L. (retama).

METODOLOGÍA

En un estudio previo, el área fue estratificada en tres subáreas en función de la profundidad de suelo. Para la presente investigación, se tomaron en cuenta dos de estas subáreas, las cuales corresponden a suelo profundo y suelo somero (Figura 1). En cada subárea, se determinó la erosión hídrica, estableciendo tres parcelas de 25 X 10 m como repeticiones. Las parcelas se orientaron con su dimensión más larga en sentido contrario a la pendiente, a fin de interceptar el mayor número posible de escurrimientos. Se tuvo especial precaución de que todas las parcelas quedaran ubicadas de manera semejante con relación a las zanjas trinchera realizadas como obras de conservación del suelo.

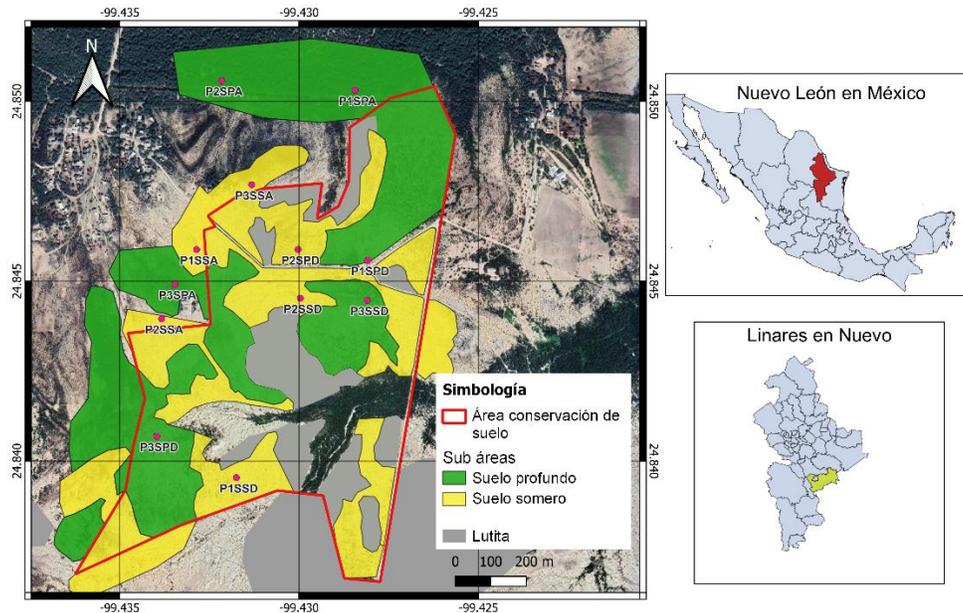


Figura 1. Ubicación y estratificación de subáreas en función de la profundidad del suelo.

Método directo

La pérdida de suelo de la capa superficial fue determinada mediante el método directo, el cual es una adaptación de la técnica de clavos y rondanas propuesta por el Colegio de Postgraduados (1991). Esta técnica consiste en utilizar clavos de 30 centímetros de largo previamente marcados a 1 pulgada de la cabeza del clavo. Estos fueron introducidos en el suelo hasta la marca, dentro de cada parcela. El establecimiento de los clavos se hizo siguiendo una malla de 2 X 2 metros, resultando 60 clavos por repetición, 180 clavos por subárea, 360 en total. La ubicación de cada parcela se encuentra georreferenciada por sus cuatro vértices para su fácil ubicación en campo.

La pérdida de suelo se obtuvo midiendo la distancia entre la marca del clavo y el suelo o, por el contrario, cuando hubo acumulación de suelo de arrastre, se tomó la distancia entre la cabeza del clavo y el suelo y este valor se le restó a la pulgada marcada previamente.

Para cuantificar la erosión del área, se utilizaron los datos obtenidos en campo mediante la técnica de los clavos, realizando por separado la sumatoria para aquellos clavos que tuvieron pérdida y en los que hubo deposición de suelo. El valor final de la erosión en el área desde el mes de febrero hasta octubre del año 2021 se expresa en $t\ ha^{-1}$. Para ello, se transformaron

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

las medidas de altura de suelo perdido de milímetros a metros y se multiplicaron por la densidad aparente de cada área, finalmente se extrapoló a una hectárea.

La expresión matemática de este procedimiento es (Pizarro y Cuitiño, 2002):

$$X \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = Y * Da * A$$

Donde,

X = suelo sedimentado o erosionado

Y = altura o espesor de suelo perdido o sedimentado (m)

Da = densidad aparente (g cm^{-3}) = (t m^{-3})

A = área de la parcela o área de interés.

Inicialmente, esta metodología fue planteada para medir la erosión en el área en donde se realizaron obras de conservación de suelo (ACCS) y en las áreas testigo (AT). Sin embargo, estas últimas no se encuentran cercadas, por lo que el diseño experimental estuvo expuesto a daños ocasionados por terceros. Como consecuencia, fue imposible llevar a término la medición directa de la erosión en dicha área. Debido a esto, se optó por la aplicación del método indirecto RUSLE en ambas áreas (ACCS y AT) para, además de comparar la erosión entre las mismas, estimar la precisión del método RUSLE en la cuantificación de la erosión hídrica en las ACCS.

Método indirecto

La Ecuación Universal Revisada para la estimación de la Pérdida de Suelo (RUSLE) se describe a continuación:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde,

A= Pérdida de suelo por unidad de superficie (t ha^{-1})

R= Factor de erosividad de la lluvia

K= Factor de erodabilidad del suelo

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

LS= Factor relativo a la longitud y pendiente de laderas

C= Factor de la cobertura vegetal

P= Factor de medidas de conservación y control de la erosión.

Factor de erosividad de la lluvia “R”

Para obtener los valores de R es imprescindible contar con datos de precipitación. Para tal efecto, inicialmente se instaló un medidor de precipitación (HOBO) en el área. Sin embargo, por falla del equipo, hubo necesidad de sustituir dichos datos por los recabados en la estación meteorológica establecida en la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, ubicada en Linares, Nuevo León.

Los datos de precipitación que se tomaron en cuenta fueron los reunidos entre los meses de febrero y octubre del año 2021. Considerando de tal manera, este período como la precipitación anual.

La estimación de los valores se llevó a cabo mediante la aplicación de tres métodos diferentes. El primero es el método mayormente recomendado por la FAO (1979), citado por Gutiérrez (2002), el cual consiste en la aplicación del índice de Fournier (IF):

$$R = \frac{\sum P^2}{\bar{p}}$$

Donde:

R= índice de Fournier

P= precipitación promedio mensual

\bar{P} = precipitación promedio anual

El segundo método consistió en aplicar la fórmula donde se describe a R como la mitad de la precipitación promedio anual en milímetros (R/2) (citado por Gutiérrez, 2002).

El tercer método para determinar valores fue a través del índice EI₃₀ (Wischmeier y Smith, 1978), que se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por su intensidad máxima durante una lluvia de 30 minutos (I₃₀). Este índice es coincidente con el

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

propuesto por Bu *et al.* (2003) para regiones semiáridas o esteparias. Ambos índices consideran como determinante la intensidad de la lluvia y utilizan el valor de la lluvia o tormenta de 30 minutos de duración. La ecuación es la siguiente:

$$EI_{30} = (E) * I_{30}$$

Donde:

E= Es (energía total del segmento)

Es= e * p

$$e = 0,119 + 0,0873 \text{ Log}_{10} I$$

I₃₀= Energía cinética de máxima intensidad en 30 min.

Factor de erodabilidad del suelo “K”

Para la determinación de la erodabilidad del suelo es necesario la estimación de cuatro parámetros que son: la textura, el porcentaje de materia orgánica, la estabilidad de los agregados y la conductividad hidráulica.

Para esto, se tomaron cuatro muestras de suelo de cada parcela para su análisis. El número de éstas fue determinado de manera subjetiva considerando que las subáreas serían relativamente homogéneas. Cada muestra fue secada en una estufa a una temperatura de 105°C, hasta que mostraran un peso constante.

La textura del suelo se determinó con base en la prueba al tacto siguiendo claves texturales (Anexo 1). Para definir el porcentaje de materia orgánica se utilizó el nomograma propuesto por Renger *et al.* (1987) basado en el color del suelo mediante la Carta de colores Munsell, así como el pH y el porcentaje de arcilla (Anexo 2).

La estabilidad de los agregados se definió con base en Schlichting y Blume (1966). Esta se evaluó depositando 10 agregados de suelo de 3 mm de diámetro aproximadamente, en una cápsula de porcelana en donde se agregó agua cuidadosamente hasta la saturación de estos. A continuación, se giró suavemente la cápsula en la palma de la mano de manera constante

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

por un lapso de 30 segundos. Posteriormente se estimó el grado de descomposición de los agregados.

La conductividad hidráulica se define con la textura del suelo y la densidad aparente (Da) (Anexo 3). Para determinar esta última, se utilizó el método gravimétrico, tomando en cuenta las cuatro muestras de suelo por cada parcela para obtener un valor de densidad aparente promedio.

Una vez obtenidos los parámetros, se determinó la erodabilidad del suelo siguiendo el nomograma propuesto por Wischmeier *et al.* (1971) modificado (Anexo 4).

Factor relativo a la longitud y pendiente de laderas “LS”

En campo, en cada una de las parcelas tanto del área en donde se llevaron a cabo obras de conservación de suelo y las áreas testigo, se realizaron tres transectos al azar, con una separación mínima de 50 m entre cada uno y de la parcela correspondiente, estos fueron direccionados en sentido contrario a la pendiente. Las medidas de los transectos fueron de 15 m de largo por 1 m de ancho. Resultando de esta manera, 36 transectos en total.

Por medio de Sistemas de Información Geográfica se realizó un modelo digital de elevación de alta resolución Lidar, tipo SUPERFICIE G14C58F1_MS (5 m), para obtener el porcentaje de la pendiente por transecto y consecutivamente obtener un promedio por subárea.

Para obtener la longitud de la pendiente en el área con obras de conservación de suelos, se tomó en cuenta el arreglo y la distancia entre líneas de las zanjas trinchera, considerando así, 20 m de longitud. En cuanto a las parcelas testigo, la longitud de la pendiente se estimó por parcela en base al mapa de clasificación de pendientes (Anexo 5). Tomándose en cuenta longitudes varias, que van desde los 20 m, 25 m, 50 m, 100m hasta los 150m.

Una vez obtenidos los datos, se calcularon los valores del factor topográfico con una fórmula basada en Wischmeier y Smith (1978), citado por Gutiérrez (2002)

$$LS = \left(\frac{L}{22.1} \right)^m (0.065 + 0.045 s + 0.0065 s^2)$$

En donde:

L = longitud de la pendiente

22.1 = longitud de una parcela estándar (m)

$m = 0.5$ si $s > 5\%$

$m = 0.4$ si $3\% < s < 5\%$

$m = 0.3$ si $1 < s < 3\%$

$m = 0.2$ si $s < 1\%$

s = pendiente en porcentaje

Factor de la cobertura vegetal “C”

Para estimar el valor de este factor se utilizaron los transectos mencionados en el factor “LS”. En cada uno de estos transectos, se registró toda la vegetación que se encontró dentro de los 15 m², haciendo distinción entre árboles, arbustos, pastos y herbáceas, de los cuales se registró información como la altura y dos diámetros de la copa en el caso de árboles y arbustivas, mientras que los pastos y herbáceas, se registró el largo y ancho de su cobertura. Además, se tomaron datos de identificación como parcela, subárea, orientación de los transectos y coordenadas de inicio y final.

Una vez obtenidos los datos de cubierta vegetal, en gabinete se procedió al cálculo en porcentaje del área cubierta por cada forma de vida, para posteriormente utilizarlos para calcular el valor del factor “C” con base al cuadro de valores de la U. S Soil Conservation Service tomado de Kenneth *et al.* (1993) (Anexo 6).

Factor de medidas de conservación y control de la erosión “P”

El factor P considera las prácticas que reducen la erosión potencial por escurrimientos, ya sea al reducir la velocidad y, por ende, la fuerza erosiva de estos o alterar los patrones de drenaje en la superficie del suelo. Este factor está establecido entre los valores de 0 y 1, disminuye conforme existen más prácticas de conservación de suelo en un área, tales como terrazas, bordos a curvas de nivel, zanjas trinchera, revegetaciones u otras. Conforme mejor es la práctica realizada para el control de la erosión, menor será el valor asignado al factor P (Diyabalanage *et al.*, 2017).

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Para decidir el valor de P a utilizar en este estudio, en el área de evaluación donde se realizaron obras de conservación de suelo, se tomaron en consideración datos provenientes de otras investigaciones, así como las pendientes predominantes en el área de estudio (1 y 2%).

Por lo tanto, se tomó la decisión de asignar un valor de $P= 0.9$ para las áreas donde se realizaron las obras de conservación de suelo.

Análisis de los datos

Los datos fueron analizados estadísticamente para comprobar su distribución normal y homogeneidad de varianzas, para posteriormente analizarlos mediante pruebas t de Student. A fin de evaluar la eficiencia del método indirecto, para la estimación de la erosión se realizó un análisis de correlación en el programa de SPSS con los datos obtenidos con el método directo y con el indirecto en sus tres variantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación Mediante el Método Directo en Áreas con Obras de Conservación de Suelo

La erosión de suelo anual, para toda el área en su conjunto, fue de 97 ton ha⁻¹. En la subárea de suelo profundo se estimó una pérdida anual de 121.68 ton ha⁻¹ y una deposición de 86.72 ton ha⁻¹. Mientras que, en la subárea de suelo somero, la pérdida anual estimada fue de 72.32 ton ha⁻¹ y una deposición de 67.74 ton ha⁻¹ (Cuadro 1). Tanto la pérdida, como la deposición de suelo, fueron iguales en las subáreas de suelo profundo y en las de suelo somero (p= 0.13 y p=0.21, respectivamente).

El valor de erosión anual por hectárea contrasta notoriamente con lo mencionado por Pando *et al.* (2003), quienes reportan 38.6 ton ha⁻¹ anuales en sitios con pendientes predominantemente suaves (2-5°).

Sin embargo, otros autores han encontrado valores superiores de erosión, tanto en regiones de México como en otras partes del mundo, tal como Pereyra *et al.* (2005) quienes reportan 224 Ton ha⁻¹ año⁻¹ de suelo perdido en el estado de Veracruz; Martínez *et al.* (2019) cuantificaron una erosión de 102 Mg ha⁻¹ al norte de Ecuador y Casalí *et al.* (1999), quienes estimaron pérdidas de 266 Ton ha⁻¹ año⁻¹ de suelo en una región de Navarra, España.

La cantidad de suelo extraído al momento de la excavación para construir las zanjas podría estar contribuyendo a los altos valores de pérdida y deposición de suelo registrados. Según Cotler *et al.* (2015), la cantidad de suelo extraído al momento de la construcción de zanjas se estima entre las 60 y 123 ton ha⁻¹, rango en el que se encuentran las cifras de deposición resultantes en este trabajo, lo que trae consigo efectos opuestos a la conservación del suelo.

Cuadro 1. Pérdida y deposición de suelo en las subáreas

	PROFUNDO	SOMERO	Promedio
	<i>pérdida</i>	<i>pérdida</i>	
P1	70	62	

P2	181	40	
P3	113	114	
ton ha⁻¹	121.6	72.3	97
	+/- 55.9 desv. est	+/- 38.1 desv. Est	
	<i>deposición</i>	<i>deposición</i>	
P1	71.57	52.57	
P2	103.74	44.08	
P3	84.85	106.58	
ton ha⁻¹	86.7	67.7	77.2
	+/- 16.1 desv. stand	+/- 33.8 desv. stand	

Sin embargo, si bien la pérdida de suelo registrada con el método directo fue alta (97 ton ha⁻¹), también lo fue la deposición de suelo (77.2 ton ha⁻¹) y, dado que se trata de un área prácticamente plana, (pendientes dominantes de entre 1% y 2%), es poco probable que el terreno recibiera aportes de suelo de áreas más altas o que el suelo perdido fuera a parar a otras áreas más bajas. Lo anterior hace suponer que el suelo se desplazó de un punto a otro dentro de la misma área evaluada. De ser así, y, tomando en consideración el criterio de Ludwig y Tongway (1995) de que un paisaje es funcional cuando es capaz de retener sus recursos (suelo, agua, nutrientes) sin importar las redistribuciones internas, quizás habría que considerar como erosión del área, la diferencia entre la pérdida y la deposición de suelo registradas, lo que nos daría un valor de 20 ton ha⁻¹, tal como realizaron Martínez *et al.* (2019), al determinar la erosión neta (EN= erosión – sedimentación)

De aceptar este último valor y, de acuerdo con la Clasificación de Erosión de los Suelos del Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (2008), citado por Tian *et al.* (2021), el área estaría considerada como de erosión moderada (500 a 2,500 ton km⁻² a⁻¹) (Cuadro 2). De manera similar, en la escala definida por Karydas *et al.* (2009) para olivares en Creta, Grecia (Cuadro 3) la erosión sería entre moderada y ligeramente severa.

Cuadro 2. Clasificación en función de los grados de intensidad de la erosión (ton km⁻² a⁻¹)

Leve	< 500
Suave	500 - 2500
Moderada	2500 - 5000
Fuerte	5000 - 8000
Muy fuerte	8000 - 15,000
Severa	> 15,000

Cuadro 3. Clasificación en función de la erosión anual

Muy leve	0 – 5ton ha ⁻¹ año ⁻¹
Leve	5 – 10 ha ⁻¹ año ⁻¹
Moderada	10 – 20 ha ⁻¹ año ⁻¹
Severa	20 – 40 ha ⁻¹ año ⁻¹
Muy severa	> 40 ha ⁻¹ año ⁻¹

Estimación mediante el método indirecto

Los valores de erosión fueron mayores tanto en el ACCS (IF $p = 0.011$; P/2 $p = 0.026$) como en el área Testigo (IF $p = 0.020$; P/2 $p = 0.045$) cuando el factor R se estimó con el índice de Energía cinética de máxima intensidad en 30 min (EI₃₀) que cuando se utilizó el índice P/2 o el Índice de Fournier.

En el ACCS, al emplear el Índice de Fournier, la erosión promedio estimada fue de 0.232 ton ha⁻¹; con la variante de P/2, la erosión fue de 0.647 ton ha⁻¹ y, por último, al estimarla mediante la EI₃₀, el valor fue de 2.031 ton ha⁻¹

Para el área Testigo, con el índice de Fournier el promedio de erosión en el área fue de 0.978 ton ha⁻¹, con P/2 fue de 2.726 ton ha⁻¹ y con EI₃₀ el resultado fue de 8.565 ton ha⁻¹ (Cuadro 4), siendo los dos primeros iguales entre sí ($p=0.055$).

Cuadro 4. Resultados de erosión aplicando los tres diferentes métodos para estimar el factor R

	RUSLE		
	R (IF) ton ha ⁻¹	R(P/2) ton ha ⁻¹	R (EI30) ton ha ⁻¹
ACCS	0.238	0.663	2.084
	0.226	0.630	1.979
Promedio	0.232	0.647	2.031
Área T	1.259	3.510	11.030
	0.696	1.941	6.100
Promedio	0.978	2.726	8.565

Independientemente de la variante del factor R que se haya aplicado, los valores de erosión fueron más altos ($p = 0.033$ para las tres variantes) en la zona testigo, lo que parece indicar que las obras realizadas en la zona de conservación contribuyen a la disminución de la erosión. Esto como consecuencia de una mayor cobertura vegetal en el ACCS, en donde los pastos se presentaron en promedio en un 24.17% de la superficie del área, las herbáceas en un 15.33% y los arbustos en un 45.61%. mientras que para el área T, los pastos representaron un 1.27% de la superficie evaluada, las herbáceas un 7.36%, los arbustos un 29.43% y el estrato arbóreo un 15.44%. (Figura 2)

Análisis del factor R que involucra la ecuación RUSLE.

La erosividad de la lluvia (factor R en la ecuación RUSLE) es uno de los principales factores que propician la erosión del suelo. Wischmeier y Smith (1978) emplean el índice de la energía cinética por la máxima intensidad de lluvia durante 30 min (EI_{30}), para determinar el efecto que produce el impacto de la lluvia y lo relacionan con la cantidad y tasa de escorrentía, que probablemente está ligada a la precipitación.

En el presente estudio, con la aplicación de este índice resultaron los valores de erosión más altos de las tres formas de estimar “R” que se compararon, siendo 3.1 veces mayor que lo obtenido mediante P/2. Éste a su vez, fue 2.7 veces el valor obtenido con el índice de

Fournier, tanto en ACCS como en el área T. Este patrón se presentó de manera similar en la investigación de Gutiérrez (2002), quien reporta que los resultados de P/2 fueron cuatro veces el valor estimado para el índice de Fournier. El índice EI_{30} parece ser el método más sólido para cuantificar el valor de “R” en la ecuación para la pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978; Ghosal y Das Bhattacharya, 2020).

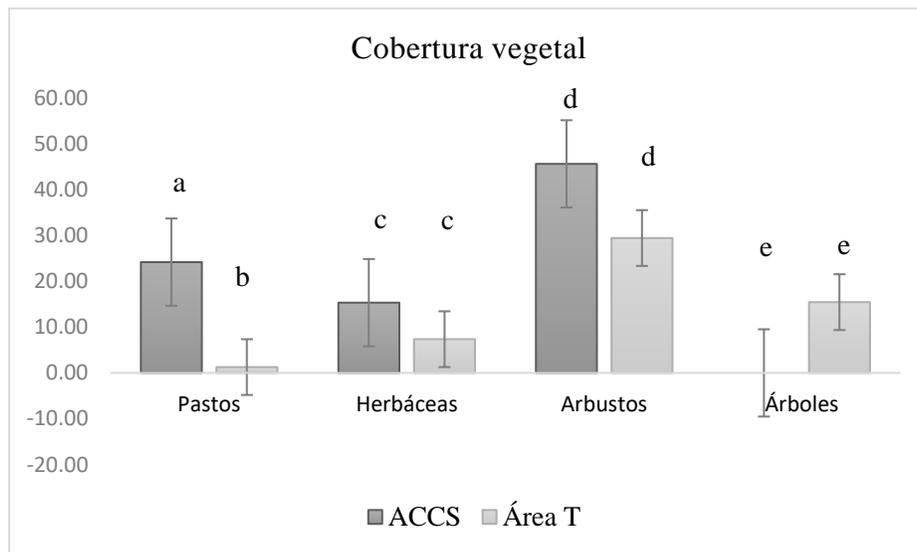


Figura 2. Porcentaje de cobertura vegetal presente en los diferentes estratos.

Análisis del factor P que involucra la ecuación RUSLE.

Panagos *et al.* (2015), mencionan que las prácticas de conservación de suelo (que constituyen el factor P) se aplican principalmente en áreas propensas a erosionarse debido a sus valores altos de pendiente y de longitud de la misma, lo cual no es el caso en el presente estudio, ya que las pendientes en la mayor parte del área fluctúan entre 1 y 4%.

Comparación de los métodos directo e indirecto

El análisis de correlación que permitiría estimar la precisión en la cuantificación de la erosión en el área utilizando la ecuación RUSLE dio un valor moderadamente bajo ($R= 0.640$, $R^2= 0.410$, $p= 0.171$ para las tres variantes de RUSLE). Como se puede observar, el modelo no

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

se ajusta por su valor de significancia, por lo tanto, estas correlaciones no son concluyentes ya que los valores de la muestra son escasos.

La ecuación subestimó en gran medida los valores de pérdida de suelo obtenidos mediante el método directo. Esto puede deberse a que probablemente la ecuación RUSLE está diseñada para estimar pérdidas en áreas con pendientes más altas.

Tian *et al.* (2021) contrastaron los valores obtenidos mediante RUSLE y la erosión determinada en campo, derivada de 96 parcelas de escurrimiento en áreas montañosas de Hubei, China y encontraron valores de $R^2=0.89$. Esto parecería reforzar el supuesto arriba enunciado.

La subestimación encontrada en el presente trabajo coincide con lo expresado por Bienes *et al.* (2011) quienes al aplicar USLE y RUSLE en eventos fuertemente erosivos y utilizando el valor de energía cinética de Wischmeier y Smith (1978), obtienen “valores muy inferiores a los reales”; concluyendo que estas ecuaciones subestiman la pérdida de suelo en eventos excepcionales.

Esta discordancia también se reporta por Kearney *et al.* (2017) en un mosaico de bosque, agricultura y pastos en el norte de El Salvador, ya que mediante RUSLE estiman valores de erosión entre 3.3 y 7.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que el cálculo de la erosión a través de clavos osciló entre 107 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y una deposición de 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹, encontrando una correlación nula entre ambos métodos. De manera similar, Aburto *et al.* (2020) realizando una comparación entre valores de erosión obtenidos mediante pines de erosión y ecuación RUSLE en microcuencas plantadas con *Pinus radiata* y un bosque nativo de *Nothofagus* sp, concluyen que la ecuación subestimó las cifras de erosión en los bosques nativos.

Desde otro orden de ideas, hay autores que sostienen que la forma de calcular la tasa anual de erosión y deposición, como el cambio neto medio en la altura de los clavos de erosión, llamándolo cambio de “número real” neto, genera resultados con una escasa relación con las tasas de erosión estimadas mediante otros métodos y modelos (Kearney *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No se encontraron diferencias entre suelos profundos y someros, de manera que la erosión total estimada con los clavos de erosión para el sitio de estudio fue de 97 ton ha⁻¹, y una deposición de 77.2 ton ha⁻¹. Sin embargo, al calcular la erosión neta, se obtuvo un valor de 20 ton ha⁻¹, lo que nos conduce a valorar el área en un estado de erosión de moderada a ligeramente severa, dependiendo del autor que se considere para su clasificación.

Se recomienda que el método de los clavos de erosión se realice en áreas controladas o bien, modificar la técnica utilizando un material menos atractivo para ajenos al estudio y con ello evitar el menor sesgo posible.

De los tres índices probados en la ecuación RUSLE para la estimación del factor R, el EI₃₀ estimó los valores de erosión más altos, por lo tanto, es el método que más se aproxima a la erosión calculada por el método directo. Independientemente de la forma de calcular R, hubo mayor erosión en el área Testigo que en el ACCS, siendo la cobertura vegetal la que propicia tal diferencia y más significativamente los pastos.

Por lo tanto, las obras de conservación del suelo manifiestan tener una influencia en la disminución de la pérdida de suelo, sin embargo, para el alcance de este trabajo, no fue posible identificar cuál de las obras posee mayor efecto en los presentes resultados, es decir, no podemos concluir si es debido a la implementación de las zanjas trinchera, a la reforestación, una consecuencia de la exclusión del ganado en el área, o bien, una combinación equitativa de las tres acciones. Para poder señalar el factor determinante, sería necesario que el área testigo se encontrara en igualdad de condiciones con respecto a las zanjas trinchera. En la presente investigación, esto no fue posible debido a que en el ACCS no existe un espacio libre de la presencia de estas obras.

Con respecto a la aplicación de zanjas trinchera, se concluye que es una obra con la cual es importante tener fundamentada su aplicación y tomar en consideración todas las condiciones del sitio en donde se desee aplicar, especialmente el factor topográfico, ya que, por la naturaleza de esta obra, hablando en específico del suelo extraído al momento de su realización, éste queda totalmente desprotegido, acelerando con ello el arrastre y/o la pérdida del suelo.

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Con la aplicación del modelo RUSLE, se obtuvieron valores de erosión muy bajos en comparación con lo obtenido mediante los clavos de erosión, existiendo un nivel de correlación muy inferior entre los dos métodos, empero, dicha correlación podría ser ajustada con la utilización de datos más robustos.

REFERENCIAS

- Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., y Rubilar, R. (2020). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation & Development*, 32 (1): 453-466. <https://doi.org/10.1002/ldr.3700>
- Agele, D., Lihan, T., Sahibin, A., y Rahman, Z. (2013). Application of the RUSLE model in forecasting soil erosion at downstream of the Pahang river basin, Malaysia. *Journal of Applied Sciences Research*, 9(1): 413–424.
- Angima, S. D., Stottb, D. E., O’Neil, M. K., Ong, C. K. y Weesies, G. A. (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 97: 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00011-2)
- Benites, J. R. (Ed.) (2004). Manejo integrado del suelo y agua para un desarrollo agrícola sostenible en América Latina. *LEISA Revista de Agroecología* Vol. 19:(4), pp 4-5.
- Bienes Allas, R., Ruiz-Colmenero, M., Arévalo, D., Sastre, B. y Marqués Pérez, M. J. (2011). Distribución del tamaño de gota de una lluvia natural y su energía cinética. En: R. Ortiz Silla, A. Sánchez Navarro. *Control de la degradación y uso sostenible del suelo*. Edición 1ª. V Simposio Nacional sobre control de la Degradación y Uso Sostenible del Suelo. Murcia, España. 27-30 junio (pp. 165-168). <https://tinyurl.com/2bgqtwsx>
- Bodoque, J. M., Pedraza J., Marín-Duque, J. F., Sanz, R. M., Díez, A. y Mattera, M. (2001). Evaluación de la degradación específica en la cuenca vertiente al embalse del Puente Alta (Segovia). *Rev. C. & G.*, 15(3-4): 21-36.
- Bu, Z. H., Tang, W. L., Yang, L. Z., Xi, C. F., Liu, F. X., Wu, J. Y., *et al.* (2003). The progress of quantitative remote sensing method for annual soil losses and its application in Taihu-Lake Watersheds. *Acta Pedol Sin*, 40(1), 1–9. (in Chinese).
- Casalí, J., López J. J. y Giráldez. J. V. (1999). Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra, España: Descripción y cuantificación. *Ingeniería del Agua*. 6 (3): 251-258.

- Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). *Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.*
- Colegio de Postgraduados. (1991). *Manual de conservación del suelo y del agua*. Tercera edición. Chapingo, México.
- CONAGUA. (8 de octubre de 2020). *Información estadística climatológica*.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez Trinidad, S. y Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, núm. 88, pp. 6-18.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez-Trinidad, S. y Quintanar, E. (2013). Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Elsevier B.V. Catena* 104: 280-287.
- Diyabalanage, S., Samarakoon, K.K., Adikari, S.B. y Hewawasam T. (2017). Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka. *Applied Geography*, 79: 103-114, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.004>.
- Ghosal, K. y Das Bhattacharya, S. (2020). A review of RUSLE Model. *J Indian Soc Remote Sens* 48 (689–707). <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>
- Gutiérrez Gutiérrez, M. (2002). *Comparación de los métodos directo e indirecto en la estimación de la erosión hídrica*. Tesis (Ingeniero Forestal) - UANL Facultad de Ciencias Forestales.
- Hellin, J. (2004). De erosión de suelos a suelos de calidad. *LEISA Revista de Agroecología* Vol. 19:(4), pp. 6-8.
- Hudson, N. (2006). *Conservación del suelo*. Reverté. <https://tinyurl.com/y26rr4oe>
- Hurni, H. (1985). *Soil conservation manual for Ethiopia*.
- INEGI. (1982). *Carta topográfica. México*, INEGI.
- INEGI. (1999). *Carta topográfica escala 1:50 000, Linares G14C58, Nuevo León y Tamaulipas*. México.
- INEGI. (2005). *Conteo de población y vivienda 2005*. Indicadores del censo general de Población y vivienda., México.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León, México*.

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). *Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.*

INEGI. (2022). *Aspectos geográficos de Nuevo León. México, INEGI.*
https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_19.pdf

Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1995). *'Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México.*

Karydas, C. G., Sekuloska, T., y Silleos, G. N. (2009). Quantification and site-specification of the support practice factor when mapping soil erosion risk associated with olive plantations in the Mediterranean island of Crete. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149: 19–28. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0179-8>

Kearney, S. P., Fonte, S. J., García, E., y Smukler, S. M. (2018). Improving the utility of erosion pins: absolute value of pin height change as an indicator of relative erosion. *CATENA*, (163) 427–432. doi:10.1016/j.catena.2017.12.008

Kenneth, N., Folliott, P., Gregersen, H. y Thames, J. (1993). *Hydrology and the Management of Watershed*, Iowa State University Press; Iowa, USA.

Lal, R., Blum, W., Valentine, C. y Stewart, B.A. (1998). *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press. Boca Ratón, USA. 558 pp.

Ludwig, J. A. y Tongway, D. J. (1995). Spatial organisation of landscapes and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology*, 10(1): 51-63. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00158553>

Martínez, I., Pantoja, G., Cancán, E., Limaico, D., Vizcaíno, M., Añazco, M. y Uribe, H. (2019). Evaluación de la erosión y selección de especies forestales para la rehabilitación de suelos degradados de origen volcánico de Ecuador. *AGROSUR* 47(3): 55-62. DOI:10.4206/agrosur.2019.v47n3-06

Morgan, R.P.C. y Nearing M. (2011). *Handbook of erosion modelling*. Jhon Willey & Sons.

Palma-López, D. J. y Shirma Torres, E. D. (21-25 noviembre de 2011). *Degradación de suelos por erosión hídrica y técnicas de conservación de suelos en Tabasco. XXXVI Congreso nacional de la ciencia del suelo. San Francisco de Campeche, Campeche.*

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E. H., Poesen, J., y Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental science & policy*, 51, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>
- Pando Moreno, M., Gutiérrez Gutiérrez, M., Maldonado Hernández, A. y Jurado Ybarra, E. (2002). Evaluación de los procesos de desertificación en una cuenca hidrológica del NE de México. *Ciencia UANL*. Vol. 5(4) pp. 519-524.
- Pando Moreno, M., Gutiérrez Gutiérrez, M., Maldonado Hernández, A., Palacio Prieto, J. L. y Estrada Castellón, E. A. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51: 23-36.
- Pereyra D. D., Gómez R. L. y Loeza H. F. (2005). Pérdidas de suelo por erosión hídrica. 85-102. En Rivera T. F., Gutiérrez L. A., Val S. R., Me-jía S. R., Aparicio M. F. J. y Días F. L. L., (Eds.) *La medición de los sedi-mentos en México*. Ediciones IMTA-UJAT. México. 318 pp.
- Phinzi, K. y Ngetar, N. S. (2019). The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. *International Soil and Water Conservation Research*, 7 (1): 27-46.
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdez, R., Olivares, C. y Balocchi, F. (2010). Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. *Aqua-LAC*. Vol. 2(2), pp. 1-11.
- Pizarro, T. y Cuitiño, M., H. (2002). Método de Evaluación de la Erosión Hídrica Superficial en Suelo Desnudo en Chile. *Cuad. Soc. Esp. Ciencia Forestal*, (13) ,165-170.
- Prasannakumar, V., Shiny, R., Geetha, N., y Vijith, H. (2011). Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences*, 64, 965–972.
- Renger, M., Wessolek, G., List, B. y Seyfert, R. (1987). Beziehungen zwischen Bodenfarbe und Humusgehalt. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Gesellsch.* 55:821–826.

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). *Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.*

Rivera Ortiz, P., Andrade Limas, E. y de la Garza Requena, F. (2012). Estudio de caso 1. Comunidad San Antonio, Jaumave. Cuantificación, dinámica y evolución de la erosión del suelo. En: (Coord: Andrade Limas E., F. Belmonte Serrano y A. Romero Díaz). *Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos. Regiones Norte y Altiplano de Tamaulipas, México.* Ediciones de la Universidad de Murcia, España. Pp 159-202.

Salumbo, A.M. de O. (2020). A Review of Soil Erosion Estimation Methods. *Agricultural Sciences*, 11: 667-691. <https://doi.org/10.4236/as.2020.118043>

Schlichting, E. y Blume, H.P. (1966). *Bodenkundliches Praktikum.* Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin, 209 págs.

SEMARNAT-COLPOS. (2002). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Memoria Nacional.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Colegio de Posgraduados. Montecillo. México. 68 p.

SEMARNAT-COLPOS. (2002). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Memoria Nacional.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Colegio de Posgraduados. Montecillo. México. 68 p.

Singh, G. (1981). *Soil loss and pre-diction research in India.* Dehra Dun: Central Soil and Water Conservation Research Training Institute.

Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R. y Iaquina, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*, Vol. 112, (3–4): 228-245. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.009>

Tian, P., Zhu, Z., Yue, Q., He, Y., Zhang, Z., Hao, F., Guo, W., Chen, L. y Liu, M. (2021). Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 9 (3): 433-444. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.04.007>

Carolina Guadalupe Hernández García. (2022). *Efecto de las obras de conservación del suelo sobre la erosión hídrica en una localidad de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.*

Vásquez, A. y Tapia M., M. (2011). Cuantificación de erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *Revista INGENIERIA UC*, 18(3): 42-50.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70723269005>

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. U.S. Dep. Agric. Handb. No. 537.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. y Cross, B.V. (1971) A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, 189-193.

Xiong M., Sun R., y Chen L. (2018). Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis. *Science of the Total Environment* 645: 753–760.

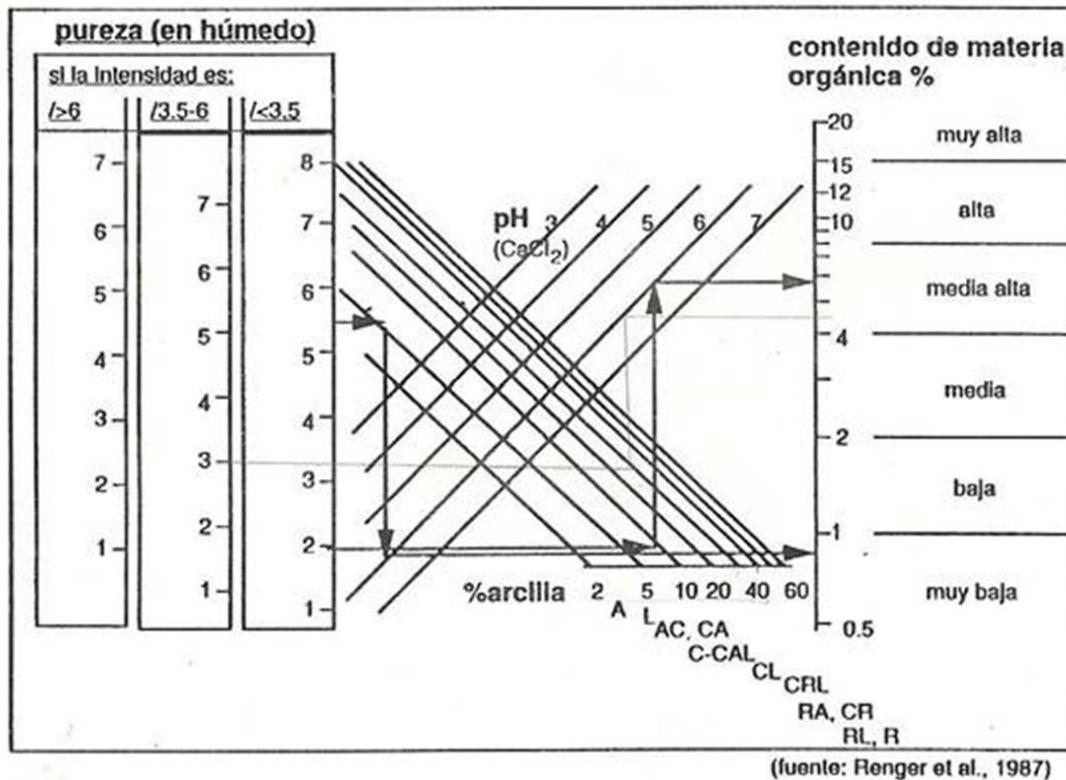
ANEXOS

Anexo 1. Claves para la designación de clases texturales en la evaluación de suelos en el campo.

No.	Características	Ir al No.	Textura	Clave
1	Intentar formar con la muestra un rollito del grosor de un lápiz: a) moldeable; b) no moldeable	4 2		
2	Palpar la consistencia entre los dedos índice y pulgar a) adhesiva, se adhiere al dedo b) no adhesiva, no moldeable	3	Franco arenosa	CA
3	Frotar la muestra entre las palmas de las manos a) consistencia muy harinosa, no se perciben granos de arena. b) consistencia muy harinosa y se perciben granos de arena (<50% de arena) c) muy arenosa (50-85% arena), queda material fino en las líneas de las manos d) muy arenosa (>85% arena), no queda material fino en las líneas de las manos		Limosa Franco limosa gruesa Arenosa franca Arenosa	L CLg AC A
4	Intentar moldear un rollo del grosor de una aguja de tejer a) moldeable, superficie opaca, consistencia harinosa; b) moldeable, consistencia plástica, pegajosa; c) no moldeable, se adhiere al dedo, se perciben granos de arena (>46% arena)	5 6	Franco arcillo arenosa	CRA
5	Evaluar la consistencia a) adhesiva, harinosa, se agrieta fácilmente al presionarla; b) ligeramente harinosa, casi no se agrieta, muy moldeable c) granos de arena visibles y perceptibles, se agrieta al presionar		Franco limosa fina Franco arcillo-limosa Franca	CLf CRL C

6	<p>Evaluar la superficie de la muestra después de friccionarla con la uña del dedo</p> <p>a) superficie opaca o con brillo tenue, casi no se perciben granos de arena</p> <p>b) superficie opaca a ligeramente brillante, granos de arena perceptibles</p> <p>c) superficie brillante</p>	7	<p>Franco arcillosa</p> <p>Arcillo arenosa</p>	<p>CR</p> <p>RA</p>
7	<p>Evaluar la consistencia entre los dientes</p> <p>a) rechina</p> <p>b) consistencia de mantequilla</p>		<p>Arcillo limosa</p> <p>Arcillosa</p>	<p>RL</p> <p>R</p>

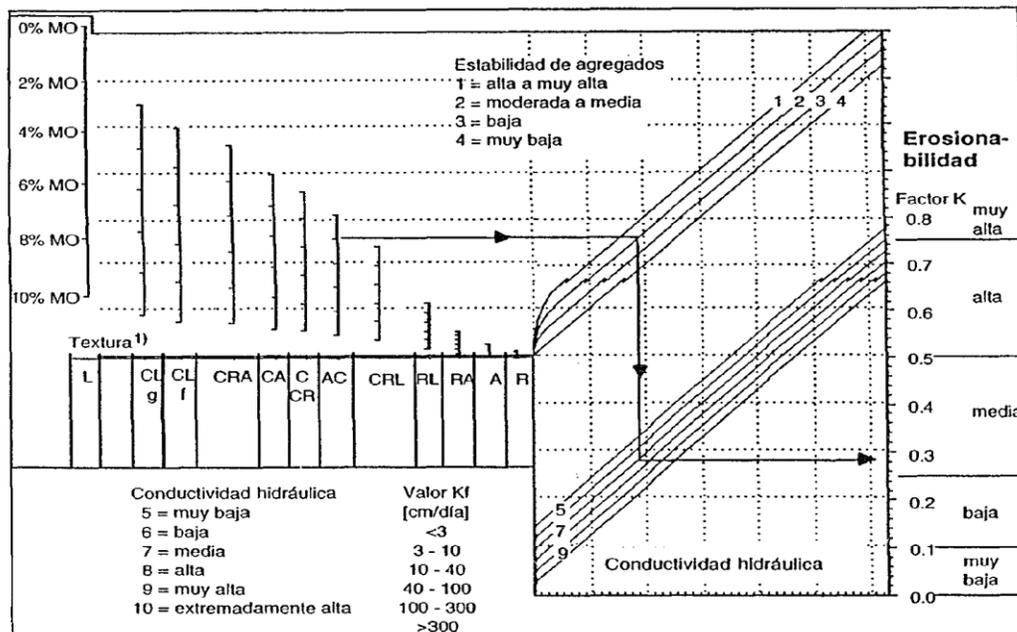
Anexo 2. Nomograma para definir el porcentaje de materia orgánica (Renger *et al.*, 1987)



Anexo 3. Nomograma para determinación de conductividad hidráulica

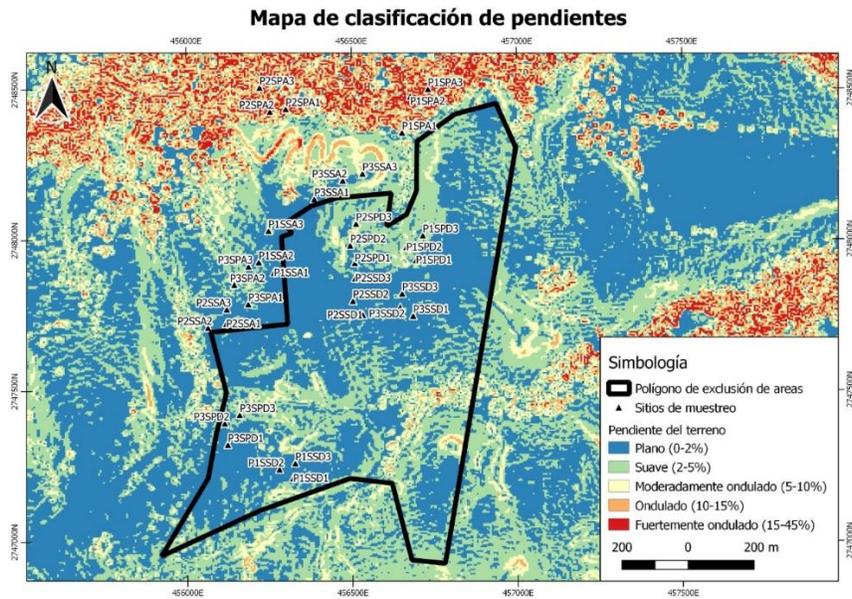
Textura 1)	Densidad aparente		
	Baja	Mediana	Alta
	Conductividad hidráulica (Kf) [cm/día]		
Arena gruesa	>300	>300	100-300
Arena media	>100	>100	40-100
Arena fina	100-300	40-100	10-40
CA	40-100	10-40	1-10
AC, CRA	100-300	40-100	1-40
L, CAL, CL	40-100	10-40	<1-10
C	100-300	10-100	<1-10
CRL	40-100	10-40	<1-10
CR, RA, RL, R	40-300	10-40	<1-10

Anexo 4. Nomograma para determinar la erodabilidad del suelo (Factor K) (Wischmeier *et al.*, 1971).



(fuente: Wischmeier *et al.*, 1971, modificado)

Anexo 5. Mapa de clasificación de pendientes (Realización: Reyna, A. M.)



Anexo 6. Cuadro de valores para calcular factor de cobertura “C” (U. S Soil Conservation Service tomado de Kenneth et al., 1993).

Tipo de Vegetación	Altura Efectiva (m)	% de cobertura	Residuo o vegetación en la superficie del suelo Porcentaje de cobertura de la superficie (a)						
				(b)	(c)	0	20	40	60
Sin vegetación			P	.45	.20	.10	.042	.012	.003
			H	.45	.24	.15	.091	.043	.011
Herbáceas grande o arbustos chicos	0.5	25	P	.36	.17	.09	.038	.013	.003
			H	.36	.20	.13	.083	.041	.011
		50	P	.26	.13	.07	.035	.012	.003
			H	.26	.16	.11	.076	.039	.011
75	P	.17	.10	.06	.032	.011	.003		
	H	.17	.12	.09	.067	.038	.011		
Arbustos o matorrales	2.0	25	P	.40	.18	.09	.040	.013	.003
			H	.40	.22	.11	.087	.042	.011
		50	P	.34	.16	.085	.038	.012	.003
			H	.34	.19	.13	.082	.011	.011
75	P	.28	.14	.08	.036	.012	.003		
	H	.28	.17	.12	.078	.040	.011		
Arboles	4.0	25	P	.42	.19	.10	.041	.013	.003
			H	.42	.23	.14	.089	.042	.011
		50	P	.39	.18	.09	.040	.013	.003
			H	.39	.21	.14	.087	.042	.011
75	P	.36	.17	.09	.039	.013	.003		
	H	.36	.20	.13	.084	.041	.011		