



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

RELACIÓN ENTRE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL GRADO DE EROSIONABILIDAD DE DOS UNIDADES DE SUELO DEL NORTE Y CENTRO DE MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

ING. JESÚS EMMANUEL PÉREZ SALINAS

DIRECTOR DE TESIS

DR. ARMANDO LÓPEZ SANTOS



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bermejillo, Durango, México. Mayo de 2017



La presente tesis de Maestría titulada “RELACIÓN ENTRE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL GRADO DE EROSIONABILIDAD DE DOS UNIDADES DE SUELO DEL NORTE Y CENTRO DE MÉXICO” fue realizada por el Ing. Jesús Emmanuel Pérez Salinas, ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas**

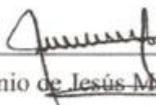
COMITÉ ASESOR

DIRECTOR:



Dr. Armando López Santos

CO-DIRECTOR:



Dr. Antonio de Jesús Morán Jiménez

ASESOR:



Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

ASESOR:



M.C. Palmira Bueno Hurtado

ASESOR:



Dr. José Villanueva Díaz

ÍNDICE

DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. General	4
2.2. Específicos	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. Marco conceptual de referencia	5
3.2. Recurso Suelo	5
3.3. Erosión	7
3.4. Erosión hídrica	8
3.5. Tipos de erosión hídrica	9
3.5.1. Erosión por salpicadura	10
3.5.2. Erosión laminar	10
3.5.3. Erosión en surcos	11
3.5.4. Erosión remontante	12
3.5.5. Erosión por caminos	12
3.5.6. Erosión en pedestales	12
3.5.7. Erosión en pináculos	13
3.5.8. Erosión en cárcavas	13
3.5.9. Erosión por flujo subsuperficial	14
3.6. Proceso de erosión hídrica	14
3.6.1. Etapa de desprendimiento	14
3.6.2. Etapa de arrastre o transporte	15
3.6.3. Etapa de deposición o sedimentación	15
3.7. Factores que propician la erosión hídrica	15
3.7.1. El suelo	15

3.7.2.	Precipitación	15
3.7.3.	Escurrimiento	16
3.7.4.	Pendiente	16
3.7.5.	Actividad humana	16
3.7.6.	Clima.....	17
3.7.7.	Topografía	17
3.8.	Ecuación universal de pérdida de suelo	18
3.8.1.	Factor R.....	19
3.8.2.	Factor K.....	20
3.8.3.	Factor LS.....	21
3.8.4.	Factor C.....	22
3.8.5.	Factor P	23
3.9.	Erosionabilidad	23
3.10.	Cálculo de la erosionabilidad	24
3.10.1.	Materia orgánica en el suelo (MOS)	25
3.10.2.	Textura	25
3.10.3.	Densidad aparente	26
3.10.4.	Estructura	26
3.10.5.	Permeabilidad y tasa de infiltración en suelo	27
3.11.	Degradación y pérdida de suelo	28
3.11.1.	Pérdida de suelo por salpicamiento	29
3.11.2.	Transporte de sedimentos	30
3.12.	Límite de tolerancia de pérdida de suelo.....	31
3.13.	Cambio climático.....	32
3.14.	Descripción de las Unidades de Suelo del estudio	34
3.14.1.	Unidad de suelo I: Calcisol (CL)	34
3.14.2.	Unidad de suelo II: Phaeozem (PH).....	34
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	35
4.1.	Descripción general.....	35
4.2.	Áreas de estudio	35
4.2.1.	Unidad de suelo I	35
4.2.2.	Unidad de suelo II.....	36

4.3.	Diseño experimental y tratamientos	37
4.4.	Implementación y épocas de medición	39
4.5.1.	Determinación de textura y MOS	40
4.5.2.	Densidad aparente y porosidad del suelo	41
4.5.3.	Pruebas de infiltración y conductividad hidráulica	42
4.6.	Cálculo de erosionabilidad	44
4.7.	Muestreo y cálculo de sedimentos	45
4.8.	Cálculo de intensidad de lluvia	46
5.	RESULTADOS Y DISCUSION	48
5.1.	Caracterización física del suelo y de los procesos en los sitios de estudio	48
5.1.1.	Determinación de las características físicas de suelo	48
5.1.2.	Conductividad hidráulica	50
5.2.	Determinación del factor de erosionabilidad	54
5.3.	Pérdida de suelo	56
5.3.1.	Relación entre Intensidad de lluvia y pérdida de suelo	61
5.4.	Relación arrastre de sedimento/erosionabilidad	64
6.	CONCLUSIONES	67
7.	LITERATURA CITADA	68

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones para el cálculo de R en México.	20
Cuadro 2. Límites permisibles de pérdida de suelo.	32
Cuadro 3. Clasificación de la Materia orgánica en base a su porcentaje.	41
Cuadro 4. Contenido de humedad a punto de marchitez permanente.	43
Cuadro 5. Rangos de Conductividad Hidráulica propuesta por The U.S. Soil Conservation Service	43
Cuadro 6. Factores de erosionabilidad del suelo asociados a la textura y contenido de materia orgánica del suelo	45
Cuadro 7. Características físicas del suelo. US-CLadlv/2 y US-PHablep/2.	49
Cuadro 8. Humedad medida en suelo antes y después de las pruebas de infiltración, CC y PMP en las unidades de estudio.	51
Cuadro 9. Tasas de infiltración inicial y final para Ft y Fe, medidos en campo y estimados con el modelo K-L, para la US-CLadlv/2 y US-PHablep/2.	53
Cuadro 10. Factor K calculado en base a textura y MOS para las tres parcelas de estudio, expresado en (T ha h MJ mm ha ⁻¹).	55
Cuadro 11. Valores calculados del factor K usando variables requeridas y la ecuación de regresión.	56
Cuadro 12. Medias de pérdida de suelo (t ha ⁻¹) para T1, T2 y T3 en US-PHablep/2. Prueba de Tukey (P ≤ 0.05). Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relaciones entre las características básicas, las propiedades físicas y las cualidades agrícolas del suelo (Fuente: Coras-Merino, 2003).	6
Figura 2. Proceso de erosión. (Fuente: Ibáñez, 2012).	7
Figura 3. Etapas del proceso de erosión hídrica (Fuente: NRCS, 2009).	9
Figura 4. Tipos de erosión hídrica más comunes. (Fuente: Romero et al., 2008).	10
Figura 5. Esquema teórico sobre los factores intrínsecos y extrínsecos que derivan en la erosionabilidad dando lugar a la erosión. (Fuente: López-Santos et al., 2009).	24
Figura 6. Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua. (Fuente: Boggs, 2006).	31
Figura 7. Áreas de estudio: Sitio 1, Unidad de Suelo Calcisol en Santo Domingo, San Pedro del Gallo, Durango (a); Sitio 2, Unidad de Suelo Phaeozem en CCA – La Posta, Jesús María, Aguascalientes (b).	37
Figura 8. Implementación de módulos de sedimentación en la Unidad de Suelo tipo Calcisol en San Pedro del Gallo, Durango.	38
Figura 9. Implementación de módulos de sedimentación en la Unidad de Suelo Tipo Phaeozem en Jesús María, Aguascalientes.	38
Figura 10. Modelos Kostiakov-Lewis de infiltración para las parcelas 1, 2 y 3 de la Unidad de Suelo tipo Calcisol (US-CLadlv/2).	52
Figura 11. Modelos Kostiakov-Lewis de infiltración para las parcelas 1, 2 y 3 de la Unidad de Suelo tipo Phaeozem (US-PHablep/2).	52
Figura 12. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T1: Suelo desnudo.	57
Figura 13. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T2: Condición natural.	57
Figura 14. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T3: Barbecho.	58
Figura 15. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T1: Suelo desnudo.	59
Figura 16. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T2: Barbecho.	60
Figura 17. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T3: Barbecho con esquilmo.	61
Figura 18. Análisis de regresión lineal entre pérdida de suelo e Intensidad de lluvia en la US-CLadlv/2: a: T1, Suelo desnudo; b: T2, Condición natural; c: T3, Barbecho.	63
Figura 19. Análisis de regresión lineal entre pérdida de suelo e Intensidad de lluvia en la US-PHablep/2: a: T1, Suelo desnudo; b: T2, Barbecho; c: T3, Barbecho con esquilmo.	63
Figura 20. Relación entre valores de erosionabilidad y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2 *Las parcelas 1, 2 y 3 corresponden a los diferentes tipos de manejo aplicados T1, T2 y T3 respectivamente.	66
Figura 21. Relación entre valores de erosionabilidad y pérdida de suelo en la US-PHablep/2 *Las parcelas 1, 2 y 3 corresponden a los diferentes tipos de manejo aplicados T1, T2 y T3 respectivamente.	66

DEDICATORIA

A mi Nación “Estados Unidos Mexicanos”: espero este trabajo contribuya, aunque sea mínimamente, a regresar algo de lo mucho que México me ha dado.

A mi familia:

Mis padres: Rafael Pérez Palacio, María Sonia Salinas Castruita

Mi hermana Shaila Nayeli Pérez Salinas

Mi tía Alondra Xitlali Flores Castruita

A mis pequeños primos: Arturo Padilla Flores, Tania Lizeth Padilla Flores y a mi pequeño sobrino: Dante Pérez Salinas.

Y una dedicatoria muy especial para la persona que más quise en este mundo:

Mi abuela Juana Castruita Tapia

Y también

Mi abuelo Heriberto Flores

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por todo el gran apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) la Universidad Autónoma Chapingo y al Centro de Ciencias Agropecuarias (CCA) de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Al CENID RASPA, por su apoyo en el proyecto.

Al Dr. Armando López Santos por haber sido mi mentor y ofrecerme sus valiosos conocimientos, apoyo, dedicación y tiempo para mejorar mi formación durante estos años y por alentarme y asesorarme en cada fase de la investigación realizada.

Al Dr. Miguel Velásquez por haber contribuido valiosamente en este trabajo, por su gran conocimiento del tema. También por su actitud, simpatía y disponibilidad para hacer de mí una persona mejor preparada. Al Dr. Jesús Meráz por todo su apoyo en la fase experimental de Aguascalientes, por su consejo, disponibilidad y su irreverente personalidad. A la M.C. Palmira Bueno Hurtado, por sus consejos, su sabiduría, experiencia, apoyo y sobre todo por la gran simpatía que siempre la caracteriza. Al Dr. José Villanueva, por sus aportes y consejos en esta investigación.

Al Laboratorio de Análisis de Sistemas Agrícolas y Recursos Naturales del Centro de Ciencias Agropecuarias de la UAA “La Posta”, destacando a Jorge Alejandro Torres González y Francisco Guerra, muchas gracias por su valiosa ayuda, colaboración y gran apoyo.

A mis compañeros y amigos de generación: Alma Rosa Álvarez, Monserrat Rodríguez, Sandra Maciel, Maggie Rivas, Elena Villarreal, Blenda Girón y Pedro Galaviz.

A mis amigos y profesores por haber contribuido de alguna u otra manera: Kenia Jiménez, Alondra Chávez, Rodrigo Aguirre, Pamela Manzanares, Ismael Verdugo, Neiry Alvarado, Aleida Gómez, Mario Márquez, Daniel Sánchez, Abel Amaya, Martín de Loera, Eduardo Betancourt, Sinuhé Rodríguez, el Dr. Castro, el Maestro Gonzalo Hernández.

A los paisanos: Noel Andrade, Lupillo Castañeda, Adán Rivas, Omar Quiñones.

Y muy especial agradecimiento a “*Los Rojos*” que en diversas ocasiones me apoyaron en la realización de este proyecto y por brindarme su valiosa amistad: Enrique Martínez, Fernando Simental, Pedro Renteria, Alberto Moroyoqui y Daniel Molina.

A todas las personas que en diferentes etapas han pasado a formar parte de mi vida y a todas aquellas personas que me han hecho aún más fuerte.

DATOS BIOGRÁFICOS

El C. Ingeniero Jesús Emmanuel Pérez Salinas es egresado de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), generación 2008-2013. En este periodo se relacionó con proyectos de valor agregado de productos caseros, Huertos familiares y extensionismo bajo el programa PESA-FAO. Al término de licenciatura realizó su estancia pre profesional bajo el programa *on the job-Training* en la empresa Speedling Inc, en Sun City, Florida recibiendo preparación de manera paralela por parte de la Universidad Estatal de Ohio.

Su primera experiencia profesional se realizó en una unidad de la empresa Speedling Inc. en Watsonville, California, encargándose de proyectos de evaluación de enraizadores para plántula de nochebuena y asistente de ventas y calidad. En 2014 colaboró en el proyecto SGIH-GUR-UACH-14-001-RF-CC en colaboración con CONAGUA realizando trabajos de caracterización de pozos de riego y manejo de datos utilizando sistemas de información geográfica para el estado de Coahuila.

Durante los años 2015 a 2016, realizó sus estudios de posgrado en el programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en URUZA – UACH. Su investigación titulada “Relación entre la erosión hídrica y el grado de erosionabilidad de dos unidades de suelo del Norte y Centro de México” fue dirigida por el Dr. Armando López Santos. Realizando estancias cortas en el Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y colaborando con proyectos del Centro Interdisciplinario de Relaciones agua, suelo, planta (CENID RASPA) del INIFAP.

Relación entre la erosión hídrica y el grado de erosionabilidad de dos unidades de Suelo del norte y centro de México
Hydric erosion and erodibility grade relationship in two different Soil Units in northern and center Mexico

Pérez-Salinas, Jesús Emmanuel¹, López-Santos, Armando²

RESUMEN

Las tierras áridas ocupan gran parte del territorio de México, donde la degradación de los suelos se ha agravado en los últimos años. Diversas metodologías se han diseñado para la estimación de pérdida de suelo, destacando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS). De la cual se deriva el factor de erosionabilidad (Factor K) que determina la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y se relaciona estrechamente con la pérdida de suelo. El objetivo de este estudio fue generar un análisis del factor K en dos Unidades de Suelo distintas (Calcisol y Phaeozem) y evaluar el comportamiento de pérdida de suelo bajo diferentes condiciones de manejo: suelo desnudo (*T1*), condición natural (*T2*) y barbecho (*T3*) para la Unidad de Suelo Calcisol arídico-lúvico (US-CLadlv/2), y; suelo desnudo (*T1*), barbecho (*T2*) y barbecho con esquilmo (*T3*) en la Unidad de Suelo Phaeozem albico-epileptico (US-PHablep/2). El experimento 1 se ubicó en el Norte centro de Durango (25°49'29.6" N, -104°26'07.6" O), y el experimento 2 en el centro-Norte de Aguascalientes (21°58'21.22" N, -102°22'25.58" O). Se colectaron muestras de suelo de 0-30 cm para determinaciones de materia orgánica y clase textural. También se determinó clase de permeabilidad y estructura. El factor K se obtuvo con tablas de referencia y con la ecuación derivada de la EUPS. La pérdida de suelo se midió de forma directa e interrelacionado con eventos de lluvia. Los resultados arrojaron que el valor de K para el sitio 1 con las tablas de referencia fue de 0.031 (t ha h/MJ mm) en promedio para la US-CLadlv/2 mientras que con la ecuación se obtuvo un promedio de 0.027 (t ha h/MJ mm), encontrando hasta un 0.37 % de discrepancia. En cuanto a pérdida de suelo, *T1* mostró la tasa más alta de pérdida con 0.043 t ha⁻¹ y *T3* presentó las tasas más bajas con 0.033 t ha⁻¹. Por otro lado, la US-PHablep/2 tuvo un promedio de K de 0.038 t ha h/MJ mm con tablas de referencia y un promedio de 0.020 t ha h/MJ mm con la aplicación de la ecuación presentando tan solo un 1.73% de discrepancia. Los valores de pérdida de suelo en este sitio fueron más altos en *T1* con 0.338 t ha⁻¹ y más bajos con *T3* con 0.054 t ha⁻¹.

Palabras clave: Erosión, erosionabilidad, arrastre de sedimentos

ABSTRACT

Arid lands occupy most of the territory of Mexico, where soil degradation has aggravated in the last years. Several methodologies have been designed for soil loss estimation, where the Universal Soil Loss Equation (USLE) highlights. From which the K factor (erodibility) is derived and it determines the susceptibility of the soil to be eroded and is closely related to the loss of soil. The aim of this study was to generate a preliminary analysis of K factor in two different soil units (Calcisol and Phaeozem) and to evaluate soil loss behavior under different management conditions: bare soil (*T1*), natural condition (*T2*) and fallow (*T3*) at Calcisol Soil Unit (CLadlv/2-SU), and; bare soil (*T1*), fallow (*T2*) and Fallow with crop residues (*T3*) at Phaeozem Soil Unit (PHablep/2-SU). Experiment 1 was located in the north center of Durango (25 ° 49'29.6 "N, -104 ° 26'07.6" O), and the 2nd experiment was established at north center of Aguascalientes (21 ° 58'21.22 ° N, -102 ° 22'25.58 ° C). Soil samples of 0-30 cm depth were collected for determinations of soil organic matter and textural class. Permeability class and structure were also determined. The K factor was obtained using reference tables and was determined with the equation derived from USLE. Soil loss was measured directly and interrelated with rainfall events. The results showed that K value for CLadlv/2-SU with the reference tables was 0.031 t ha h/MJ mm on average, and with the equation an average of 0.027 was obtained, finding up to 0.37% of discrepancy. Regarding to soil loss, *T1* presented the highest values of soil loss with 0.043 t ha⁻¹, and *T3* the smaller ones with 0.033 t ha⁻¹. In the other hand, the PHablep/2-SU had a K average of 0.038 t ha h/MJ mm with reference tables and an average of 0.020 t ha h/MJ mm with the application of the equation presenting only a 1.73% discrepancy. Soil loss values at this site were higher in *T1* with 0.338 t ha⁻¹ and lower with the Fallow with crop residues treatment with 0.054 t ha⁻¹.

Key words: Erosion, erodibility, sediment entrainment

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso crítico y en gran parte no renovable, debido a que está sometido a una presión productiva cada vez mayor. La erosión es un fenómeno geológico natural causado por el desprendimiento de partículas del suelo a causa de la acción del agua o el viento, que las depositan en otro lugar. Sin embargo, este fenómeno a su vez es afectado por las actividades humanas que pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión, la agricultura convencional ha provocado un aumento de dichas tasas de manera considerable (González-Sánchez, 2003).

En la actualidad la erosión edáfica que se produce por la acción del agua es considerada como la principal causa de la degradación de la tierra a nivel global, ya que, debido a éste fenómeno el 56% de las 3.5 billones de hectáreas presentan algún grado de deterioro, donde se asientan alrededor de 1.5 billones de personas (Nkonya *et al.*, 2011; UNCCD, 2013; Stavi and Lal, 2014).

El proceso de la erosión está estrechamente vinculado con la desertificación y el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad, lo que acentúa los índices de pobreza y migración, disminución de la productividad del suelo e incrementa la frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales, abandono de tierras por efectos de la sequía y desertificación (González *et al.*, 2016).

Esta forma de degradación ha cobrado interés mundial (Romero *et al.* 2009; Duran *et al.* 2012) y se ha documentado por diversos estudios enfocados a la evaluación, el análisis de riesgo, el mapeo y el monitoreo a diferentes escalas; la modelación y construcción de escenarios de erosión (Romero *et al.* 2009; Castro, 2013; Sánchez *et al.*, 2013). Estos trabajos se han llevado a cabo simultáneamente con desarrollo y aplicación de diversos modelos, tales

como USLE, EPIC, WEPP, SWAT, RUSLE, por mencionar algunos. Sin embargo, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) o alguna de sus modificaciones o revisiones (RUSLE/MUSLE) constituyen el modelo más difundido en evaluaciones de pérdida de suelo por erosión hídrica (Verbist *et al.* 2010; Vich *et al.* 2010) y pese a que se considera un modelo que sobrestima fuertemente sus evaluaciones, es uno de los modelos más aplicados en algunos países europeos (Cantón *et al.* 2011).

De dicha ecuación se deriva el factor de erosionabilidad del suelo (K), el cual permite determinar la susceptibilidad de un determinado suelo a ser erosionado, y es uno de los factores más importantes en los modelos de erosión. El factor K permite inferir el grado de riesgo de un suelo a ser erosionado y guarda una estrecha relación con el arrastre de sedimentos ya que permite predecir bajo ciertas condiciones como podría desarrollarse dicho arrastre (Brea y Balocchi, 2010).

En México, la pérdida de la capa arable de los suelos es uno de los principales problemas. La causa principal se debe al común denominador del mal manejo del suelo por el hombre, causando la erosión hídrica, con el consecuente empobrecimiento del suelo y la pérdida de su productividad (Mejía *et al.*, 2003).

De acuerdo con un trabajo realizado por López-Santos (2016), indica que aproximadamente un total de 1964 millones de hectáreas se encuentran con algún grado de afectación debido a problemas de degradación de la tierra a nivel mundial. Dentro de estas afectaciones, el 55.7% de la degradación es debido a la erosión hídrica. De igual manera, el mismo autor menciona que la situación para México en cuanto a la magnitud de degradación, no es del todo alentadora, basándose en tres estudios diferentes realizados en el país, de los cuales se menciona que en promedio 494.197 km² (aprox. 25.40% del territorio nacional) se encuentra bajo condiciones de degradación a causa de erosión hídrica.

La evaluación de la erosión del suelo es indispensable con fines de conservación. Al respecto, de Prada et al (2008), diferencia dos enfoques: a) Desde el punto de vista agrícola, para evitar la disminución en las tasas de producción; y b) desde el punto de vista ecológico, para mantener la funcionalidad y calidad de los suelos.

Sí bien, se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo incluso a nivel de cuenca hidrográfica y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas mediante parcelas de erosión o lotes de escurrimiento (Velásquez *et al.*, 1997; Flores *et al.*, 2009; Montes-León *et al.* 2011), poco se ha hecho por enfocar estudios con fines de planeación y diseño de prácticas de conservación de suelos o bien como diagnóstico de la situación del recurso natural suelo a nivel regional en México.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Evaluar la relación entre el proceso de erosión hídrica y el grado de erosionabilidad de dos unidades de suelo bajo tres condiciones de manejo, localizadas en el Norte y Centro de México.

2.2. Específicos

- a) Utilizar información climatológica para determinar su impacto sobre el factor K y en el proceso de erosión.
- b) Determinar las características edafológicas que influyen en la susceptibilidad a la erosión de los suelos, como son: textura, estructura (Da, porosidad), permeabilidad (infiltración, porcentaje de humedad, conductividad hidráulica) y la materia orgánica.
- c) Determinar el factor de erosionabilidad antes del establecimiento de los tratamientos y analizar su relación con el comportamiento de arrastre de sedimentos y los posteriores tratamientos aplicados.
- d) Cuantificar la tasa de erosión de suelo por evento de lluvia mediante el análisis de la relación entre la magnitud de sedimentos e intensidad de lluvia.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Marco conceptual de referencia

3.2. Recurso Suelo

La definición de suelo depende del área de interés que se involucra con él. Desde una visión geotécnica, es el material sin consolidar que se encuentra sobre el lecho rocoso. Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua. Desde una perspectiva ambiental, existen varias definiciones que incorporan su papel fundamental en los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realiza tales como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes (Astier-Calderón, 2002).

A partir de su origen y de los factores ambientales, la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés), lo define como la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó. Por ello, el suelo ya no es roca ni sedimento geológico, sino un producto proveniente de las alteraciones e interacciones que experimentan estos materiales (Sumner, 2000).

La siguiente figura muestra de manera desglosada las relaciones entre las características básicas del suelo con sus propiedades físicas y cualidades agrícolas (figura 1).

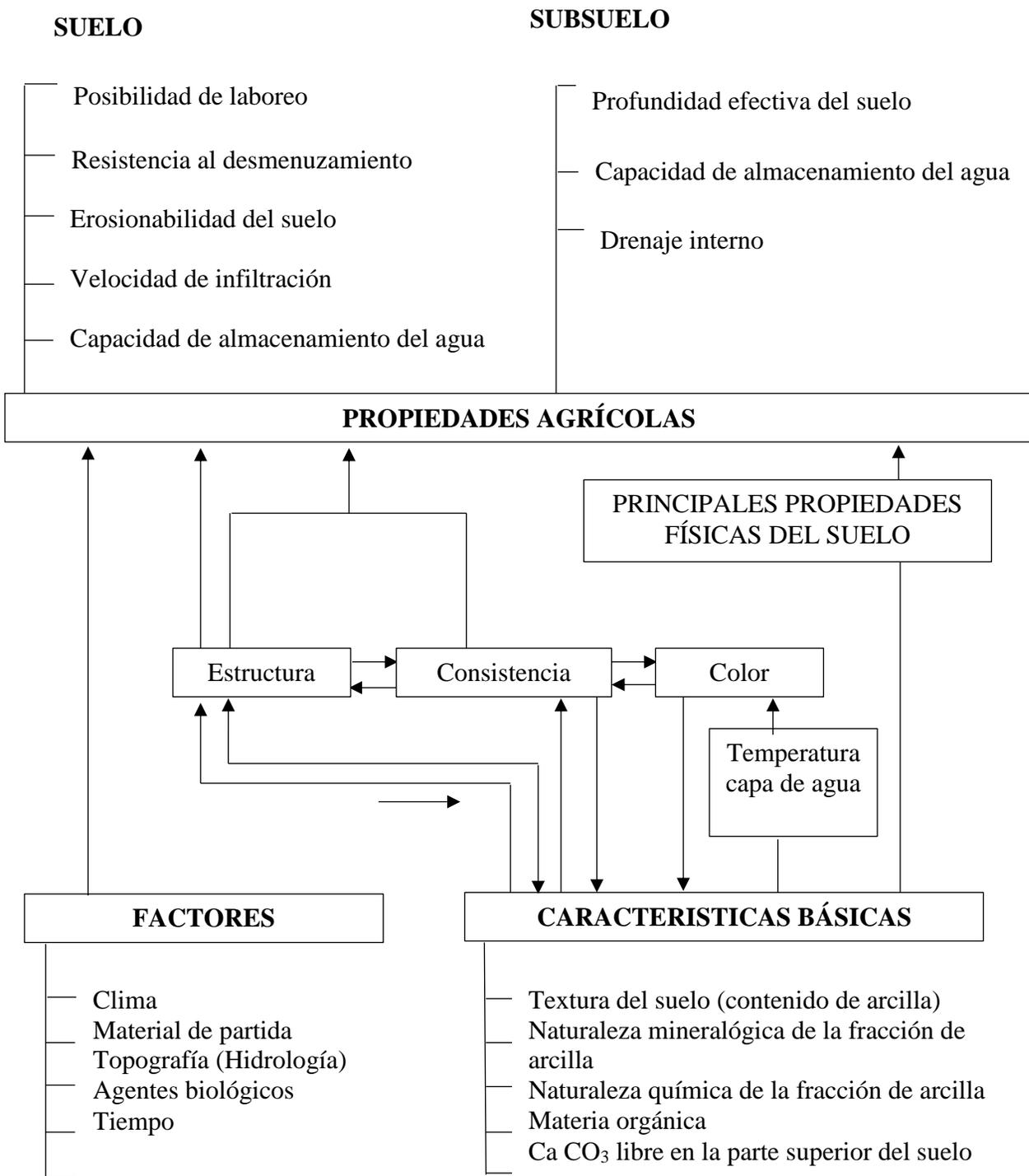


Figura 1. Relaciones entre las características básicas, las propiedades físicas y las cualidades agrícolas del suelo (**Fuente:** Coras-Merino, 2003).

3.3. Erosión

La erosión se produce por la desagregación y transporte de las partículas de suelo, dando semejanza a que la capa superficial es lavada o soplada, a veces hasta la roca madre. Se produce por diversos agentes erosivos, principalmente el agua y el viento, y su depositación ocurre cuando la energía de estos agentes es insuficiente para continuar con su transporte (Morgan, 1995; García *et al*, 2012). El proceso incluye el desprendimiento, transporte y deposición de partículas de suelo por fuerzas erosivas (figura 2) (Merritt *et al*. 2003).

Habitualmente nos referimos a la erosión como un fenómeno negativo, derivado de la acción del hombre. Sin embargo, se olvida frecuentemente que la erosión es un proceso natural controlado por la gravedad, a través del cual los relieves e irregularidades de la corteza terrestre se equilibran. Cuando el relieve de cualquier parte de la tierra sobrepasa un valor del ángulo de pendiente, el cual es característico para cada tipo de roca, regolito o suelo, la presión que ejerce la gravedad es tal que supera a la fuerza de cohesión y se producen derrumbes o los materiales caen pendiente abajo. Conforme la pendiente disminuye, esa presión es menor y los materiales son entonces mayoritariamente evacuados por el efecto de arrastre del agua (García-Fayos, 2004).

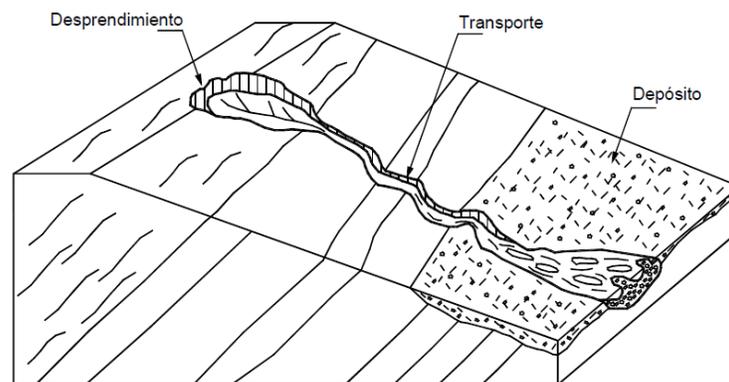


Figura 2. Proceso de erosión. (Fuente: Ibáñez, 2012).

3.4. Erosión hídrica

La erosión hídrica se inicia mediante una serie de procesos que se manifiestan en la capa superficial del suelo, que con el paso del tiempo se magnifican hasta incluir varias o incluso todas sus capas, llegando a cubrir grandes extensiones territoriales. La erosión del suelo por escurrimiento hídrico, que se origina por la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es posiblemente el tipo de erosión más importante de todos, dado que es irreversible y generalmente de magnitud significativa (Honorato *et al.*, 2001).

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento (desagregación), transporte y deposición de las partículas (sedimentación) de suelo por acción de los siguientes agentes principales (figura 3):

- La energía cinética de la gota de lluvia: Es el primer paso en el proceso de erosión hídrica, y comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie del suelo con una energía suficiente, produciendo la ruptura de los terrones y agregados, generando una salpicadura (erosión por salpicadura) que desprende partículas que luego son arrastrada pendiente abajo (SUDAS, 2006). Este fenómeno de disipación de la energía de la lluvia está relacionado a la pérdida de infiltración del suelo (Calegary *et al.*, 1998).
- La escorrentía en movimiento: Este agente erosivo produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Este agente produce los fenómenos erosivos más visibles (por ejemplo, cárcavas), y es el responsable del movimiento de las partículas de suelo removidas. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión

laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos), con una velocidad que puede llegar a 4 m/s, y que es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos (Cisneros *et al.* 2012).

- La gravedad: La sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está mojado y en ambientes de altas pendientes (Cisneros *et al.* 2012).

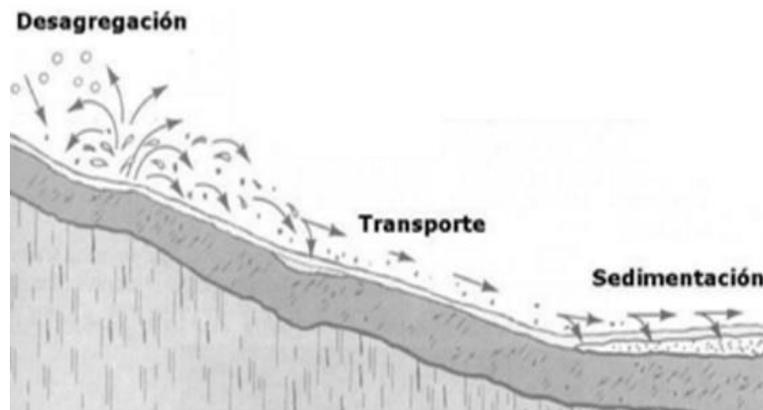


Figura 3. Etapas del proceso de erosión hídrica (**Fuente:** NRCS, 2009).

Su magnitud se ve afectada por varios factores, entre ellos: tipo de vegetación, intensidad de la lluvia, estado de crecimiento de la cubierta vegetal, estación del año y velocidad del viento (Cisneros *et al.* 2012).

3.5. Tipos de erosión hídrica

Los tipos de erosión hídrica a grandes rasgos son la erosión por salpicadura, la erosión laminar, la erosión en surcos y la erosión en cárcavas (figura 3), sin embargo, existen otros tipos de erosión hídrica como son la erosión remontante, en pináculos y pedestales. A continuación, se describen los tipos de erosión hídrica.

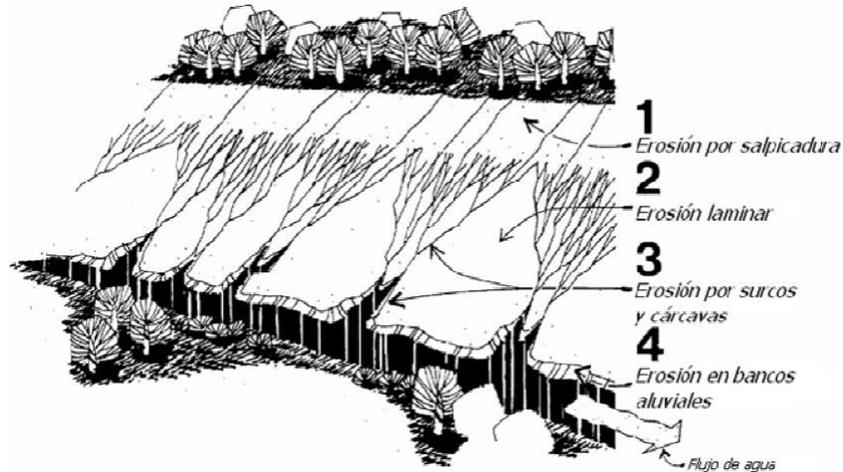


Figura 4. Tipos de erosión hídrica más comunes. (Fuente: Romero *et al.*, 2008).

3.5.1. Erosión por salpicadura

La erosión por salpicadura tiene lugar como consecuencia del impacto de la gota de lluvia sobre el terreno. Estos impactos compactan la superficie del suelo, rompen los agregados haciendo saltar las partículas, dejándolas expuestas y listas para ser arrastradas por el agua a la vez que sellan la superficie reduciendo la infiltración y aumentando el flujo superficial. Este tipo de erosión hídrica precede y condiciona a las demás, y su repercusión puede llegar a ser enorme, ya que, al romper los agregados estructurales del suelo, elimina la principal resistencia que presenta el suelo a la erosión (Bienes, 2006).

3.5.2. Erosión laminar

De acuerdo a Vahrson (1991) la erosión laminar está directamente relacionada con la salpicadura de la lluvia, a lo que se puede agregar, que en laderas más de la mitad de la salpicadura desciende por la misma. Si esta corriente se mantiene como una delgada lámina, el tipo de erosión que produce se conoce como erosión laminar. La erosión laminar y en surcos pequeños es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y

pérdida del horizonte A de los suelos, y a la vez afecta más significativamente a la producción de sedimentos en los ríos.

En este tipo de erosión, el flujo raramente, o nunca, está en forma de lámina continua sobre la superficie, sino que se presenta a modo de oleadas o como un flujo subdividido detenido por pequeños obstáculos y cambiando constantemente de dirección, que unas veces actúa con más intensidad sobre una zona y otras sobre otra. En conjunto, la consecuencia es un rebaje más o menos homogéneo de toda la superficie del suelo (Bienes, 2006).

3.5.3. Erosión en surcos

En los campos de labor, aún con pendientes leves inferiores al 6%, las intensidades de lluvia altas generan surcos, siendo éstos mucho más frecuentes cuando el terreno está desprovisto de vegetación. Este tipo de erosión basada en la formación de estos regueros normalmente está precedido por otro de tipo laminar. El desprendimiento de las partículas del suelo en los surcos se presenta cuando la carga de sedimentos en el flujo es menor a la carga que puede soportar y si el flujo excede la resistencia del suelo a la remoción. La formación de los regueros ocurre cuando el agua no fluye uniformemente por toda la superficie, sino que se concentra en corrientes de una potencia erosiva capaz de abrir pequeñas incisiones en el terreno, que progresivamente aumentan de profundidad (SAGARPA, 2005; Bienes, 2006).

La erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, tiene su origen a causa del escurrimiento superficial del agua que se concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente (FAO, 2000).

3.5.4. Erosión remontante

La erosión remontante, retrocedente o regresiva es aquella en la que el arrastre de caudal líquido y sólido cuentan con cierta energía de transporte y una velocidad que determina su capacidad de arrastre, pero que a través del tiempo el curso tiende a ir modificando su perfil longitudinal tratando de lograr un perfil de equilibrio mediante un proceso erosivo hacia atrás o de sus cabeceras a medida que va profundizando el relieve, con lo cual la cuenca también se va extendiendo hasta que se logra el perfil de equilibrio, donde el sistema gasta el mínimo de energía compatible con sus características (Rivera-Ortíz *et al.*, 2012).

3.5.5. Erosión por caminos

La erosión por caminos precedentes a la cosecha es uno de los principales causantes de erosión, esto es debido a que los caminos aportan sedimentos a los cursos de agua de dos formas: remoción en masa o erosión de la superficie del camino, seguido por el transporte de este material al cauce (Fuentes, 2001).

3.5.6. Erosión en pedestales

La erosión en pedestales es aquella que se produce cuando se protege localmente a un suelo fácilmente erosionable del impacto de las gotas de lluvia, por medio de piedras o raíces de un árbol, quedan “pedestales” aislados, coronados y/o cubierto con el material resistente. Se ha demostrado que la erosión de terrenos adyacentes a los pedestales es debida, principalmente, a las gotas de lluvia más que al flujo superficial, ya que en la base del pedestal no existe socavación o es muy reducida. Esta forma de erosión se desarrolla lentamente a través de los años y se localiza generalmente en manchones desnudos de terrenos con

vegetación aislada. Puede presentarse también en terrenos arables que hayan sufrido una erosión excesiva durante una tormenta excepcional (Bravo *et al.*, 2003).

3.5.7. Erosión en pináculos

La erosión en pináculos es la formación de montes agudos o pináculos por retroceso de 2 o 3 cárcavas que profundizan y se ensanchan a la vez. Esta forma de erosión se asocia siempre con canales verticales profundos a los lados de las cárcavas que profundizan rápidamente hasta que se juntan y dejan al pináculo aislado. Una capa más resistente de grava o piedra, a menudo corona el pináculo, como en la erosión en pedestales. Los pináculos son relictos de la condición natural del relieve provocado por socavaciones del agua que fluye (Alvarado, 2007).

3.5.8. Erosión en cárcavas

Se denomina cárcava al estado más avanzado de la erosión en surcos. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas cárcavas (FAO, 2000).

La dinámica de las cárcavas es similar a la de los surcos. Se las puede definir como perturbaciones que crecen y se agrandan por retroalimentación hasta que quedan inhibidas bien por la competencia por el espacio bien por un exceso de producción de sedimentos. Desde el punto de vista práctico, cuando los regueros progresan y para cerrarlos no bastan los aperos agrícolas, entonces decimos que estamos ante una cárcava. Las cárcavas tienen lugar cuando existe una concentración de la escorrentía importante. La progresión de las cárcavas no es continua, sino que el agua circula por ellas de forma intermitente, evolucionando por abarrancamientos. Debido a la intensa erosión lineal que tiene lugar en

estos casos, se encajan rápidamente y pueden originar en ocasiones una densa red de drenaje con estrechos y profundos barrancos que progresan y retroceden sus cabeceras después de cada temporal (Bienes, 2006).

3.5.9. Erosión por flujo subsuperficial

La erosión puede ocurrir bajo la superficie del terreno si hay cavidades, grietas en las rocas o el suelo, u otras aperturas suficientemente grandes por las que el agua se infiltre y pueda circular, arrastrando materiales y progresando la galería o túnel. A éste tipo de erosión se le denomina sofusión, erosión subsuperficial o en túnel (Bienes, 2006).

3.6. Proceso de erosión hídrica

Según Wischmeier (1959), el proceso de erosión hídrica comienza primeramente por el desprendimiento de las partículas de suelo, de las partes elevadas de un terreno. El desprendimiento de estas partículas puede ser llevado a cabo por la lluvia y por el escurrimiento superficial, ya que ambos pueden llegar a poseer la suficiente energía para desprender partículas del suelo. La lluvia y el escurrimiento además de llevar a cabo la función de desprendimiento, también realizan la función de transporte de suelo.

3.6.1. Etapa de desprendimiento

Consiste en el desprendimiento de las partículas del suelo por la acción del impacto de las gotas de lluvias en la superficie, y por el constante choque de las mismas, que mantienen en suspensión las partículas finas y en rodamiento las gruesas. La dispersión de las partículas sella los poros superficiales, lo que disminuye la capacidad de infiltración del agua (Morales, 2014).

3.6.2. Etapa de arrastre o transporte

El arrastre de partículas, sucede cuando el agua no se filtra en el suelo y se produce el escurrimiento superficial. La capacidad erosiva en el escurrimiento superficial se ve ampliamente influenciado por la cantidad, intensidad y distribución de las gotas de lluvia (Morales, 2014).

3.6.3. Etapa de deposición o sedimentación

La fase de sedimentación se da cuando el poder de escurrimiento disminuye, dejando las partículas en suspensión depositadas sobre la superficie del suelo. Sucede en partes planas del terreno o cerca de cauces de los ríos (Gómez, 2006).

3.7. Factores que propician la erosión hídrica

Los procesos erosivos son muy variables en el tiempo y en el espacio. A escala planetaria, las tasas de erosión muestran un claro patrón dependiente del clima (Cerdà, 2001).

3.7.1. El suelo

La naturaleza de los materiales que lo forman, su textura, profundidad y la permeabilidad del mismo van a determinar el grado de sensibilidad que presenta éste frente a la erosión (Dumas, 2012).

3.7.2. Precipitación

En el proceso de erosión hídrica el arranque de material suele producirse por el impacto y salpicadura de las gotas de lluvia, además el transporte de partículas viene dado por los flujos laminares que se crean en superficie (Dumas, 2012).

3.7.3. Esguerrimiento

La esgurrentía sucede cuando la intensidad de lluvias excede la tasa de infiltración, es decir cuando el suelo está saturado y depende de la intensidad de las lluvias, tipo de suelo y su estado superficial, de la cobertura del suelo y de la pendiente (Scherrer y Naef, 2003).

3.7.4. Pendiente

De acuerdo a Morgan (1997) sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones, mientras que, en un terreno en pendiente, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente.

En condiciones normales, sería de esperar que la erosión se incrementara conforme lo hicieran el grado y la longitud de la pendiente, como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la esgurrentía superficial. Además, mientras en una superficie plana el golpeteo de las gotas de lluvia arroja las partículas de suelo al azar en todas las direcciones, en condiciones de pendiente inclinada más suelo es salpicado hacia abajo de ella que hacia arriba incrementándose la proporción conforme lo hace el grado de pendiente (Morgan *et al.*, 1986).

3.7.5. Actividad humana

Cuando la erosión se incrementa debido a las actividades humanas se manifiesta la erosión acelerada o inducida (Figueroa *et al.*, 1991), las actividades antropogénicas de acuerdo con Salas-Martínez (2014) pueden romper el equilibrio natural que se establece entre la formación del suelo y la pérdida del mismo, la actividad agrícola, el pastoreo, la actividad forestal, construcción de ciudades y caminos son solo algunos ejemplos de actividad humana que aceleran y propician la erosión.

3.7.6. Clima

El clima influye de forma directa (humedad y la temperatura) e indirecta (a través de la vegetación presente) sobre el suelo. La temperatura y la precipitación influyen en los procesos de alteración y transformación mineral, modificando la velocidad de muchas reacciones químicas que se dan en el suelo. La temperatura condiciona el tipo de meteorización, predominantemente física con bajas temperaturas, más química con altas temperaturas. La disponibilidad de agua y su flujo influye sobre gran cantidad de procesos edáficos, movilizándolo e incluso eliminando componentes del suelo (Moncada y Anaya, 2014).

La lluvia y el viento son los principales agentes climáticos que causan erosión por arrastre del suelo. Transportan partículas de tierra que se sedimentan en las zonas bajas.

3.7.7. Topografía

La inclinación y la longitud de la pendiente del terreno juegan un papel fundamental en este proceso, así a mayor inclinación y longitud de pendiente suele existir una mayor erosión (Dumas, 2012).

Patton y Schumm (1975) mencionan que la condición topográfica resulta determinante en los procesos de formación de cárcavas. Las características geométricas del terreno influyen directamente sobre la capacidad erosiva del flujo: la pendiente provoca la aceleración o deceleración del flujo y la concavidad o convexidad de la superficie favorece la concentración o dispersión del flujo. La topografía también determina el área vertiente hacia un punto y por tanto la cantidad de agua que recibe cada zona dentro de una cuenca.

3.8. Ecuación universal de pérdida de suelo

Han sido muchos los procedimientos propuestos para estimar las pérdidas de suelo relacionadas con actividades humanas (erosión acelerada), pero es quizá la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE formulada inicialmente por Wischmeier y Smith en 1962 y publicada posteriormente en su forma definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Wischmeier y Smith, 1978), la que ha tenido mayor aceptación y difusión, no solo en el continente americano sino en los demás países con problemas de erosión (González, 1991).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), USLE por sus siglas en inglés, se diseñó como una herramienta de trabajo para los conservacionistas (Figueroa *et al.*, 1991) y es un modelo empírico o indirecto. Se buscaba con esta ecuación que el cálculo de la pérdida de suelo se estandarizara a la vez que resultara más sencillo; sin embargo, existen limitaciones en su uso ya que la ecuación se desarrolló con datos de parcelas experimentales en condiciones de longitud y pendiente controladas, además que considera lluvias, cobertura vegetal y tipo de suelo uniformes y todo en el contexto de Estados Unidos. También es de señalar que la EUPS está basada en la capacidad de las gotas de lluvia para desprender partículas de suelo y por el tamaño de las parcelas utilizadas no brinda información certera acerca de la producción de sedimentos ni su deposición dentro de la cuenca (McKay, 2008).

La EUPS utiliza seis factores para su calcular la erosión del suelo promedio anual (A) en ton ha^{-1} , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde: R es la erosividad de la lluvia ($\text{MJ ha}^{-1} \cdot \text{mm hr}^{-1}$); K es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado ($\text{t ha}^{-1} \text{MJ} \cdot \text{ha} / \text{mm} \cdot \text{hr}$); L es la longitud de la pendiente (adimensional); S es el grado de la pendiente (adimensional); C es la cubierta y manejo de cultivos y residuos (adimensional); y P son las prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional) (Wischmeier y Smith. 1978).

3.8.1. Factor R

El Factor R se expresa en unidades de MJ/ha mm hr ; y representa la capacidad de la lluvia para producir erosión. Se calcula con base en la energía cinética de la precipitación que es en definitiva la energía capaz de desagregar el suelo en las partículas individuales que posteriormente serán transportadas por la salpicadura o por la escorrentía. Responde a las características físicas de la lluvia: a mayor tamaño de gota mayor masa y mayor velocidad de caída; a mayor masa y velocidad, mayor energía cinética de impacto; a mayor energía cinética de impacto mayor desagregación; y, finalmente, a mayor desagregación más pérdidas de suelo. Los estudios realizados para la validación de la EUPS indican que cuando los factores diferentes a la lluvia permanecen constantes (suelo, cobertura, etc.), la erosión generada por una tormenta es directamente proporcional al producto de la energía cinética de la tormenta por su intensidad (EI). La relación es lineal, y el efecto aditivo (Ibáñez, 2012).

En México, Montes-León y colaboradores (2011) calibraron el Factor R con 14 ecuaciones aplicables al territorio nacional con base en arreglos regulares de precipitación con datos diarios de 1979 a 2007 para 14 regiones del país (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ecuaciones para el cálculo de R en México.

Región	Ecuación	R ²
1	$2078 \times P + 0.002276 \times P^2$	0.92
2	$3.4555 \times P + 0.006470 \times P^2$	0.93
3	$3.6752 \times P - 0.001720 \times P^2$	0.94
4	$2.8959 \times P + 0.002983 \times P^2$	0.92
5	$3.4880 \times P - 0.000188 \times P^2$	0.94
6	$6.6847 \times P + 0.001680 \times P^2$	0.90
7	$(-0.0334) \times P + 0.0061 \times P^2$	0.98
8	$1.9967 \times P + 0.003270 \times P^2$	0.98
9	$7.0458 \times P - 0.002096 \times P^2$	0.97
10	$6.8938 \times P + 0.000442 \times P^2$	0.95
11	$3.7745 \times P + 0.004540 \times P^2$	0.98
12	$2.4619 \times P + 0.006067 \times P^2$	0.96
13	$10.7427 \times P - 0.001008 \times P^2$	0.97
14	$1.5005 \times P + 0.002640 \times P^2$	0.95

Fuente: Montes-León *et al.*, 2011.

3.8.2. Factor K

La erosionabilidad del suelo es un índice que indica la susceptibilidad a la erosión y depende de las propiedades de cada suelo (FAO, 1997). Este índice puede determinarse bajo lluvia natural por medio de parcelas de escorrentía; sin embargo, por la dificultad de establecer las parcelas por largos periodos para su estudio (mínimo entre 3 a 5 años, según Hincapié-Gómez (2011) y los grandes costos que esto implicaría, los simuladores de lluvia y modelos matemáticos se han estado implementando como una alternativa para el estudio y determinación de la erosión.

La erosionabilidad o Factor K , es una medida de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (Foster, 1987).

3.8.3. Factor LS

El Factor conjunto LS de la EUPS responde al efecto combinado de la longitud y el ángulo de inclinación de las laderas, cuyos efectos son imposibles de individualizar. Su valor sirve para estimar las pérdidas de suelo que se producen en un terreno en pendiente comparativamente a las pérdidas por unidad de área que se producirían si una misma lluvia cayera sobre una parcela de 22 m de longitud y 9% de ángulo de inclinación con idénticas condiciones de tipo de suelo, cultivo y manejo.

En la práctica se calcula mediante una ecuación de ajuste obtenida a partir de series de datos procedentes de parcelas estándar tipo EUPS, o mediante un nomograma o una tabla equivalente o derivada.

Cuando las laderas sean de pendiente irregular (cóncavas o convexas) o complejas la forma de actuar será dividir la ladera en tamos de pendiente homogénea y similar longitud, determinar el Factor LS de cada segmento, para después obtener el valor global de Factor LS mediante media ponderada de los valores LS de cada segmento.

La determinación del Factor LS en zonas de gran extensión en las que existen diferentes condiciones topográficas (por ejemplo, a nivel comarcal o provincial, donde se alternan valles y sierras de diferentes características) es una tarea compleja que requiere el empleo de Sistemas de Información Geográfica como herramienta de ayuda en los cálculos (Ibáñez, 2012).

El factor LS, puede ser calculado a partir de las ecuaciones 2 y 3.

$$S = \frac{Hf-Hi}{L} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde: S es la pendiente media del terreno (%); Hf es la altura más alta del terreno (m); Hi es la altura más baja del terreno; y L es la longitud del terreno (m).

$$LS = (\lambda)^m(0.0138 + 0.00965 S + 0.00138 S^2) \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde LS es el factor de grado y longitud de pendiente; λ es la longitud de pendiente; S es la pendiente media del terreno; y m es el exponente cuyo valor es de 0.5.

3.8.4. Factor C

El Factor C representa a la cobertura vegetal en la ecuación (Gómez 2002). Este factor es la razón del suelo perdido sobre todo en tierras de cultivo bajo condiciones específicas que corresponde a la pérdida de suelo bajo labranza de barbecho continuo. El cálculo más complicado de la EUPS es el Factor C estimar los efectos de manejo en la labranza (fechas y tipos), cultivos, distribución estacional del índice erosivo, historia de los cultivos (rotación) y nivel de rendimiento del cultivo (producción potencial de materia orgánica). El Factor C de la EUPS representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza del flujo superficial. Su valor expresa la relación que existe entre las pérdidas de suelo medias anuales de una parcela con una determinada vegetación y las pérdidas que esa misma parcela tendría en condiciones de barbecho continuado y laboreo según la máxima pendiente (Ibáñez, 2012).

3.8.5. Factor P

El Factor P, representa la relación existente entre las pérdidas de suelo que tienen lugar bajo determinada práctica de conservación de suelo y las pérdidas que ocurren en la misma área sin que existan prácticas de conservación. Este parámetro toma valores entre 0 y 1. Las prácticas incluidas en este término son: las curvas de nivel, los cultivos en franjas (cultivos alternados sobre contornos), y las terrazas (Ferrán Conill, 2007).

En numerosas ocasiones los estudios en los que se aplica la EUPS no consideran este factor, en gran medida se debe a la poca disponibilidad de información al respecto o bien, por no existir prácticas de conservación en la zona de estudio.

3.9. Erosionabilidad

La erosionabilidad o Factor *K*, es una medida de la susceptibilidad o resistencia del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (figura 5), (Foster, 1987; Lal, 1988).

El Factor *K* derivado de la EUPS para la predicción de la pérdida de suelo, conceptualmente brinda información sobre la susceptibilidad del suelo frente a la erosividad de la lluvia, y considera una erosividad particular bajo condiciones estándar de parcelas. Esto surgió desde las décadas de los 30's experimentalmente y no basado en simulaciones del proceso de erosión. Actualmente, sin embargo, el Factor *K* es comúnmente determinado utilizando experimentos con base a simulaciones del fenómeno.

La erosionabilidad obtenida experimentalmente sin utilizar simulaciones del fenómeno, la estimación de *K* se considera que la erosión puede deberse a la erosionabilidad

del suelo (susceptibilidad) pero también puede variar frente a otras variables, tales como, intensidad de lluvia y manejo (Piscitelli, *et al.* 2010).

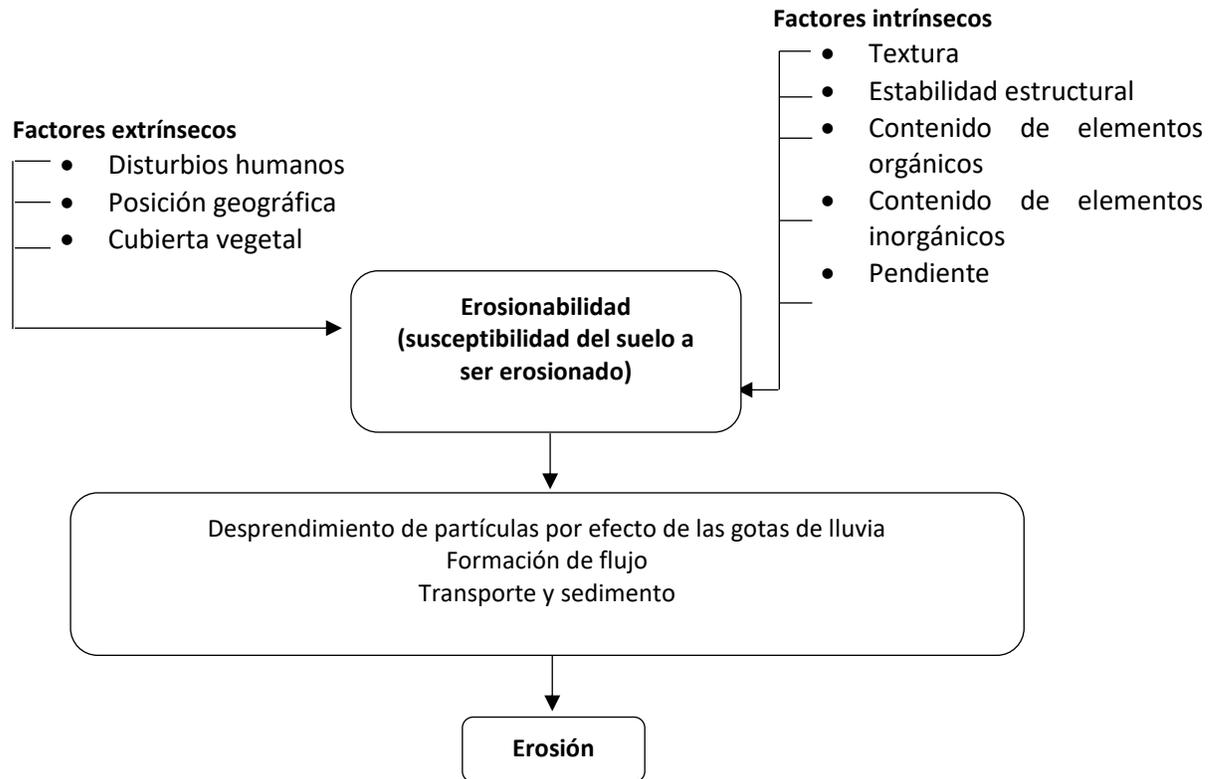


Figura 5. Esquema teórico sobre los factores intrínsecos y extrínsecos que derivan en la erosionabilidad dando lugar a la erosión. (Fuente: López-Santos *et al.*, 2009).

3.10. Cálculo de la erosionabilidad

El valor del Factor K como medida de erosionabilidad y asociado a las propiedades de los suelos, se obtiene con nomogramas, y también puede ser derivado de mediciones experimentales y es independiente de las condiciones ambientales y de manejo de los suelos. En este sentido, es importante tener en cuenta que la ecuación de ajuste obtenida experimentalmente por Wischmeier, es solo representativa de las situaciones experimentales (Piscitelli, *et al.* 2010).

A continuación, se describen los factores que intervienen para el cálculo del Factor K utilizando el nomograma.

3.10.1. Materia orgánica en el suelo (MOS)

La MOS es una variable de suma importancia en los estudios de pérdida de suelo, ya que la mayor parte de ésta se encuentra cerca de la superficie del suelo. Esta se produce principalmente por residuos de plantas silvestres y cosechadas (hojas, raíces, partes de tallos) y animales muertos que quedan en la superficie del suelo, convirtiéndose en materia orgánica cuando sus células pierden funcionalidad o mueren. La mesofauna del suelo (lombrices, insectos) incorporan los residuos más profundamente en el suelo por lo que la mayor concentración de MOS se da en los primeros 15-20 centímetros de profundidad (Campo, 2013).

Su relación con la erosionabilidad, radica en que la erosión como tal y por ende también la susceptibilidad a ésta se produce por la disgregación de las partículas. Cuando un suelo se encuentra físicamente afectado por fenómenos meteorológicos (viento o lluvias fuertes) o por la acción del ser humano. Sin embargo, la materia orgánica contribuye a evitar la disgregación de dichas partículas, por lo que la erosión se reduce sustanciosamente (Martínez *et al.* 2008).

3.10.2. Textura

La textura está íntimamente relacionada con la composición mineral, el área superficial específica y el espacio de poros del suelo. Esto afecta prácticamente a todos los factores que participan en el crecimiento de las plantas. La textura influye sobre el proceso erosivo al ser ésta la que tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad del agua del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la penetración por las

raíces. También tiene participación sobre las propiedades físicas relacionadas con la susceptibilidad del suelo a la degradación tal como la agregación (FAO, 2000).

3.10.3. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g cm^{-3} o t m^{-3}). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso (Keller & Håkansson, 2010). La densidad aparente refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos (refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire). Cuantos más agregados estables haya en el suelo, más baja será su densidad aparente, teniendo así mayor volumen del suelo ocupado por aire y por consiguiente más elevada será su permeabilidad (mayor infiltración y conductividad hidráulica); (Brye *et al.*, 2004; López, 2003).

La densidad aparente varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica; puede variar estacionalmente por efecto de labranzas y con la humedad del suelo sobre todo en los suelos con arcillas expandibles (Taboada & Álvarez, 2008).

La buena calidad física del suelo determina un ambiente adecuado para el desarrollo de las raíces vegetales, además del ingreso y almacenamiento óptimo del agua necesaria para el crecimiento de las plantas (Taboada y Álvarez, 2008). El hombre a través del manejo agrícola o ganadero modifica la calidad física del suelo. La declinación de la calidad física tiene consecuencias graves en las condiciones químicas y biológicas (Dexter *et al.*, 2004).

3.10.4. Estructura

La estructura es definida como el arreglo de las partículas del suelo, no solo las que se conocen como fracciones granulométricas (arena, arcilla y limo), sino también los

agregados o elementos estructurales que se forman por la agregación de las fracciones granulométricas (Rucks *et al.*, 2007).

El arreglo entre las partículas del suelo determina el espacio entre las mismas. Según el nivel de observación, se puede hablar de macroestructura o microestructura. La macroestructura, es el arreglo de las partículas secundarias y primarias visibles a simple vista. La microestructura es el arreglo de las partículas primarias para formar las secundarias; de ella depende en alto grado la macroestructura. Al atender a la microestructura, se observa que los componentes coloidales del suelo (plasma) actúan como cemento de los granos más gruesos (Rucks *et al.*, 2007).

3.10.5. Permeabilidad y tasa de infiltración en suelo

La permeabilidad es la capacidad de un suelo para permitir el paso del agua sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo. Dicha propiedad se determina objetivamente mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo, y a lo largo de una trayectoria determinada. El concepto permeabilidad puede recibir también las acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica, dependiendo del contexto en el cual sea empleado (Peinado-Guevara *et al.*, 2010).

El conocimiento de la conductividad hidráulica (K), tanto saturada como no saturada, es necesario como dato inicial en modelos numéricos para predecir el comportamiento del flujo del agua o fluidos a través del suelo el cual depende de las características de la matriz y del fluido contenido en el suelo (Rojas *et al.*, 2008).

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a

formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. La capacidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones es conocido como capacidad de infiltración, y, es un valor que es variable en el tiempo en función de la humedad del suelo, el material que conforma al suelo, y la mayor o menor compactación que tiene el mismo (Juárez y Rico, 1999).

El proceso de infiltración está altamente condicionado por la entrada superficial del fluido, la transmisión a través del suelo, la capacidad de almacenamiento del suelo, las características del medio permeable, y las características del fluido.

El movimiento del agua y líquidos en el suelo, se realiza mediante los espacios porosos que conforman su estructura. La infiltración, es un parámetro físico que permite cuantificar la cantidad de lámina de agua que está penetrando por los espacios porosos del suelo, en un tiempo determinado. Por otro lado, la permeabilidad del suelo es una medida inversa a la infiltración, y es cuantificada mediante el parámetro de la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica permite medir la posibilidad del agua de moverse dentro del suelo. De esta forma, se encontrarán mayores valores de conductividad hidráulica cuando el suelo está saturado (todos los espacios porosos llenos de agua) y muy baja cuando los espacios porosos están libres (Ruíz *et al.*, 2004).

3.11. Degradación y pérdida de suelo

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Sin embargo, el concepto de degradación incluye también la degradación florística e hídrica. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema.

La degradación puede obedecer a causas naturales o a consecuencias de las actividades humanas (Bai *et al.*, 2008).

El término de degradación de suelo es comúnmente confundido con la erosión del suelo, sin embargo, ésta última se refiere a las pérdidas absolutas de suelo de la capa superficial, así como los nutrientes del suelo. Sí bien, aun cuando la erosión del suelo es el efecto más visible de la degradación, no cubre totalmente todos sus aspectos (FAO, 2003).

La degradación del suelo conlleva cambios adversos en propiedades y procesos con el tiempo. Esos cambios pueden ser debidos a la remoción y alteración del equilibrio dinámico del suelo con el medio ambiente debido a perturbaciones naturales o antrópicas. Las perturbaciones naturales son bajas, permitiendo al suelo adaptarse a las nuevas condiciones; no obstante, algunas perturbaciones naturales pueden ser rápidas con cambios drásticos. Sin embargo, las actividades antrópicas son más rápidas, perturban el delicado balance entre el suelo y su medio ambiente, y ocasionan alteraciones drásticas en las propiedades y procesos del suelo (Ramírez *et al.*, 2011).

En cambio, la definición de pérdida de suelo indica que este se relaciona más directamente con la definición de la erosión, pudiendo ser utilizados incluso como sinónimos, ya que la pérdida de suelo se define como la remoción de las partículas de suelo dadas principalmente por factores como las corrientes de agua y aire, en particular en terrenos secos y sin vegetación (Hernández *et al.* 1996).

3.11.1. Pérdida de suelo por salpicamiento

En el proceso de sedimentación la pérdida de suelo por salpicamiento representa una de las partes cruciales, ya que consiste en la dispersión de los agregados del suelo debido al

impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del terreno; la cantidad de partículas o agregados de suelo a ser arrastrados dependerá también en gran medida de la clase de suelo y pendiente (Tayupanta, 1993).

3.11.2. Transporte de sedimentos

Los sedimentos que transporta una corriente de agua son consecuencia natural de la degradación del suelo, puesto que el material procedente de la erosión llega a las corrientes a través de tributarios menores, por la capacidad que tiene la corriente de agua para transportar sólidos, también por movimientos en masa, o sea, desprendimientos, deslizamientos y otros.

La teoría del transporte de sedimentos establece que las variables que controlan el movimiento de sedimentos en un cauce natural son la capacidad de transporte del cauce y la disponibilidad de sedimento (Graf, 1971; Simons y Senturk, 1992). La capacidad de transporte es la máxima carga que puede transportar un flujo y la disponibilidad de sedimentos es la existencia de material lo suficientemente fino para ser movilizado por un flujo, donde la velocidad mínima requerida para el desprendimiento, transporte y depósito de las partículas de suelo depende en gran medida del diámetro de la partícula (figura 6). Los procesos que controlan la disponibilidad y el almacenamiento de sedimentos, al igual que el transporte, son altamente dependientes de la escala, como lo mencionaron Osterkamp y Toy (1997).

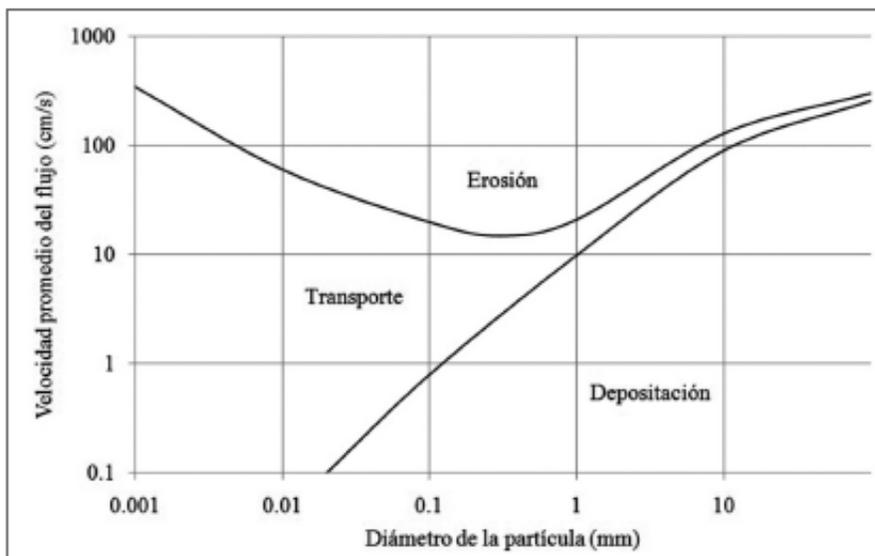


Figura 6. Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua. (**Fuente:** Boggs, 2006).

3.12. Límite de tolerancia de pérdida de suelo

En el enfoque clásico del límite permisible de erosión (LPE) tiene su fundamento en mantener las pérdidas de suelo a un nivel que evite la formación de cárcavas y, que las pérdidas de suelo permitan mantener una profundidad de suelo adecuada para sostener una productividad en el tiempo (Figueroa *et al.*, 1991). En 1997 el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (SCS-USDA, por sus siglas en inglés) propuso algunos LPE considerando la pérdida de suelo que un terreno puede tolerar en función del suelo y el material parental (Montgomery, 2007), sin embargo, estos límites deben considerarse con reserva, ya que aún no han sido validados para las condiciones de México, donde los procesos de formación del suelo varíen con respecto al territorio de los Estados Unidos de América.

En México, es aceptable los límites de tolerancia de pérdida de suelo de 2.2 a 11.2 toneladas por hectárea por año, y en caso de que las pérdidas rebasen los LPE, será necesario analizar qué tipo de manejo de suelo y vegetación se requiere para disminuir la erosión por debajo del nivel permisible (Loredo *et al.*, 2007). De acuerdo a Skidmore (1982), los LPE se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Límites permisibles de pérdida de suelo.

Profundidad del suelo (cm)	Material parental	LPE (ton/ha/año)
>100	Rocoso	11.2
>100	Arena o grava	11.2
50 – 100	Rocoso	9.0
50 – 100	Arena o grava	9.0
25 – 50	Rocoso	4.5
25 – 50	Arena o grava	6.7
10 – 50	Lecho arcilloso	6.7
<25	Lecho rocoso	2.2
<25	Arena o grava	4.5
<10	Lecho rocoso	4.5

Fuente: ARS, 1987

3.13. Cambio climático

El IPCC (2014) define que el cambio climático es un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, usando pruebas estadísticas) por los cambios en la media o en la variabilidad de sus propiedades y que persisten por un periodo prolongado, típicamente décadas o años. Puede deberse a procesos naturales internos o fuerzas externas,

tales como las modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de suelo.

La Organización Mundial Meteorológica (OMM, 2001) indica que se prevé que el calentamiento global en el siglo XXI sea mayor en la tierra y en las latitudes septentrionales más altas. Se afirma que durante los dos próximos decenios se producirá un calentamiento de la Tierra de alrededor de 0.2°C por decenio. Lo que aumentará el volumen de las precipitaciones en las latitudes altas, mientras que es probable que disminuya en la mayoría de las regiones subtropicales. Probablemente aumente la extensión de las zonas afectadas por la sequía. Es muy probable que los episodios de calor extremo, las olas de calor y las precipitaciones intensas sean cada vez más frecuentes. Teniendo en cuenta estos cambios del clima previstos para el futuro, cabe afirmar que aumentará la degradación de los suelos debido a las sequías, así como la erosión del suelo como consecuencias de las lluvias copiosas.

El cambio climático y la desertificación provocados por el dióxido de carbono están íntimamente ligados debido a los efectos indirectos entre la degradación de los suelos y las precipitaciones. Los recursos hídricos están estrechamente ligados con el clima. Se prevé que la escorrentía media anual de los ríos y la disponibilidad de agua aumentarán entre un 10 y un 40 por ciento en las latitudes altas y en algunas zonas tropicales húmedas; y disminuirán entre un 10 y un 30 por ciento en algunas regiones secas en las latitudes medias y en los trópicos secos. Los suelos expuestos a la degradación como resultado de un manejo inadecuado de las tierras podrían volverse estériles con el cambio climático (Cedillo, 2003).

3.14. Descripción de las Unidades de Suelo del estudio

3.14.1. Unidad de suelo I: Calcisol (CL)

El primer estudio se realizó sobre una unidad de suelo de tipo CLadlv/2+VR de acuerdo con la clave de la Base mundial de referencia (WRB, por sus siglas en inglés) y la carta edafológica de INEGI serie II, correspondiendo a un suelo de tipo Calcisol arídico lúvico con un segundo grupo (de hasta un 20%) de tipo Vertisol (VR), (IUSS WRB, 2007).

Los Calcisoles forman parte del Conjunto 7 de la WRB, definidos como “suelos minerales condicionados por un clima semiárido”. Éste grupo integra suelos en los cuales se produce una sustancial acumulación carbonato cálcico. Los Calcisoles bajo estas condiciones climáticas (áridas y semiáridas) son comunes sobre materiales parentales calcáreos, pudiéndose distribuir a lo largo de grandes extensiones (IUSS WRB, 2007).

3.14.2. Unidad de suelo II: Phaeozem (PH)

De acuerdo con la clasificación de la WRB, y con la carta edafológica de INEGI serie II, la clave correspondiente a la unidad de suelo de este estudio es PHapleb/2, lo que significa un suelo de tipo Phaeozem albico epiléptico de textura mediana (IUSS WRB, 2007).

Este tipo de suelos tienen un horizonte superficial Mólico de color pardo a gris, de 30-50 cm de espesor sobre un horizonte Cámbico o un horizonte C pardo amarillento o sobre un horizonte Árgico pardo o pardo rojizo. Los horizontes A de los Phaeozems son más delgados que los de los Chernozems y algo menos oscuros. Donde el nivel freático no se encuentra alejado de la superficie o cuando asciende (por ejemplo, en la parte superior de un horizonte Árgico), la superficie del suelo puede estar moteada y/o ser más oscura de lo habitual (IUSS WRB, 2007).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción general

El presente estudio comprende dos experimentos sobre el análisis del fenómeno de la erosión el Factor K de la EUPS, teniendo como referencia lo descrito por Wischmeier & Smith (1978). En ambas unidades de suelo se analizó el mismo fenómeno bajo circunstancias diferentes (Suelo desnudo, condición natural y Barbecho, en el primer estudio; y, Suelo desnudo, Barbecho y Barbecho con esquilmo, en el segundo estudio). Las unidades de suelo consideradas se describen a continuación:

4.2. Áreas de estudio

4.2.1. Unidad de suelo I

El primer experimento se realizó sobre una unidad de suelo de tipo Calcisol Arídico Lúvico (CLadlv, de acuerdo con WRB, 2016) en el municipio de San Pedro del Gallo, en el estado de Durango. Las parcelas experimentales se instalaron en un predio de agricultura de temporal en descanso en la comunidad de Santo Domingo en las coordenadas 25°49'29.6" N y 104°26'07.6" O (Figura 7a), a una altitud de 1754 msnm. El área de estudio pertenece a la región fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte de México y posee un clima de tipo BWhw, con temperaturas medias anuales de 22°C y precipitación media anual de 400 mm. El suelo predominante en el área es el Calcisol, con textura media y el uso que se le da es para la agricultura de temporal (INEGI, 2013). La vegetación predominante en las parcelas experimentales fue herbácea, compuesta principalmente por las siguientes familias: *Fabáceas*, *Chenopodaceas*, y *Asteráceas*.

4.2.2. Unidad de suelo II

Este estudio se realizó sobre una Unidad de Suelo de tipo Phaeozem Álbico Epiléptico (WRB, 2016) en un predio perteneciente a la Universidad Autónoma de Aguascalientes en las coordenadas 21° 57' 40" N y 102° 20' 36" O (Figura 7b), a una altitud de 1,880 msnm (INAFED, 2010). Esta área de estudio se encuentra inmersa en la Región fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y en la sub provincia de las Sierras y Valles Zacatecanos, con suelos dominantes en el área de tipo Phaeozem y Leptosol con textura media, siendo el uso de suelo principalmente para temporal y riego. Presenta un clima de tipo BSkw, con temperaturas medias anuales de 18°C y una precipitación media anual de 540 mm (INEGI, 2010). La vegetación predominante en las parcelas de estudio fue de tipo herbácea, habiendo presencia de las familias: *Poaceas*, *Asteráceas*, *Fabáceas*.

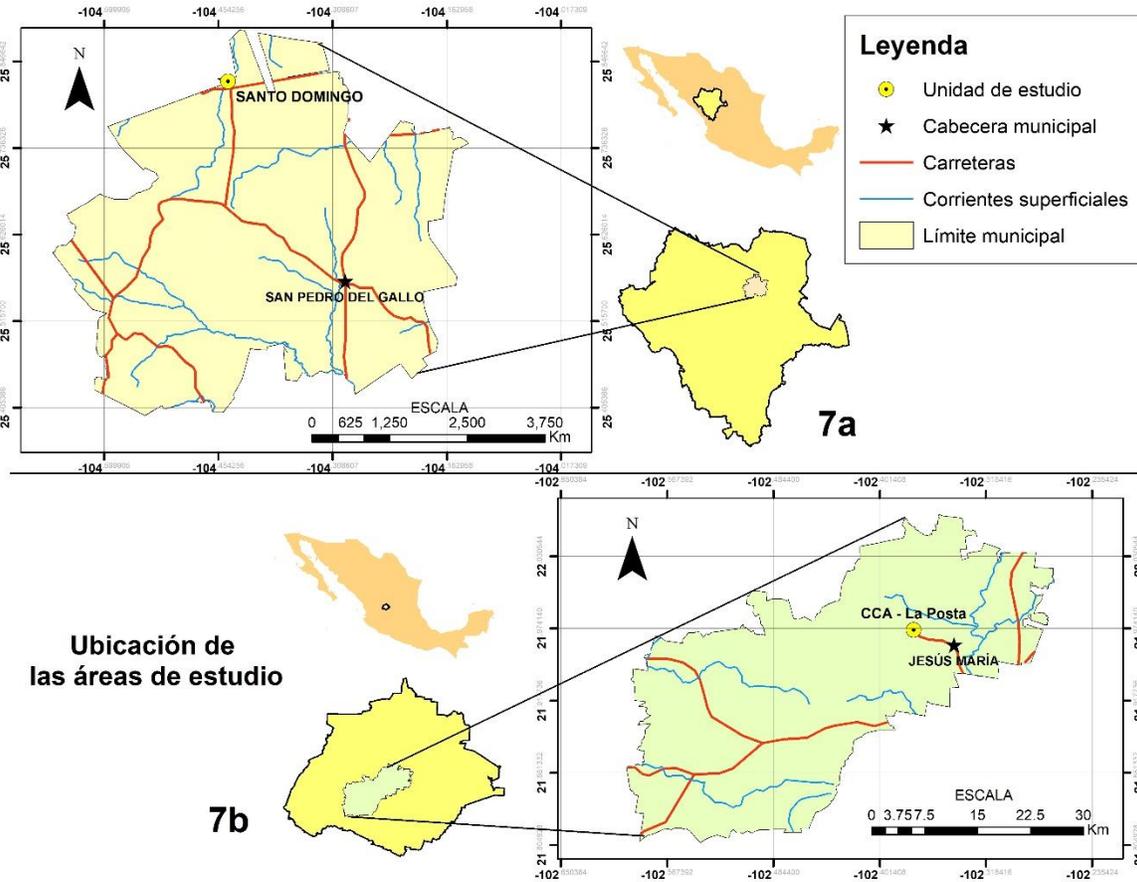


Figura 7. Áreas de estudio: Sitio 1, Unidad de Suelo Calcisol en Santo Domingo, San Pedro del Gallo, Durango (a); Sitio 2, Unidad de Suelo Phaeozem en CCA – La Posta, Jesús María, Aguascalientes (b).

4.3. Diseño experimental y tratamientos

Para la determinación del Factor K, se establecieron 3 parcelas al azar con 3 repeticiones. Las parcelas fueron despojadas de vegetación y sometidas a barbecho, con la finalidad de mantener una roturación continua de la superficie del suelo antes de la determinación (figura 8 y 9).



Figura 8. Implementación de módulos de sedimentación en la Unidad de Suelo tipo Calcisol en San Pedro del Gallo, Durango



Figura 9. Implementación de módulos de sedimentación en la Unidad de Suelo Tipo Phaeozem en Jesús María, Aguascalientes.

Para evaluar el efecto erosivo de la lluvia en la capa superficial en ambas unidades de suelo, para los sitios se utilizó un diseño de parcelas al azar con tres repeticiones. El diseño de tratamientos (Ti) para cada unidad se describe a continuación:

Experimento I: Unidad de suelo tipo Calcisol (US-CLadlv/2)

Se aplicaron los siguientes tratamientos:

T1: suelo desnudo, suelo desnudo con remoción de vegetación. Se realizó un desyerbe total del área, removiendo toda cubierta vegetal desde raíz.

T2: Condición natural, suelo desnudo en condición natural, con mínima presencia de vegetación arbustiva. Se tomó el suelo en su condición natural, sin remover la escasa presencia de vegetación.

T3: Barbecho, suelo desnudo en condición de barbecho. Se realizó un desyerbe para remover todo rastro de vegetación presente en la zona (área agrícola en descanso con presencia de vegetación arbustiva) desde la raíz y posteriormente se barbecho una única vez antes de la temporada de lluvia para simular la condición de manejo.

Experimento 2: Unidad de suelo tipo Phaeozem (US-PHablep/2)

Los tratamientos aplicados fueron:

T1: Suelo desnudo, suelo desnudo en condición natural, con remoción de vegetación. Se realizó un desyerbe y se retiró todo rastro de la vegetación de raíz que tenía la zona anteriormente (pastizal denso).

T2: barbecho, suelo desnudo en condición de barbecho. Se retiró la vegetación de raíz y después se realizó un único barbecho antes de la época de lluvia para simular la condición de laboreo de la parcela.

T3: Barbecho con esquilmo, suelo desnudo barbechado con agregación de esquilmo. Se retiró todo rastro de vegetación de raíz y después se realizó un único barbechado antes de la época de lluvia sobre la parcela y se le agregó residuos de pastizal hasta cubrir toda la superficie de la parcela.

En ambos experimentos se habilitaron colectores de sedimentos.

4.4. Implementación y épocas de medición

La implementación del estudio comenzó en el año 2015 y continuó en el año de 2016. Constó con una fase preliminar en la que se realizó un recorrido en campo y determinaciones de humedad e infiltración.

El experimento en la US-CLadlv/2 en San Pedro del Gallo, Durango se estableció en el mes de abril de 2015; mientras que el experimento de la US-PHablep/2 en el CCA de Jesús María, Aguascalientes se estableció en el mes de marzo de 2016.

En ambos casos se colocaron marcos de maderas, con dimensiones de 1.5 x 3 m, en la US-CLadlv/2; y de 2 x 5 m, para la US-PHablep/2. En ambas unidades de suelo se habilitaron captadores de sedimentos con pozos de 1 m³ en cada parcela experimental (Figuras 8 y 9).

Se instalaron bidones de 50 litros adaptados al colector de sedimentos con tubos de PVC a favor de la pendiente. Para la instalación del marco de las parcelas se hizo una zanja de 10 cm de profundidad y fue anclada con estacas. Se colocó un cercado en las periferias para evitar la introducción de Ganado mayor.

Para la medición de las variables climáticas en la US-CLadlv/2 se instaló una estación meteorológica en el mes de marzo de 2015 en el área de influencia de las parcelas experimentales, ubicada en las coordenadas 25°49'36.91" N, 104°26'20.06" O. Para el caso de la US-PHablep/2 se utilizó la información de la estación meteorológica automática del INIFAP "La Posta", ubicada en las coordenadas 21°58'18.03" N, 102°22'30.45" O, la cual se encuentra en un área cercana a las parcelas experimentales.

4.5. Caracterización del suelo (Mediciones iniciales)

4.5.1. Determinación de textura y MOS

Antes de la aplicación de los tratamientos, se colectaron tres muestras de suelo en tres parcelas representativas de las 9 establecidas. Las muestras se llevaron a laboratorio para

realizar determinaciones de propiedades granulométricas y Contenido de MOS. La obtención de la clase textural y el tamaño de partícula se realizó por el método del hidrómetro de Boyoucos; y la determinación de porcentaje de MOS se obtuvo mediante la técnica de Oxidación de Carbono Orgánico propuesta por Walkley & Black (1934), donde los valores porcentuales de MOS se clasificaron conforme a lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana de Suelos (NOM 021, 2002) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de la Materia orgánica en base a su porcentaje.

Clase	----- Materia orgánica (%) -----	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: NOM 021, 2002.

4.5.2. Densidad aparente y porosidad del suelo

La caracterización del suelo en cuanto a Densidad Aparente (D_a) se realizó bajo la técnica de determinación por muestra inalterada con barrena de núcleos. Se calculó también la Porosidad total (P_t), estimada como resultado de la diferencia unitaria y la relación de Densidad aparente (D_a)/Densidad real (D_r) tomando como valor constante de D_r a 2.65 g cm^{-3} , con la ecuación que se muestra a continuación (Ecuación 4):

$$Pt = 1 - \frac{Da}{Dr} \quad (\text{Ec. 4})$$

4.5.3. Pruebas de infiltración y conductividad hidráulica

Se realizaron pruebas de infiltración en campo haciendo uso del infiltrómetro de doble anillo. Dicho método intenta representar la infiltración de agua que cubre por inundación, la superficie del suelo. El infiltrómetro (doble anillo) consta de dos anillos metálicos, uno interior $D=10.5$ cm donde se realizan las mediciones y otro exterior $D=30$ cm que ayuda a controlar la infiltración lateral, donde se mantiene también una lámina de agua de 5 cm; la altura del agua en el cilindro interior es de 5 cm.

En las pruebas de infiltración se tomó porcentaje de humedad al inicio y fin, y de cada ensayo se extrajeron muestras de suelo a 10 cm. También se determinó el porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), a partir de los valores de textura del suelo utilizando la ecuación 6 para CC y el Cuadro 4 para PMP.

El contenido de humedad se determinó gravimétricamente, secado en estufa a 110°C , y posteriormente pesado en seco. La humedad gravimétrica se determinó a través de la formula expuesta en la ecuación 5.

$$\omega = \frac{m_a}{m_s} \quad (\text{Ec.5})$$

Dónde: ω es el contenido de humedad de la muestra (%), m_a es el peso de la muestra en húmedo, y m_s es el peso de la muestra en seco.

$$CC = (0.0023 \times \% \text{Are.}) + (0.25 \times \% \text{Li.}) + (0.61 \times \% \text{Arc.}) \quad (\text{Ec.6})$$

Dónde: *CC* es el porcentaje de humedad a capacidad de campo, *Are* es el porcentaje de arena presente en la muestra, *Li* es el porcentaje de limos, y *Arc* es el porcentaje de arcillas.

Cuadro 4. Contenido de humedad a punto de marchitez permanente.

Textura	<i>P_{sx}</i> A <i>PMP</i>
	--- % ---
Arena	3 a 8
Migajones arenosos	6 a 12
Suelos francos	8 a 17
Migajones arcillosos	13 a 20
Arcillas	17 a 40

Fuente: Coras, 2003.

La clase de conductividad se determinó de acuerdo a los rangos propuestos por USDA (Cuadro 5) y se homologó conforme al coeficiente de infiltración como menciona Suárez (2001), dado que la tasa de infiltración y su valor máximo coincide con la conductividad hidráulica del suelo saturado.

Cuadro 5. Rangos de Conductividad Hidráulica propuesta por The U.S. Soil Conservation Service

Clase	Conductividad Hidráulica	
	cm/h	m/día
Muy lenta	0.1	0.03
Lenta	0.1-0.5	0.03-0.12
Moderadamente lenta	0.5- 2	0.12-0.50
Moderada	2-6	0.5-1.50
Moderadamente rápida	6-12	1.50-3
Rápida	12-18	3-4.5
Muy rápida	> 18	>4.5

Fuente: NRCS, 2009.

4.6. Cálculo de erosionabilidad

Para calcular la erosionabilidad del suelo se utilizó la ecuación de regresión elaborada de Wischmeier y Smith (1978), la cual requiere cuatro parámetros físicos del suelo. Dicha ecuación transformada a unidades del sistema métrico decimal (t ha h/MJ mm h) es la siguiente (Ecuación 6):

$$K = \left[\frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - MO)M^{1.14} + 3.25 (S - 2) + 2.5(P - 3)}{100} \right] 0.1318 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde MO es el porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial; M , el parámetro que queda definido por la notación (% de arena fina + % de limo* 100 - % de arcilla); S , el tipo de estructura, que toma los valores: 1 (gránulo muy fino y grumo fino), 2 (gránulo fino y grumo fino), 3 (gránulo medio y grueso, grumo medio), 4 (gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso); P , tipo de permeabilidad, que toma los valores: 1 (muy rápida a rápida), 2 (medianamente rápida), 3 (moderada), 4 (moderadamente lenta), 5 (lenta), 6 (muy lenta).

A su vez con los resultados obtenidos de MOS y grupo textural se calculó el Factor K (con base en la relación existente entre las dos variables anteriores) utilizando el método que propone el uso de indicadores de magnitud general de erosionabilidad propuestos por USDA-ARS (Kirkby y Morgan, 1980), (Cuadro 6).

Cuadro 6. Factores de erosionabilidad del suelo asociados a la textura y contenido de materia orgánica del suelo

Clase Textural	Valor de K de acuerdo a porcentajes de MO		
	0.5 %	2 %	4 %
	----- (t ha ⁻¹ / (MJ mm h) -----		
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.021	0.080	0.013
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena muy fina franca	0.058	0.050	0.04
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.040	0.032
Franco arenoso muy fino	0.062	0.054	0.043
Franco	0.05	0.045	0.038
Limo franco	0.063	0.055	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Franco arenoso arcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.028
Franco arcilloso limoso	0.049	0.042	0.034
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcilla limosa	0.033	0.03	0.025
Arcilla		0.017 - 0.038	

Fuente: Kirkby y Morgan (1980)

4.7. Muestreo y cálculo de sedimentos

El arrastre de suelo fue medido de manera directa en campo por medio de la cantidad de suelo arrastrado en los colectores para los eventos de lluvia considerando el máximo de duración en tiempo para cada tormenta registrada en el año a partir de la fecha de implementación de cada experimento. Se tomaron 3 muestras de agua con sedimentos de los bidones conectados por cada tratamiento a los colectores al siguiente día de un evento de lluvia registrado. Las muestras se llevaron a laboratorio para filtración por gravedad. La cantidad de suelo arrastrado se determinó en base a la diferencia entre el peso de filtro con sedimento en seco con respecto al peso original del filtro.

Para la US-CLadlv/2, los registros de tormenta se monitorearon conforme a los pronósticos de lluvia y se corroboró muestreando al día siguiente de cada tormenta registrada

con ayuda de la estación meteorológica instalada en dicha área de estudio. En la US-PHablep/2, las condiciones climáticas se monitorearon haciendo uso de la estación meteorológica automática de INIFAP “La Posta II” (21°58’06.82” N, 102°22’48.70” O).

Los datos analizados de las estaciones meteorológicas fueron de lluvia, lluvia acumulada y duración de lluvia por evento de tormenta, con lo anterior se posibilitó el cálculo de las intensidades presentadas durante eventos de lluvia y tormenta.

4.8. Cálculo de intensidad de lluvia

Ambas estaciones contaron con la misma escala de medición en tiempo. Los datos de las dos estaciones se analizaron de acuerdo a registros a cada 15 minutos. Se tomó la información de precipitación de lluvia puntual y precipitación de lluvia acumulada registrada cada 15 minutos. Los eventos de tormenta se tomaron de acuerdo a la duración continua en tiempo de precipitación inicial y final.

En el caso de la US-PHablep/2, los datos de la estación se tomaron en línea de la red nacional de estaciones de INIFAP (<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/#>) durante el periodo de junio a noviembre del 2016.

Los datos de salida se procesaron por medio del Software Microsoft Excel 2013. Para el cálculo de la intensidad de lluvia en mm hr⁻¹ se utilizó el tiempo total por evento de lluvia y la precipitación acumulada durante dicho evento (ecuación 7).

$$I = Pp * \frac{60}{T} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde I , representa la Intensidad de lluvia expresada en mm hr^{-1} ; Pp , es la precipitación acumulada en el lapso de tiempo (15 min) expresada en mm; y T , representa el tiempo de duración del evento expresado en horas.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

En este apartado se describen los resultados obtenidos en el presente estudio. La primera parte corresponde a los resultados de la fase preliminar y las determinaciones físicas y mecánicas del suelo (textura, densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), MOS), conductividad hidráulica (humedad en suelo, en cuanto a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP); tasa de infiltración y permeabilidad) y el cálculo del Factor K en las áreas de estudio.

La segunda parte de los resultados muestra el análisis de pérdida de suelo bajo diferentes tipos de manejo en suelo para las dos unidades de suelo que comprenden este estudio.

La sección final en el apartado de resultados presenta un análisis de regresión de los valores de pérdida de suelo y las intensidades de lluvia. A su vez, se presenta un análisis de regresión para los valores de K encontrados en las unidades de suelo y su relación con las tasas de pérdida de suelo.

5.1. Caracterización física del suelo y de los procesos en los sitios de estudio

5.1.1. Determinación de las características físicas de suelo

En la US-CLadlv/2, la Da fue semejante entre las parcelas 2 y 3, debido a que los valores fueron de 1.25 g cm^3 y 1.29 g cm^3 respectivamente, mientras que la parcela 1 presentó 1.41 g cm^3 . La determinación de clase textural indicó que las parcelas 1 y 2 corresponden a textura de tipo franca arenosa (Ca), mientras que la parcela 3 fue de textura arenosa (A). Se calculó también la Porosidad total, resultando en 52 y 51 % en las parcelas 2 y 3 respectivamente, mientras que la parcela 1 presentó menor porosidad (46%) y mayor densidad aparente (1.41 g cm^3) representando un suelo más compactado que el que se

encontró en las parcelas anteriores. El contenido de MOS presentó resultados bajos (1.50 % en promedio), propio de una zona de cultivo en descanso tal como es el área de estudio (Cuadro 5).

En la US-PHablep/2, la Da fue distinta entre las parcelas 1, 2 y 3 con 1.03, 1.23 y 1.13 g cm³ respectivamente. La clase textural en las tres parcelas correspondió al tipo Franco. El suelo presentó porosidad alta en las tres parcelas con 61, 53 y 57 %, respectivamente, lo que indica que el suelo cuenta con buena aeración y poca compactación. La MOS fue alta (4 en promedio), por lo tanto, se infiere que el suelo presente en las tres parcelas tiene alta cantidad de materia orgánica (Cuadro 7).

Cuadro 7. Características físicas del suelo. US-CLadlv/2 y US-PHablep/2.

Unidad suelo/Parcela	Textura			Clase textural	Da	Porosidad	Porcentaje de MOS	Clase MOS
	Ar	Li	Arc					
	----- Kg -----				---(g cm ³)---	--- (%) ---	--- (%) ---	
US-CLadlv/2/2								
P1	84.8	6.12	9.01	Franco arenoso	1.41	46	1.43	Bajo
P2	84.1	6.92	8.92	Franco arenoso	1.25	52	1.56	Bajo
P3	87.1	4.88	7.93	Arenoso	1.29	51	1.52	Bajo
US-PHablep/2								
P1	50.8	29.2	19.9	Franco	1.03	61	4.07	Alto
P2	51.8	29.8	18.3	Franco	1.23	53	3.94	Alto
P3	53.8	28.2	17.9	Franco	1.13	57	3.94	Alto

5.1.2. Conductividad hidráulica

5.1.2.1. Humedad en suelo, Capacidad de Campo y PMP

En el caso del área de estudio US-CLadlv/2, la humedad inicial del suelo, medida antes de realizar las pruebas de infiltración, presentó diferencias moderadamente marcadas de la parcela 1 en contraste con las parcelas 2 y 3, siendo éstas dos últimas las que presentaron mayor semejanza (1.77% y 1.19%) con respecto al porcentaje de humedad inicial de la parcela 1 (3.16%). En cuanto a la humedad presentada después de las pruebas de infiltración, los resultados se presentaron de manera muy semejante a los de la humedad inicial medida en términos de la semejanza de la parcela 2 y 3 (con 15.95 % y 15.69%) ya que la parcela 1 presentó un valor mayor de humedad (19.43%). (Cuadro 8).

La Capacidad de Campo calculada para la US-CLadlv/2 fue de 7.221, en la parcela 1; 6.644, en la parcela 2; y 6.257, en la parcela 3. Mientras que el Punto de Marchitez Permanente se tuvo un valor de 3 para las tres parcelas (Cuadro 8).

Para el área con la US-PHablep/2, los resultados de humedad antes de las pruebas de infiltración en las parcelas 1, 2 y 3 fueron bajas, con tan solo 1.84 %, 2.66 % y 3.16 % respectivamente. El porcentaje de humedad obtenido después de realizadas las pruebas de infiltración osciló entre el 20 y 30 % (Cuadro 8).

En la US-PHablep/2, la Capacidad de Campo fue de 19.555, 18.732 y 18.092, para la parcela uno, dos y tres, respectivamente; alcanzando el Punto de Marchitez Permanente en 9.775, en la parcela uno; y obteniendo el valor de 9 para las parcelas restantes (Cuadro 8).

Cuadro 8. Humedad medida en suelo antes y después de las pruebas de infiltración, CC y PMP en las unidades de estudio.

Parcela	US-CLadlv/2			PMP	US-PHablep/2			
	Humedad		CC		Humedad		CC	PMP
	Inicial	Final			Inicial	Final		
				---- % ----				
1	3.16	19.43	7.221	3	1.83	24.5	19.555	9.775
2	1.77	15.95	6.644	3	2.66	33.5	18.732	9
3	1.19	15.69	6.257	3	3.16	20.28	18.092	9

US-CLADLV/2 = Unidad de suelo Calcisol; US-PHablep/2 = Unidad de Suelo Phaeozem; CC = Capacidad de Campo; PMP = Punto de marchitez permanente.

5.1.2.2. Infiltración en suelo y Conductividad hidráulica

Para determinar el efecto de la infiltración en cada parcela, se estudió el movimiento del agua a través del perfil suelo desde su fase dinámica hasta su fase estacionaria, observando las sucesiones de cambio rápido de puntos en primera estancia hasta llegar a una sucesión más lenta y constante de los puntos en segunda instancia sobre el eje del tiempo.

La tasa de infiltración medida en campo reveló el movimiento del agua de su fase dinámica hasta su fase estacionaria al cambiar las sucesiones en un tiempo de aproximadamente 20 minutos de un total de 45 minutos de duración en cada prueba en las 3 parcelas. Las pruebas de infiltración realizadas en las parcelas experimentales de la US-CLadlv/2 mostraron los siguientes valores para Flujo transitorio (Ft) y flujo estacionario (Fe) de 1.61 cm h⁻¹, 1.51 cm h⁻¹, para la parcela 1; 1.49 cm h⁻¹, 1.32 cm h⁻¹, para la parcela 2; y 1.41 cm h⁻¹, 1.22 cm h⁻¹, para la parcela 3 respectivamente (Cuadro 9).

A los datos de Ft y Fe calculados se les agrego una línea de tendencia con un modelo potencial para los dos casos como se muestra en las Figuras 10 y 11.

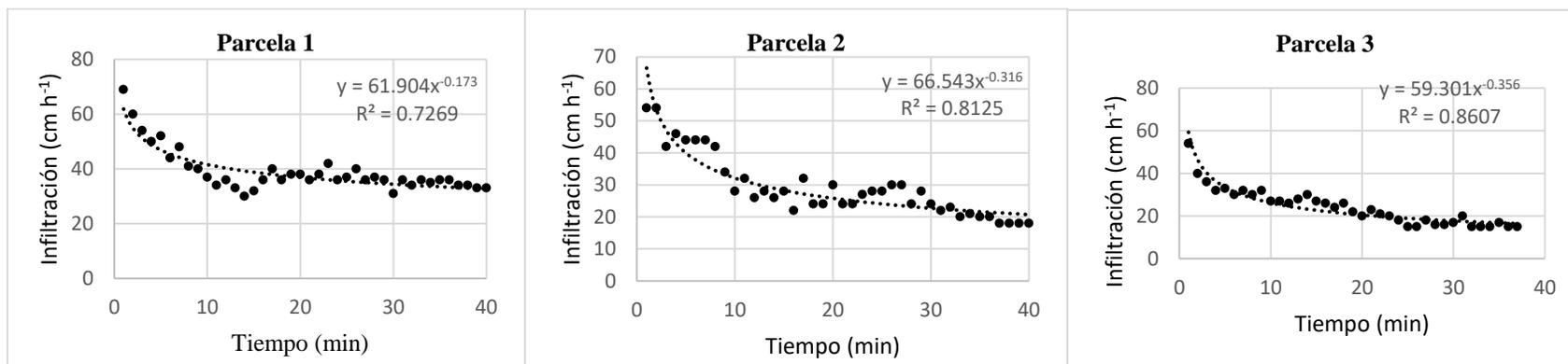


Figura 10. Modelos Kostiakov-Lewis de infiltración para las parcelas 1, 2 y 3 de la Unidad de Suelo tipo Calcisol (US-CLadlv/2).

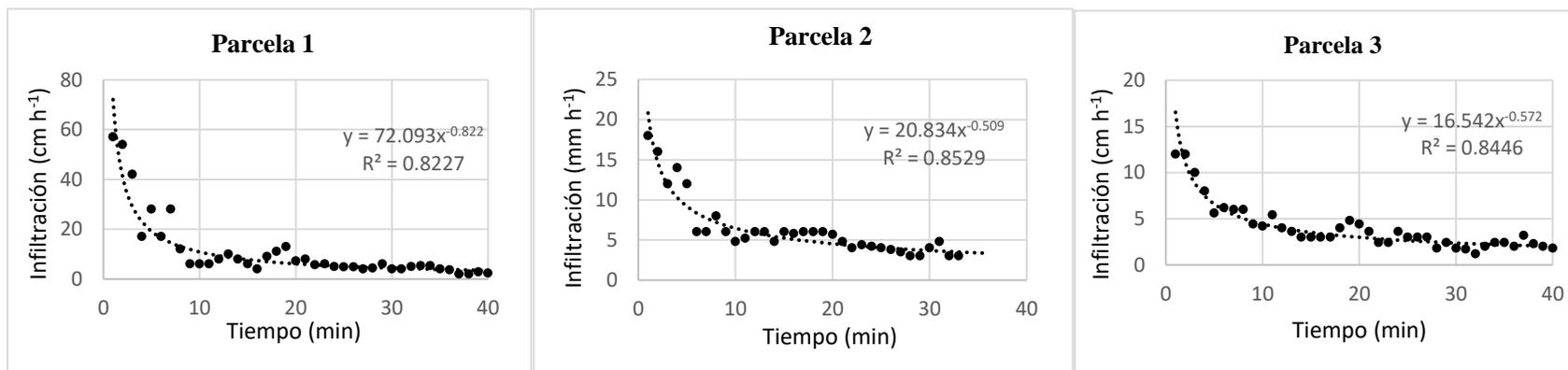


Figura 11. Modelos Kostiakov-Lewis de infiltración para las parcelas 1, 2 y 3 de la Unidad de Suelo tipo Phaeozem (US-PHablep/2).

En la US-CLadlv/2, los resultados arrojados para las 3 parcelas solo presentan una desviación estándar de 0.10 en Ft y de 0.14 en Fe. Las parcelas con mayor semejanza en cuanto a sus valores de flujo transitorio y estimado fueron la 2 y la 3 (Cuadro 9).

Para el caso de la US-PHablep/2, los valores de infiltración para flujo transitorio (Ft) para la parcela 1 fue de 0.67 cm h⁻¹, para la parcela 2 fue de 0.82 cm h⁻¹ y para la parcela 3 de 1.11 cm h⁻¹. Para el flujo estacionario (Fe), la parcela 1 tuvo un valor de 0.35 cm h⁻¹, la parcela 2 de 0.58 cm h⁻¹ y la parcela 3 de 0.63 cm h⁻¹ (Cuadro 9). Los resultados en Ft presentaron una desviación estándar de 0.22, mientras que los de Fe presentaron una desviación de 0.14.

Cuadro 9. Tasas de infiltración inicial y final para Ft y Fe, medidos en campo y estimados con el modelo K-L, para la US-CLadlv/2 y US-PHablep/2.

US-CLadlv/2										
Parcela	Modelo K-L	R ²	Medidos				Estimados			
			<i>t</i> min	<i>Kc</i> cm h ⁻¹	<i>t</i> min	<i>Ksc</i>	<i>Kc_e</i> cm h ⁻¹	<i>Ksc_e</i>	<i>Ft</i> log I (cm h ⁻¹)	<i>Fe</i>
1	$I=61.904x^{-0.173}$	0.72	1	41.07	30	34.38	40.73	33.03	1.61	1.51
2	$I=66.543x^{-0.316}$	0.81	1	32.36	30	19.8	31.47	21.29	1.49	1.32
3	$I=59.301x^{-0.356}$	0.86	1	26.34	30	16.12	26.16	16.86	1.41	1.22
US-PHablep/2										
Parcela	Modelo K-L	R ²	Medidos				Estimados			
			<i>t</i> min	<i>Kc</i> cm h ⁻¹	<i>t</i> min	<i>Ksc</i>	<i>Kc_e</i> cm h ⁻¹	<i>Ksc_e</i>	<i>Ft</i> log I (cmh ⁻¹)	<i>Fe</i>
1	$I=70.093x^{-0.822}$	0.82	1	13.72	30	3.78	4.68	2.26	0.67	0.35
2	$I=20.834x^{-0.509}$	0.85	1	7	30	3.72	6.66	3.82	0.82	0.58
3	$I=16.542x^{-0.572}$	0.84	1	4.75	30	2.26	12.94	4.34	1.11	0.63

US-CLadlv/2 = Unidad de suelo Calcisol; UST-PHablep/2 = Unidad de suelo Phaeozem; *I* = tasa de infiltración; *t* = tiempo; min = minutos; *Kc* = conductividad hidráulica inicial medida *in situ*; *Ksc* = conductividad hidráulica a saturación medida *in situ*; log = logaritmo con base 10; *Kc_e* = conductividad hidráulica estimada; *Ksc_e* = conductividad hidráulica saturada estimada.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los cálculos de F_t y flujo estacionario (F_e), el comportamiento de la conductividad hidráulica en el suelo de las parcelas experimentales de la US-CLadlv/2 se encuentran en la clase de tipo moderadamente lento, y las de la US-PHablep/2 se encuentran en el rango de conductividad lenta, de acuerdo con la clasificación de rangos de conductividad hidráulica propuesta por el U.S Soil Conservation Service.

5.2. Determinación del factor de erosionabilidad

El Factor K se determinó antes del establecimiento de los tratamientos. Obtenidas las variables de MOS y D_a para las 3 parcelas y utilizando la tabla de indicaciones de magnitud general (Cuadro 6) que interrelaciona ambas variables se buscaron los valores estimados.

En la US-CLadlv/2, el contenido de MOS para las tres parcelas muestreadas fue bajo (oscilando entre 1.43 a 1.56 %) con un grupo textural predominante de tipo Franco arenoso. Dado lo anterior, el resultado del Factor K (Cuadro 10), determinado con el método de referencia (Cuadro 3), fue de 0.036 t ha h/MJ mm h, para las parcelas 1 y 2 (de textura franco arenosa) y de 0.021 t ha h/MJ mm h en la parcela 3 (de textura arenosa), con un promedio de 0.031 t ha h/MJ mm h (Cuadro 10).

Por otro lado, en la US-PHablep/2, el contenido de MOS para las tres parcelas fue alto (3.9 – 4 %), y en las tres, la clase textural fue de tipo Franco, dado lo anterior y de acuerdo con este método, el valor de referencia del Factor K para las tres parcelas fue 0.038 t ha h/MJ mm h (Cuadro 10).

Cuadro 10. Factor K calculado en base a textura y MOS para las tres parcelas de estudio, expresado en (T ha h MJ mm ha⁻¹).

US-CLadlv/2			
Parcela	MOS	Clase textural	Factor K
	--- % -		t ha
	--		h/MJ mm h
1	1.43	Franco Arenoso	0.036
2	0.24	Franco Arenoso	0.036
3	1.52	Arenoso	0.021
US-PHablep/2			
1	4	Franco	0.038
2	3.9	Franco	0.038
3	3.9	Franco	0.038

Sin embargo, utilizando las variables de MO, Estructura (S), Permeabilidad (P) y la relación de textura (M) como propone Wischmeier y Smith (1971), con el uso de la ecuación de regresión (ecuación 4), los resultados de K para las parcelas 1, 2 y 3 en la US-CLadlv/2 fueron de 0.027 t ha h/MJ mm h, 0.028 t ha h/MJ mm h y 0.027 t ha h/MJ mm h (Cuadro 11), promediando en 0.027, lo que representa una discrepancia de hasta un 0.37 % con respecto al método de referencia.

Para la US-PHablep/2, el resultado del Factor K utilizando la ecuación de regresión (Cuadro 11) indica valores de 0.020, 0.021 y 0.021 t ha h/MJ mm h para las parcelas 1, 2 y 3 respectivamente dando así un promedio de 0.020, encontrando una discrepancia del 1.73 % con respecto del método de referencia

Cuadro 11. Valores calculados del factor K usando variables requeridas y la ecuación de regresión.

US-CLadlv/2									
Parcela	Arena	Limo	Arcilla	MOS	M	S	P	Factor K	
				(%)					t ha h/MJ mm h
1	84.8	6.12	9.01	1.43	8272.81	2	4	0.027	
2	84.1	8.92	6.92	1.56	8658.30	2	4	0.028	
3	87.1	4.88	7.93	1.53	8468.59	2	4	0.027	
US-PHablep/2									
1	50.8	29.2	19.9	4	6408	2	5	0.020	
2	51.8	29.8	18.3	3.9	6666.72	2	5	0.021	
3	29.8	28.2	17.9	3.9	6732.2	2	5	0.021	

5.3. Pérdida de suelo

La US-CLadlv/2 presentó valores bajos de precipitación a lo largo del experimento. Se identificaron 7 eventos principales de lluvia, cuya relación entre intensidad de lluvia y arrastre de sedimentos se presenta de manera gráfica en las figuras 12, 13 y 14. Los eventos mostrados representan las fechas de muestreo en que se registró precipitación de lluvia en los meses de Julio a Octubre de 2015. Cabe hacer mención que el año 2015 fue un año de extrema sequía con escasas lluvias.

Los resultados de pérdida de suelos en la US-CLadlv/2 para *T1* (Figura 12) mostraron la mayor cantidad de pérdida de suelo (0.043 t ha^{-1}), seguido por *T2* (0.037 t ha^{-1}), (Figura 13), y por último *T3* (0.033 t ha^{-1}), (Figura 14) que fue el tratamiento que presentó la menor cantidad de pérdida.

En cuanto a la intensidad de lluvia, en *T1* hubo presencia de intensidades moderadas con altas tasas de arrastre relativamente, especialmente en los eventos 1 (2.50 mm h^{-1}), 3 (2.1 mm h^{-1}) y el 4 (3.42 mm h^{-1}), siendo el evento 6 el que presentó mayor intensidad (4.8 mm h^{-1}), el cual a su vez tuvo la tasa de pérdida de suelo menor a los demás eventos (0.0024 t ha^{-1}), (Figura 12).

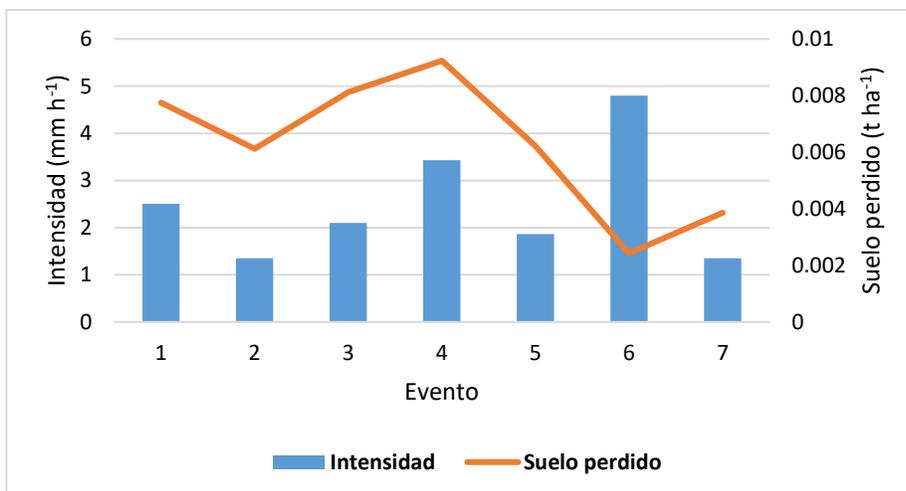


Figura 12. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T1: Suelo desnudo.

En el caso de T2, el evento de lluvia en el que ocurrió la mayor cantidad de pérdida de suelo fue el 4 (0.008 t ha⁻¹) con intensidad de lluvia moderada (3.88 mm h⁻¹), siendo el evento 7 el que arrojó la menor cantidad de pérdida de suelo (0.0002 t ha⁻¹) con una intensidad de (1.35 mm h⁻¹), (Figura 13).

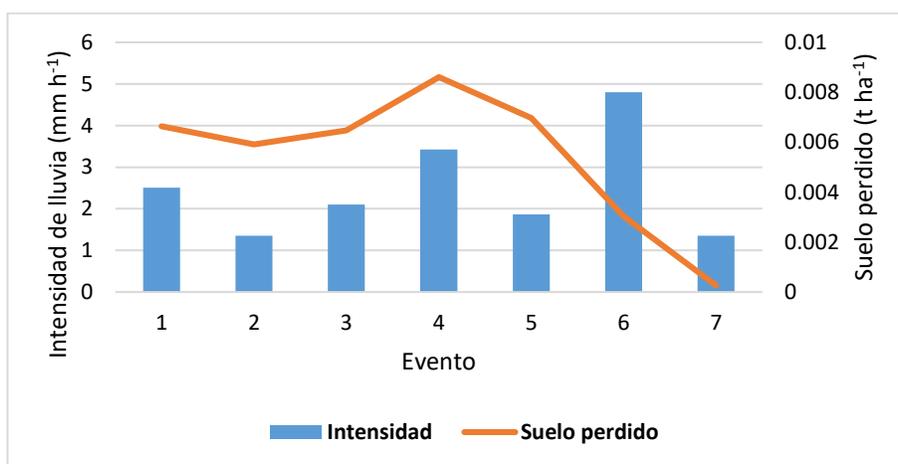


Figura 13. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T2: Condición natural.

Por su parte, T3 obtuvo la mayor pérdida de suelo (0.0071 ton ha⁻¹) en el evento 5 con una intensidad de lluvia de 1.86 mm h⁻¹, mientras que la tasa con menor pérdida (0.0001 ton ha⁻¹) se registró en el evento 7 (1.35 mm h⁻¹), (Figura 14).

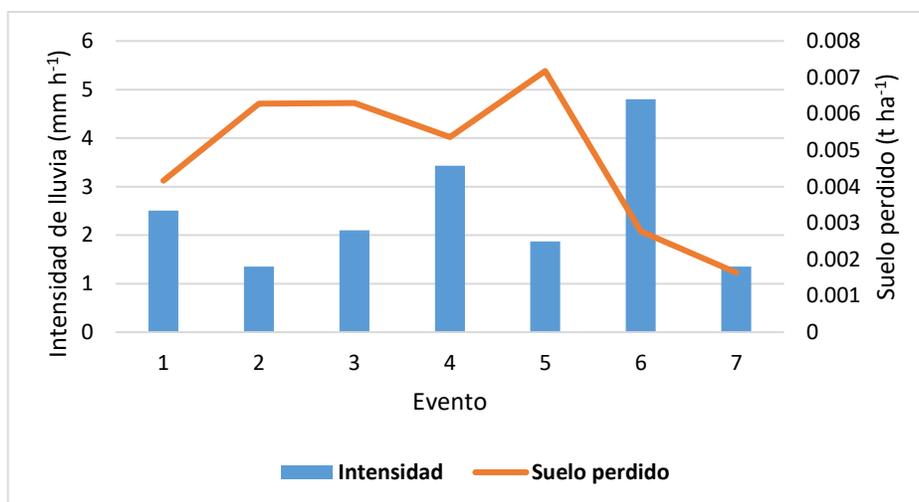


Figura 14. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2: T3: Barbecho.

Se realizó un análisis de varianza con confiabilidad del 95 % con el programa IBM SPSS Statistics 23, encontrando que no hubo diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos ($P > 0.05$) para la US-CLadlv/2.

Por otro lado, la US-PHablep/2 registró un total de 40 eventos de lluvia en lo que duro el experimento, destacando también que el año 2016 fue un año muy lluvioso, a diferencia de 2015. De acuerdo a la evaluación realizada en la capa de suelo con los 3 tratamientos aplicados, las tasas de arrastre de sedimentos fueron mayores en *T1* (0.338 t ha⁻¹) y *T2* (0.226 t ha⁻¹), mientras que *T3* (0.054 t ha⁻¹) obtuvo los valores mas bajos (Figuras 15, 16 y 17).

Las tasas mas altas de pérdida de suelo en la US-PHablep/2 se presentaron, en general, en los eventos con intensidades moderadas, seguidos por aquellos con intensidades altas, independientemente de la cantidad de precipitación de lluvia acumulada por evento.

T1 registró la mayor cantidad de pérdida de suelo, generada principalmente en los eventos 15 (0.066 t ha⁻¹), 22 (0.036 t ha⁻¹), 23 (0.029 t ha⁻¹), 24 (0.029 t ha⁻¹) y 25 (0.053 t ha⁻¹), con intensidades de 23.84 mm h⁻¹, 9.91 mm h⁻¹, 4.15 mm h⁻¹, 13.92 mm h⁻¹, respectivamente, correspondientes a los meses de Junio y parte de Julio; y en segunda

instancia en los eventos 32 (0.020 t ha^{-1}), 35 (0.020 t ha^{-1}) y 37 (0.021 t ha^{-1}), cuyas respectivas intensidades fueron 1.76 mm h^{-1} , 2.49 mm h^{-1} y 3.29 mm h^{-1} , en parte del mes de Agosto (Figura 15).

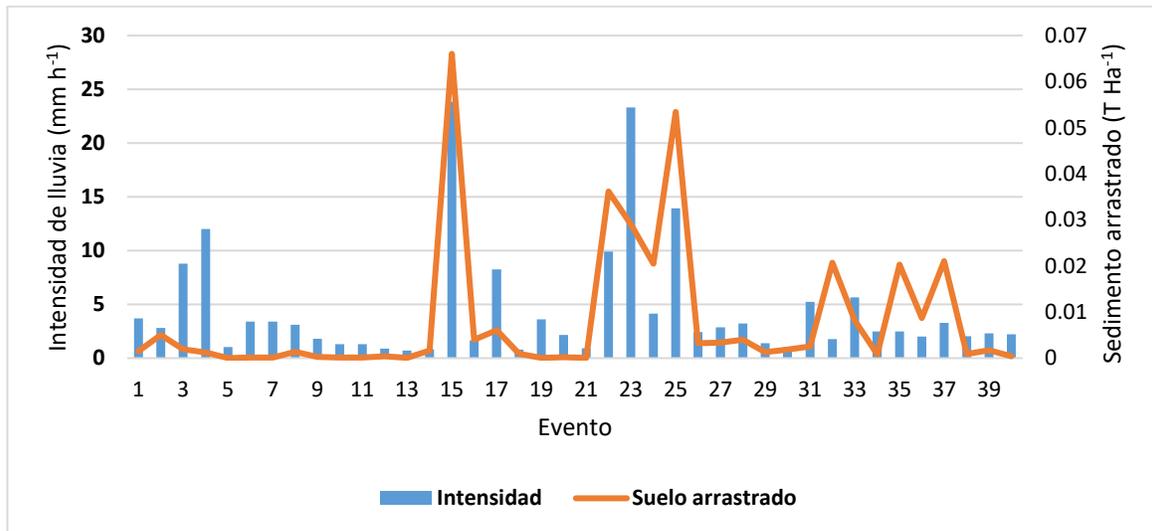


Figura 15. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T1: Suelo desnudo.

T2 obtuvo la mayor cantidad de pérdida de suelo en los eventos 15 (0.10 t ha^{-1}), 22 ($0.047 \text{ ton ha}^{-1}$), 23 ($0.025 \text{ ton ha}^{-1}$), 24 ($0.001 \text{ ton ha}^{-1}$), 25 ($0.006 \text{ ton ha}^{-1}$), 35 ($0.008 \text{ ton ha}^{-1}$) y 36 ($0.004 \text{ ton ha}^{-1}$), con intensidades de 23.8 mm h^{-1} , 9.91 mm h^{-1} , 23.3 mm h^{-1} , 4.15 mm h^{-1} , 13.92 mm h^{-1} , 2.49 mm h^{-1} y 2.02 mm h^{-1} , correspondientes a los meses de Junio, Julio y Agosto (Figura 16).

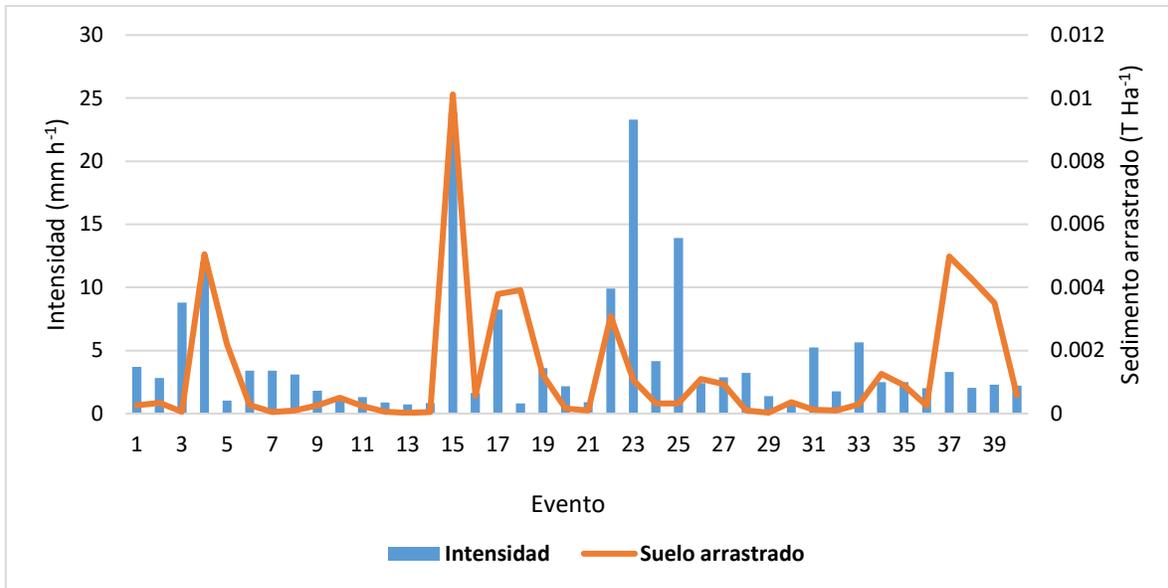


Figura 16. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T2: Barbecho.

T3, por su parte presentó los valores mas elevados de arrastre de suelo para los eventos 4 (0.005 ton ha⁻¹), 15 (0.010 ton ha⁻¹), 17 (0.003 ton ha⁻¹), 22 (0.003 ton ha⁻¹), 25 (0.0003 ton ha⁻¹), 37 (0.004 ton ha⁻¹), 38 (0.004 ton ha⁻¹), 39 (0.003 ton ha⁻¹) y 40 (0.0005 ton ha⁻¹), en intensidades de 12 mm h⁻¹, 23.8 mm h⁻¹, 8.24 mm h⁻¹, 13.92 mm h⁻¹, 3.29 mm h⁻¹, 2.03 mm h⁻¹, 2.3 mm h⁻¹ y 2.22 mm h⁻¹, respectivamente (Figura 17).

Se realizó un analisis de varianza con una confiabilidad del 95 % entre los tres tratamientos, encontrando que los tres tratamientos fueron significativamente distintos ($P < 0.05$), posteriormente se hizo una prueba multiple de media de Tukey, el análisis de pérdida de suelo indica que la tasa de pérdida fue significativamente mayor en T1 (0.338 ton ha⁻¹) respecto a T3 (0.226 ton ha⁻¹), sin embargo no fue estadisticamente diferente a T2 (Cuadro 12).

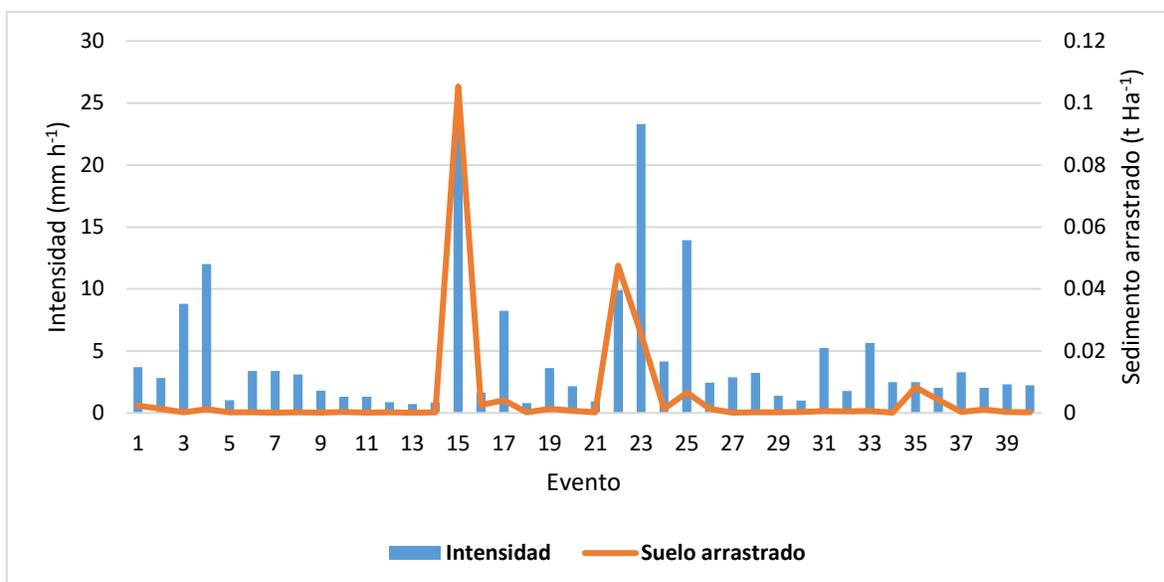


Figura 17. Relación entre intensidad de lluvia y pérdida de suelo en la US-PHablep/2: T3: Barbecho con esquilmo.

Cuadro 12. Medias de pérdida de suelo (t ha⁻¹) para T1, T2 y T3 en US-PHablep/2. Prueba de Tukey (P ≤ 0.05). Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales.

US-PHablep/2			
Tratamiento	Suelo arrastrado (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar
T1: Suelo desnudo	0.338	0.371 a	7.15
T2: Barbecho	0.226	0.251 a	8.24
T3: Barbecho con esquilmo	0.054	0.059 b	1.14

5.3.1. Relación entre Intensidad de lluvia y pérdida de suelo

Para determinar la relación existente entre los valores de pérdida de suelo y las Intensidades de lluvia presentadas durante la duración del experimento se realizó un análisis de regresión lineal para encontrar la aproximación de la relación de dependencia entre la variable Y (Suelo perdido) y la variable independiente X (Intensidad de lluvia).

La US-CLadlv/2 no presentó asociación entre los valores de pérdida de suelo con respecto a la Intensidad de lluvia presentada, lo anterior quizá se debió al comportamiento errático de la lluvia en la región, aunado a la intensa sequía presentada en el año 2015, con escasas lluvias torrenciales (Figura 18)

En la US-PHablep/2, se encontró que en *T1* y *T2*, los valores de R^2 fueron más altos, encontrando mayor asociación entre las dos variables que en *T3*, sin embargo, la asociación en general se presenta baja en los tres tratamientos (Figura 19).

T3 presentó la más baja asociación entre la pérdida de suelo y la intensidad de lluvia, este comportamiento puede deberse a que se ha comprobado que los residuos agregados en suelo reducen la velocidad del escurrimiento y protegen la superficie del suelo del efecto de disgregación de las partículas del suelo cuando es impactada por las gotas de lluvia, tal como menciona Tiscareño y colaboradores (1999).

Algunos autores (Brea y Balcchi (2010); Armengot-Serrano (1994); Moncho (2009)) mencionan que las intensidades moderadas son las que generan mayor cantidad de arrastre de suelo, éste tipo de intensidades son inclusive más agresivas que las intensidades altas.

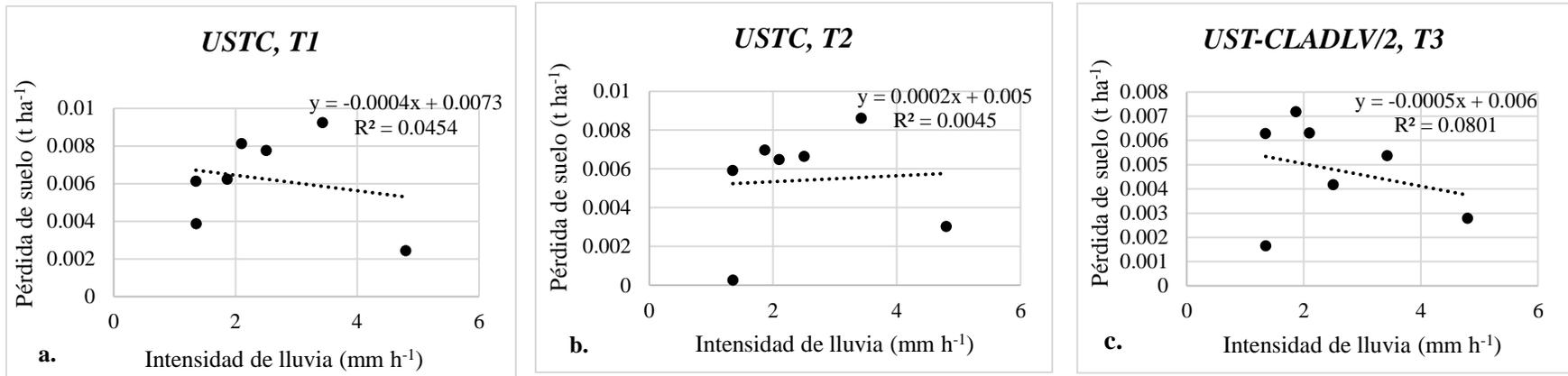


Figura 18. Análisis de regresión lineal entre pérdida de suelo e Intensidad de lluvia en la US-CLadlv/2: a: *T1*, Suelo desnudo; b: *T2*, Condición natural; c: *T3*, Barbecho.

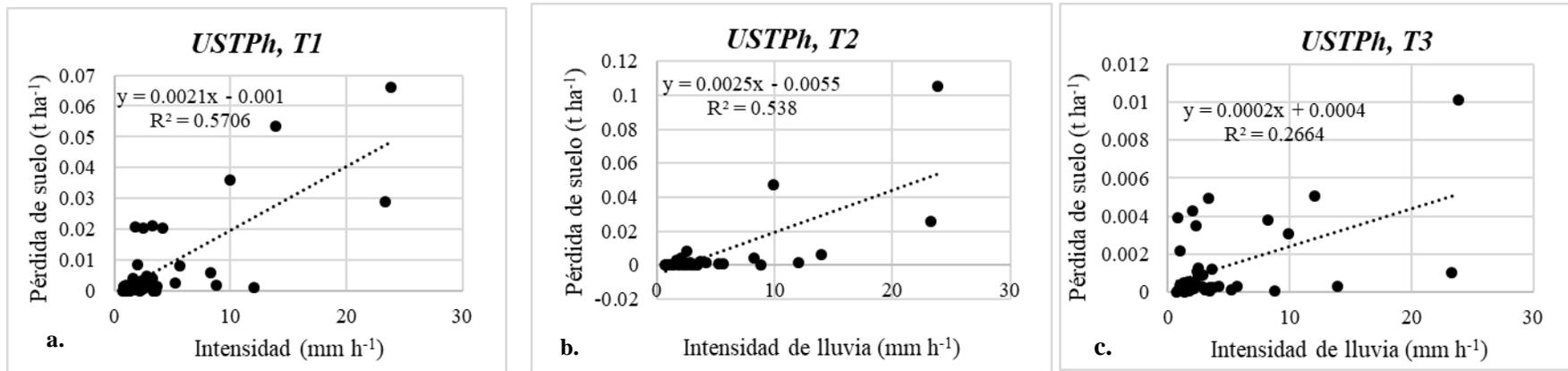


Figura 19. Análisis de regresión lineal entre pérdida de suelo e Intensidad de lluvia en la US-PHablep/2: a: *T1*, Suelo desnudo; b: *T2*, Barbecho; c: *T3*, Barbecho con esquilmo.

García- Chevesich (2008) menciona que variables como cantidad de agua caída (mm) e intensidad de la tormenta (mm/hr), son las que determinan la erodabilidad del evento. Por lo que en una tormenta cuya intensidad es relativamente baja, las tasas de infiltración no serán superadas, por lo que no se producirá escurrimiento superficial, lo anterior aplica en gran medida a los resultados obtenidos en este estudio, ya que tanto en la UST-CLadlv/2 como en la UST-PHablep/2 se presentó la menor cantidad de suelo arrastrado en los eventos de lluvia con intensidades más bajas.

Fournier (1972) y García- Chevesich coinciden en que la duración de tormenta, así como la distribución temporal de su intensidad son factores importantes tanto en el fenómeno de erosionabilidad, así como en la pérdida de suelo. Los autores mencionan que las condiciones iniciales de humedad de suelo desde la última tormenta ocurrida determinan la facilidad del suelo para alcanzar la saturación. Por lo que las intensidades altas y moderadas representan el mayor riesgo para la erosión.

Pese a que la intensidad de la tormenta se encuentra en directa relación con la erosión y arrastre de suelo, de acuerdo con Morgan (2005), son los eventos de intensidad intermedia las que, en el largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo (Morgan, 2005), lo anterior se demostró principalmente en los tres tratamientos para la US-CLadlv/2 y en T1 y T2 para la US-PHablep/2, donde fueron las intensidades moderadas las que causaron mayores cantidades de pérdida de suelo.

5.4. Relación arrastre de sedimento/erosionabilidad

Dado que el Factor K de la EUPS representa un valor que indica la susceptibilidad presente del suelo y que a su vez representa la tendencia que llevará dicho valor en dado caso que no se corrijan los factores que hacen susceptibles al suelo. Se puede inferir que, en la US-CLadlv/2, las

parcelas 1, 2 y 3 que se manejaron con *T1*: suelo desnudo, *T2*: Condición natural y *T3*: barbecho, respectivamente comprobaron que la cantidad de suelo perdido fue diferente de como se esperaba a partir del cálculo de erosionabilidad.

En la US-CLadlv/2, las parcelas 1 y 3, presentaron los valores más bajos de susceptibilidad a ser erosionada con 0.027 t ha h/MJ mm h, que una vez manejados con *T1* y *T3* obtuvieron las tasas de pérdida de suelo de 0.043 t ha⁻¹ y 0.033 t ha⁻¹ respectivamente, siendo *T1* el que obtuvo la mayor tasa y *T3* la menor. En el caso de la parcela 2, ésta obtuvo el valor de K más alto (0.028 t ha h/MJ mm h), y una vez manejado con *T2* fue el segundo en presentar altos valores de suelo perdido con 0.037 ton ha⁻¹. (Figura 20).

Para la US-PHablep/2, la parcela 1 presentó el valor más bajo de K (0.020 t ha h/MJ mm h), que al ser manejada con *T1* obtuvo la mayor pérdida de suelo con un valor de 0.338 t ha⁻¹. La parcela 2 y 3 obtuvieron el valor más elevado de K (0.021 t ha h/MJ mm h), manejada después con *T2* y *T3* respectivamente presentaron valores de pérdida de suelo con 0.226 t ha⁻¹, para *T2* y de 0.054 t ha⁻¹, para *T3*, siendo ésta última la que presentó el menor valor de pérdida de suelo (Figura 21).

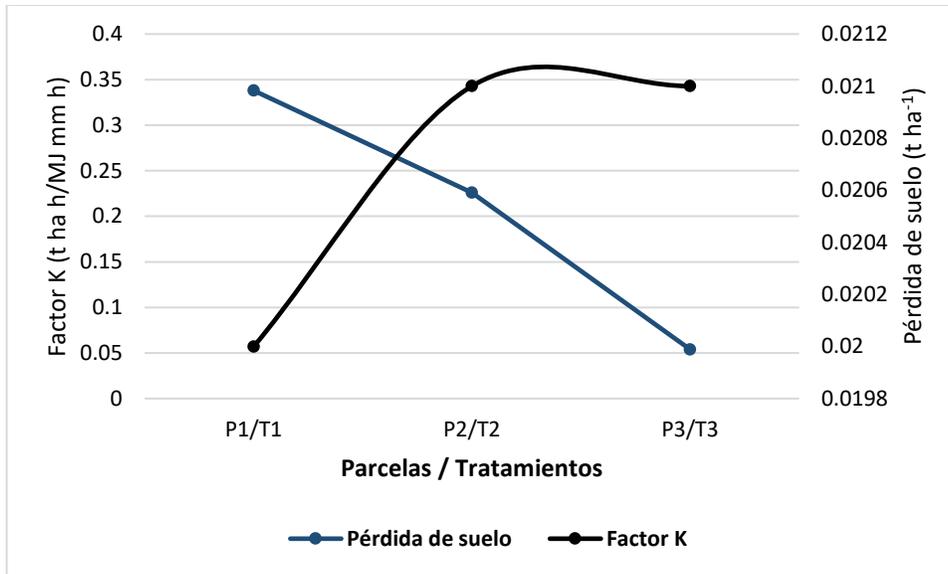


Figura 20. Relación entre valores de erosionabilidad y pérdida de suelo en la US-CLadlv/2 *Las parcelas 1, 2 y 3 corresponden a los diferentes tipos de manejo aplicados *T1*, *T2* y *T3* respectivamente.

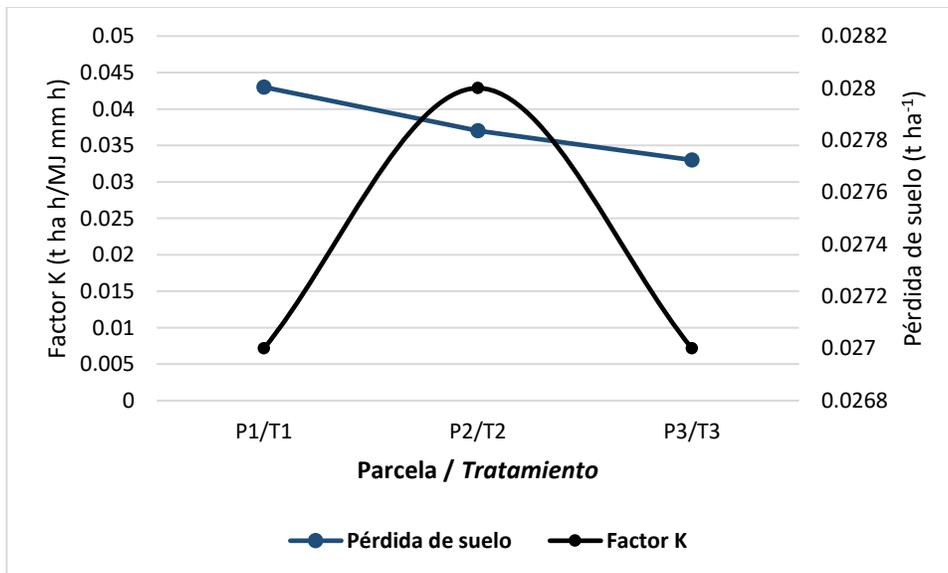


Figura 21. Relación entre valores de erosionabilidad y pérdida de suelo en la US-PHablep/2 *Las parcelas 1, 2 y 3 corresponden a los diferentes tipos de manejo aplicados *T1*, *T2* y *T3* respectivamente.

6. CONCLUSIONES

Los indicadores calculados de K al inicio del experimento permitieron tener una idea clara de cuál era el estado de susceptibilidad inicial que el suelo tenía, sin embargo, se demostró que la aplicación de diversos tipos de manejo de suelo influyó sobre el comportamiento potencial esperado de la dinámica de arrastre de suelo.

En la US-CLadlv/2 se demostró que el manejo con suelo desnudo fomenta el arrastre de sedimento de manera elevada, mientras que el dejar el manejo a condición natural no disminuye el impacto de arrastre del todo. A final de cuentas en este sitio el manejo que presentó mejores resultados en cuanto a la disminución de suelo arrastrado fue aquel al que se le aplicó labores de barbecho.

Para el caso de la US-PHablep/2, el tratamiento bajo condición natural presentó los valores de arrastre más elevados; mientras que, confirmando al igual que en el experimento anterior, el tratamiento con barbecho demostró amortiguar más la pérdida de suelo; sin embargo, en este caso se demostró que la aplicación combinada de barbecho con residuos de cosecha (esquilmo) fue la más eficiente en cuanto a disminución de pérdida de suelo por arrastre.

Los resultados del presente estudio deben ser un referente para siguientes estudios, ya que para realizar estudios más precisos tanto de erosionabilidad como de arrastre de sedimentos se requiere de años de estudio del fenómeno en campo. De igual forma, este estudio debe considerarse como un punto de partida para el diagnóstico y posterior toma de decisiones del manejo de suelos de los productores inmersos en las áreas de influencia de ambos estudios.

7. LITERATURA CITADA

- Alvarado Cardona, Miguel., Colmenero Robles, J. Aurelio., Valderrábano Almegua, Ma. de la Luz. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, noviembre-febrero, 317-326.
- Armengot-Serrano, R. (1994). “Las precipitaciones extraordinarias”. In: Pérez Cueva, A. (Ed.) *Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana*. Conselleria d’Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, Col.lecció Territori, N° 4, 98-99.
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Global assessment of land degradation and improvement: 1. identification by remote sensing (No. 5). *ISRIC-World Soil Information*.
- Bienes, R. (2006). La erosión hídrica: Importancia y clases. Parámetros climáticos condicionantes de la erosión (intensidad, torrencialidad, aridez, déficit hídrico, tamaño de gota). Instituto Madrileño de Investigación y desarrollo rural. Madrid.
- Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Upper Saddle River USA: Pearson Prentice Hall.
- Bravo E., L. Medina O. (2003). Presas construidas con llantas de desecho para la retención de azolves y control de cárcavas Folleto Técnico No. 8, INIFAPCENAPROS, Morelia, Michoacán, México.
- Brea, D., Balchi, F. (2010). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas. UNESCO-Phi-LAC. Documento técnico. ISBN 978-92-9089-152
- Brye, K.R., Morris, T.L., Miller, D.M., Formica, S.J. y Van Eps, M.A. (2004). Estimating bulk density in vertically exposed stoney alluvium using a modified excavation method. *J. Environ. Qual.* 33:1937-1942.

- Campo, R. (2013). La importancia de la Materia Orgánica del suelo y su manejo en producción agrícola. Boletín INIA N° 308. INIA.
- Cantón, Y.; Solé-Benet, A.; de Vente, J.; Boix-Fayos, C.; Calvo-Cases, A.; Asensio, C. y Puigdefábregas, J. (2011). “A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain”. *Journal of Arid Environments*, vol. 75, no. 12. (ser. Deserts of the World Part IV: Iberian Southeast), pp. 1254-1261, ISSN 0140-1963, DOI 10.1016/j.jaridenv.2011.03.004
- Castro, M. I. (2013). “Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 34, no. 2, pp. 3-16, ISSN 1680-0338.
- Cedillo, F. Y. (2003). La desertificación relacionada al cambio climático en México. Tesis de maestría. México: UNAM, Facultad de Filosofía y Letras.
- Cisneros, J., Cholaky, C., González, J., Reynero, M., Diez, A. Bergesio, L. (2012). Erosión hídrica, principios y técnicas de manejo. Universidad Nacional de Río Cuarto. SECYOT. Córdoba.
- Cuéllar C., M.A.1, López I., J.L.2, Carrillo, E.1, Ibañez, D.G.1, Sandoval, J.H.1, Osorio, J.A.3 & Ruiz, G.L.1. (2013). Erosión remontante y control tectonio. Evolución estructural de la cuenca del río Combeima, Colombia. XIV Congreso Colombiano de Geología. Bogota.
- de Prada, J.D., Lee, T.C., Angeli, A.R., Cisneros, J.M., Cantero-G., A. (2008). Análisis multicriterio de la conservación de suelo: Aplicación a una cuenca representativa del centro argentino. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 9: 45-59.

- Dexter, A., Birkas, M. (2004). Prediction of the soil structures produced by tillage. *Soils & Tillage Research*. Vol.79 (2): 233-238. Doi: 10.1016/j.still.2004.07.011
- Dumas, África. (2012). Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo. Universidad Complutense de Madrid. Tesis de maestría. Madrid.
- Duran, Z. V. H.; Francia, M. J. R.; García, T. I.; Arroyo, P. L. y Martínez, R. A. (2012). “Mitigación de la erosión de suelos en plantaciones de almendro por cubiertas vegetales: implicaciones para la agricultura sostenible de montaña (SE España)”. *Comunicata Scientiae*, vol. 3, no. 2, pp. 123-129, ISSN 2177-5133.
- FAO. (2003). Evaluación de la Degradación de la Tierra en Zonas Áridas. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 42 pp.
- FAO. (2000). Guidelines and reference materials on integrated soil and nutrient management and conservation for farmers’ field schools. Report AGL/MISC/27/2000. FAO, Roma.
- FAO (1997). Capítulo 6, Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. Boletín de Suelos de la FAO - 68.
- Ferrán-Conill, A. (2007). “Modelización de la erosión hídrica en los suelos. El enfoque de sistemas en las CTMA”. *Didáctica Ambiental S.L.* ISSN: 1698-5893.
- Figueroa S. B., Amante A., Cortés H. G., Pimentel J., Osuna E.S., Rodríguez J. M., Morales J. F. (1991). “Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión”. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados (CREZAS). México.
- Flores, L., H. E., Ireta, M., J. Pérez D., J.F. Ruíz C. J. A., y Díaz M. P. (2009). Identificación de buenas prácticas agrícolas para reducir la degradación del suelo e incrementar la calidad del agua: Metodología aplicada en la cuenca hidrográfica El Jihuite. Libro Científico N° 1. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. CIRPAC-INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jal. México. 155 p.

- Foster, G. (1987). User requirements: USDA-water erosion prediction project (WEPP) Draft 6.2. USDA-ARS. Purdue, National Soil Erosion Research Laboratory. 43 p.
- Fournier, F. (1972). Soil conservation. Nature and environment series. Council of Europe. 194 p.
- Fuentes, E., Troncoso, J., Bonilla, C. (2001). Operaciones forestales y concentración de sedimentos en cauces naturales I: Formulación de un modelo matemático. Bosque. 22 (2): 15-24.
- García-Chevesich, P. (2008). Procesos y control de la erosión. Outskirts Press. Denver, CO. 276 p.
- García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. (1). 309-334.
- García, A., Cedillo, J., Pérez, J., Balderas, M. (2012). Procesos en el uso de una microcuenca en el altiplano Mexicano. El caso del río san José en el estado de México. Papeles de Geografía. Pp. 63-73.
- Gómez Valentín, M. (2006). Curso de Hidrología Urbana. Barcelona, Distribuidora Alfombra de Papelería, S.L.
- Gómez, F. (2002). Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. UCR. San José, Costa Rica. 191 p.
- González, M. A. B., Pellat, F. P., Gaistardo, C. O. C., Espinoza, J. A. A., Benítez, V. M. R., & Julio, C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Revista Terra Latinoamericana, 34 (3), 271-288.

- González-Sánchez, E. (2003). La importancia de la conservación del suelo frente a la erosión. Informe. Vida rural. Pp. 22-24.
- González, M. (1991). La ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología. 5, 13-50.
- Graf, W.H. (1971). Hydraulics of sediment transport. McGraw-Hill. New York.
- Hernández, C.; Cancio, T.; Ojeda, L.; León, G.; Isaguirre, J. Y Castellón, A. (1996). Uso de diferentes abonos verdes como alternativas de sustituir fertilizantes en el cultivo del tomate, en IV Jornada científica del Instituto de Suelos y II Taller nacional sobre desertificación. Resúmenes. p 112.
- Hincapié-Gómez, E. (2011). Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional. Palmira, Colombia.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I., Barrera, F. (2001). Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. Ciencia e Investigación Agraria, 28(1): 7-14.
- Ibáñez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM. (2012). El factor C de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). <http://hdl.handle.net/10251/16847>.
- Ibáñez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM. (2012). El factor LS de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). <http://hdl.handle.net/10251/16847>.
- Ibáñez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM. (2012). El factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). <http://hdl.handle.net/10251/16847>.
- INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. (2010). Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México: Estado de Aguascalientes.

- INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. (2010). Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México: Estado de Durango.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2013). Compendio de Información Geográfica Municipal: Jesús María, Aguascalientes.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: San pedro del Gallo.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Juárez, E. y Rico, A. (1999). Mecánica de suelos. 2 ed. México. Limusa. 641 p.
- Keller, T.; Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154: 398-406.
- Kinnell, P.I.A. (1990). The mechanics of raindrop-induced flow transport. *Aust. J. Soil Res.* 28: 497 – 516.

- Kinnell, P. I. A. (1993). Runoff as a factor influencing experimentally determined interrill erodabilities. *Aust. J. Soil Res.* 31: 333 – 342.
- Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C. editors. (1980). *Soil erosion*, Chichester: John Wiley. Xiv + 316 pp.
- Lal, R. (1988). *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa, USA. Soil and Water Conservation Society. 244 p.
- López, F. (2003). *La ingeniería en los procesos de desertificación*. TRAGSA-Mundi-Prensa. Madrid. 1045 p.
- López-Santos, A. (2016) Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 34(2), 239-249.
- López-Santos, A., González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G. (2009) Elementos emergentes del Cambio Climático en los estudios de erosión del suelo. *Revista Chapingo, serie Zonas Áridas*. (8). 159-167.
- Loredo-Osti, C., Beltran, S., Moreno, F., Casiano, M. (2007). *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosi*. Libro técnico No. 3. INIFAP – CIRNE – Campo experimental San Luis Potosi. San Luis Potosi, S. L. P. Mexico. 209 p.
- Loredo, O. C. (1994). *Efecto de la reforestación en el control de la erosión hídrica*. Tesis de Maestría en Suelos. UAAAN.
- Martínez H.E., Fuentes J.P. y Acevedo H.E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1): 68-96.

- McKay, R. (2008). A GIS analysis of the impact of soil erosion on archaeological visibility on the island of Antyhythera, Greece. Tren University, pp 186, Canada.
- Mejía Saens, Enrique; Martínez Menes, Mario; Oropeza Mota, J. Luis; Carrillo González, Rogelio; Flores López, Hugo Ernesto; (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. Terra Latinoamericana, abril-junio, 233-244.
- Merritt, W. Letcher, R. y Jakeman, A. (2003). A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling and Software. 18, 761-799.
- Meyer, L.D. (1981). How rainfall intensity affects interrill erosion. Trans. of the ASAE. 23: 1472 - 1475.
- Moncada, J., Anaya, M. (2014). Manejo de la relación agua, suelo, planta y clima para el desarrollo sustentable en lo ambiental, económico y social. El Cotidiano. No 187. Pp.
- Moncho, R. (2009). “Distribución espacio-temporal de la precipitación intensa. Aplicación para el sur de Valencia y norte de Alicante”. Premio Estatal de Meteorología Eduard Fontserè. 1ª Edición. ACAM y AEMET
- Montes-León, M.A., Uribe-Alcántara, E.M., García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua, 2, 1, 5-17.
- Montgomery, D.R, (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. PNAS 104:13268–13272. doi:10.1073/pnas.0611508104
- Morales, M. (2014). Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haiti. Tesis. CATIE. Turrialba.

- Morgan, R. P. C. (2005). Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.
- Morgan, R. P. C. (1997). Erosión y conservación del suelo. Ediciones. Mundi-Prensa. Madrid, 354 pp. 81-85.
- Morgan, R.P.C. (1995). Soil Erosion and Conservation, 2nd Edition. Longman Group and J. Wiley & Sons, Essex, 198 pp.
- Morgan, R. P. C., Morgan, D. D. V., & Finney, H. J. (1986). A simple model for assessing annual soil erosion on hillslopes (pp. 147-159). A. Girogini, & F. Zingales (Eds.). Oxford: Elsevier.
- Nkonya, E., N. Gerber, P. Baumgartner, J. von Braun, A. de Pinto, V. Graw, E. Kato, J. Kloos, and T. Walter. (2011). The economics of land degradation. Toward an integrated global assessment. Development Economics and Policy. Vol. 66. Peter Lang Publishing Group. Frankfurt, Alemania.
- NRCS. (2009). National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, version (1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004, 2009). In: National Engineering Handbook, Engineering Division. US. Department of Agriculture.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2001). La Meteorología y la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertización. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial 50 (2):119-127.
- Osterkamp, W.R. y T.J. Toy. (1997). Geomorphic considerations for erosion prediction. Environ. Geol. 29(374): 152-157.
- Patton, P.C. and Schumm, S.A. (1975). Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. Geology, 3: 88-90.

- Peinado-Guevara, H., Green-Ruíz, C., Delgado-Rodríguez, O., Herrera-Barrientos, J., Belmonte-Jiménez, S., Ladrón de Guevara-Torres, M., Shevvin, V. (2010). Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos. *Ra Ximhai*. Vol. 6: 469-478.
- Piscitelli, M; Varni., M; Sfeir, A; Ares, G. (2010). Valores de erosionabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul- Buenos Aires). *1Rev.Fac. Agron.* Vol. 109 (1): 17- 22.
- Ramírez, M. E., Limas, E. A., Ortiz, P. R., & Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de geografía*, (53-54), 77-88.
- Rivera-Ortiz, P., Andrade-Limas, E., De la Garza-Requena, F., & Castro-Meza, B. (2012). Remontant erosion in desert soils of Tamaulipas, México. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 14. p. 12764).
- Rojas, L. M., Rojas-Palacio, H., Menjívar- Flórez, J. C. (2008). Estimación de la conductividad hidráulica saturada in situ en un suelo tratado con vinaza. *Acta Agron (Palmira)*. 57 (2): 125-128.
- Romero, D. M. A.; Ruiz, S. J.-D. Y Belmonte, S. F. (2011). “Tasas de erosión hídrica en la región de Murcia”. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 56, pp. 129-153, ISSN 0212-9426.
- Ruíz, F., Crispín, A., Gutierrez, N., Ingaramo, O., Briend, M. (2004). Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco). Reporte técnico. UNNE.

- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., García, F., Ponce, J., Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía. UR. Montevideo.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2005). Problemas erosivos. Reporte técnico. México, D.F.
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1), 1-15.
- Sánchez, H. R.; Mendoza, P. J. de D.; De la Cruz, R. J. C.; Mendoza, M. J. E. y Ramos, R. R. (2013). “Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG”. *Universidad y ciencia*, vol. 29, no. 2, pp. 153-161, ISSN 0186-2979.
- Scherrer S, Naef F. (2003). A decision scheme to identify dominant flow processes at the plot-scale for the evaluation of contributing areas at the catchments-scale. *Hydrological Processes* 17: 391–401.
- Simons, D.B. y F. Senturk. (1992). *Sediment transport technology: Water and sediment dynamics*. Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Skidmore, E. L. (1982). Soil loss tolerance. Determinants of soil loss tolerance, (determinantsofs), 87-93.
- Stavi, I., Lal, R. (2015). Achieving Zero Net Land Degradation: Challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*. 142: 44-51.
- SUDAS (Statewide Urban Design and Specifications, USA). (2006). The erosion and sedimentation process. *Iowa Statewide Urban Design Standards Manual*. Iowa, Estados Unidos.

- Taboada, M., Álvarez, C. (2008). Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 237p., 23x16cm ISBN 978-850-29-1074-1
- Tayupanta, J. (1993). La erosión hídrica: procesos, factores y formas. Estación Experimental Santa Catalina. INIAP. Boletín Divulgativo No. 229. Quito, Ecuador. 12 pp.
- Tiscareño, L.M., A.D. Báez y M.A. Velásquez V., K. N. Potter, J.J. Stone, M. Tapia V., and R. Claverán A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central México. *J. Soil & Water Cons.* 54: 686 – 692.
- UNCCD. (2013). 2da Conferencia Científica de la CLD; Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. Recuperado el: 25/11/2015 de: <http://2sc.unccd.int/es/inicio>. ISBN: 978-92-95043-65-7.
- Vahrson, W. G. (1991). Aspectos climáticos de la erosión hídrica en Costa Rica, América Central. Taller de Erosión de suelos. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. P. 33-47.
- Verbist, B.; Poesen, J.; van Noordwijk, M.; Widiyanto; Suprayogo, D.; Agus, F. y Deckers, J. (2010). “Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape”. *CATENA*, vol. 80, no. 1. pp. 34-46, ISSN 0341-8162, DOI 10.1016/j.catena.2009.
- Velásquez, V. M. A., M. Tiscareño L., R. Claverán A. y M. Gallardo V. (1997). Erosión y productividad bajo labranza de conservación. Avances de Investigación en suelos de estado de Michoacán. Folleto Técnico Núm.1. CENAPROS-INIFAP. 34 p.

- Vich, A. I. y Mariani, A. (2010). “Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado del centro-oeste de Argentina”. *Multequina*, vol. 19. No. 1. ISSN 0327-9375.
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Sci Soc Am J* 23: 246–249. doi: [10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x](https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x).
- Walkley, A. and I. A. Black. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Wischmeier, W. H. (1975). Estimating the soil loss equations cover and management factor for undisturbed lands. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, ARS-S-40, Agr. Res. Serv., U.S. Dept. of Agr. Washington, DC, pp. 118-125.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. (1978). *Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning*. USDA Handbook 537. U S Government Printing Office, Washington, D. C.