



Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial

---

**Valoración de los Ecosistemas Semiáridos para el Bienestar Social**  
**Tesis de Maestría**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias y Tecnología línea terminal Metrología**

Presenta

**Víctor Manuel Coronel Martín**

Que en colaboración con la Universidad Autónoma de Querétaro, UAQ

Dirige

**Dr. Enrique González Sosa**

Co – Dirección de Tesis

**M en C y T. Silvia Martínez Martínez (CIDESI)**

Autor agregado de Tesis (Agradecimiento)

**Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez (UAQ)**

Santiago de Querétaro, Qro. Diciembre 2019

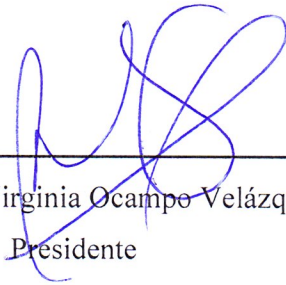


## CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Mtro. Emerenciano Salvador Lecona Uribe  
Director PICYT – CIDESI  
Querétaro

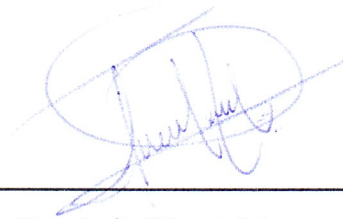
Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno Víctor Manuel Coronel Martín, una vez leída y revisada la Tesis titulada “Valoración de los Ecosistemas Semiáridos para el Bienestar Social”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de Metrología durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 10 días del mes de Diciembre del año dos mil diecinueve.



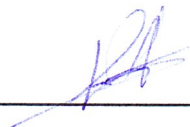
---

Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez  
Presidente



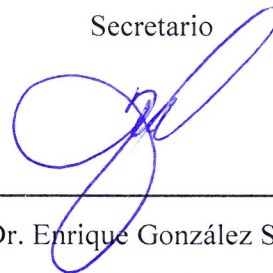
---

Dra. Irais Gómez López  
Secretario



---

M. en C. y T. Silvia Martínez Martínez  
Vocal



---

Dr. Enrique González Sosa  
Suplente



## CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Mtro. Emerenciano Salvador Lecona Uribe

Director PICYT – CIDESI

Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Víctor Manuel Coronel Martín, una vez leída y revisada la Tesis titulada “Valoración de los Ecosistemas Semiáridos para el Bienestar Social”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de Metrología durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 10 días del mes de Diciembre del año dos mil diecinueve.

---

Dr. Enrique González Sosa  
Director de Tesis

---

M. en C. y T. Silvia Martínez Martínez  
Co Director de Tesis

## Resumen

La caracterización de los ecosistemas semiáridos es fundamental para apoyar las acciones y planes orientados al bienestar social debido a que más del 50% de nuestro territorio mexicano está cubierto por este ambiente, actualmente los ecosistemas semiáridos son marginados y en consecuencia los estudios son escasos (Mastachi. C., 2007). La importancia de estos ecosistemas se debe a la relación de la vegetación con las interacciones suelo–biosfera–atmósfera, además que los beneficios económicos son tales como: obtención de leña, fabricación de muebles y artesanías, producción de miel, entre otros. Estos ecosistemas se ven condicionados a un adecuado abasto de agua natural y fluvial así como prácticas para la abundancia de vegetación, además pueden ser afectados por la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica. De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] y la Universidad Autónoma de Chapingo [UACH] se estima que la superficie nacional afectada por erosión hídrica y eólica es del 61.7% (2013). En el mismo año, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] reporta que el 55% de México está afectado por la misma causa, se deriva en una discrepancia de las cantidades reportadas. Situación detectada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (Mojica. L *et al.*, 2017).

El presente trabajo, tiene como objetivo valorar los ecosistemas semiáridos del centro del país, en la región del sur del desierto Chihuahua, Altiplano, se midió mediante la estimación de la erosión hídrica en forma empírica y experimental. El área de estudio es conocida como “*Predio el Cortijo*” con coordenadas 21°13'19.9"N 100°47'58.2"W y clima BS1kw: Desértico frío según Köppen–Geiger; en contexto con el Plan Nacional de Desarrollo [PND] para el periodo 2019 – 2024 del Gobierno Federal, que analiza, mide y caracteriza la erosión para estimar sus efectos e impactos con fines del bienestar social.

La erosión hídrica se cuantificó a través de un modelo paramétrico lineal conocido como “*Revised Universal Soil Loss Equation*”, por sus siglas en inglés, (R) USLE, y se instrumentó una parcela experimental a fin de medir en forma directa las variables de dicho modelo, como a continuación se describe:

- Factor [R], erosividad de la lluvia, se instalaron pluviómetros totalizadores y automáticos lo que permite obtener la cantidad de lluvia total para calcular [R] por el método de (Cortés. T., 1991).
- Factor [K], erosionabilidad del suelo, se tomaron muestras del suelo y se procesaron para su análisis mecánico, físico y químico, se determinó su capacidad y vulnerabilidad a ser erosionado, lo anterior se realizó a tres condiciones de vegetación, suelo expuesto, suelo con vegetación herbácea, suelo con vegetación herbácea y arbórea.
- Factor [LS], longitud y grado de pendiente, se cuantificó en medición indirecta a través de los modelos de elevación digital [DEM] a 30 [m], con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica [SIG, ArcGIS] y Sensores Remotos [SR, SRTM], se identificó la topografía del área de estudio y cómo aporta esta al transporte del suelo.
- Factor [C], manejo y uso del suelo o también conocido como cobertura vegetal, se cuantificó en forma indirecta a través de las imágenes en formato GEOTIFF a 10 [m], con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica [SIG, ArcGIS], y con Sensores Remotos [SR, Landsat8]. Se estimó el porcentaje de ocupación de la vegetación en forma clasificada y ponderada, se asignó un índice para ser aplicado en forma directa a la ecuación que mide erosión hídrica. Antes de hacer la clasificación supervisada se puede procesar un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [NDVI] para apoyar el realce de la vegetación.

Para contrastar los resultados obtenidos del (R) USLE en medición directa e indirecta, fueron comparados los métodos con el fin de establecer las bondades y diferencias entre ellos. Finalmente en acuerdo al grado de erosión hídrica se recomienda establecer un programa de recuperación del suelo y su materia orgánica [MO] a través de prácticas de conservación, Factor [P], que favorezca el bienestar social.

#### Palabras Clave

Bienestar Social, Ecosistemas Semiáridos, Erosión Hídrica, (R) USLE, Metrología, Sensores Remotos, Sistemas de Información Geográfica.

## Summary

Characterization of semi-arid ecosystems are fundamental to support the actions and plans oriented to social well-being due to more than 50% of Mexican territory is covered by this kind of environment, nowadays, semi-arid ecosystems have some disadvantages, for example, there is not enough research (Mastachi. C., 2007). The relevance of this ecosystem is by its vegetation and interactions with the soil-biosphere-atmosphere, also the economic benefits due to the activities like gathering firewood, furniture and craft products manufacture, honey production. This ecosystem is restricted to good water catchment and vegetation care practices; further can be affected by soil loss due to hydric erosion. The Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] and Universidad Autónoma de Chapingo [UACH] estimate 61.7% of national surface affected by hydric and eolic erosion (2013). In the same year, the Instituto Nacional de Estadística y Geográfica [INEGI] reports 55% of hydric erosion. The Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] notices that the results do not converge (Mojica. L *et al.*, 2017).

The present research has the objective to evaluate in the semi-arid ecosystems of the country downtown, the Chihuahua desert, Plateau, the hydric erosion. The experimental site is known as “*Predio el Cortijo*” with the location 21°13'19.9"N 100°47'58.2"W and weather BS1kw: cold-desert per Köppen–Geiger. This research is following the National Plan for Social Growth [PND] for period of 2019 – 2024, which analyzes measures and characterizes the hydric erosion to estimate the effects and impacts in the social well-being.

The hydric erosion is measured through a linear parametric model known as “*Revised Universal Soil Loss Equation*”, (R) USLE, and with *in situ* instrumentation to make a direct measure of its model variables:

- [R] Factor, rainfall erosivity, locally was installed totalizer pluviometers and automatic pluviometers to quantify total rainfall to get [R] by (Cortés. T., 1991) method.

- [K] Factor, soil erodibility, locally were picked up soil samples to be processed by laboratory analysis for mechanical, physic and chemistry tests to know soil capacity and vulnerability to be eroded; these samples were picked up from three different vegetation characterization, exposed soil, grasslands, and semiarid trees.
- [LS] Factor, length and degree of slope was quantified by indirect measurements through Digital Elevation Models [DEM] of 30 [m], with the help of Geographic Information Systems [SIG, ArcGIS] and Remote Sensors [SR, SRTM], identifying the topography of study area and how it is contributing to the soil transporting.
- [C] Factor, using and handling of the soil also known as vegetal layer, was quantified by indirect measurements through images in GEOTIFF format of 10 [m], with the help of Geographic Information Systems [SIG, ArcGIS] and Remote Sensors [SR, Landsat8], to estimate the vegetation density percentage in classified form that is assigned to the model equation of hydric erosion. Before to make a supervised classification a Normalized Difference Vegetation Index [NDVI] can be done to visualize better the vegetation.

To check it out if the results are converging (R) USLE direct measurement or indirect measurement, the hydric erosion was measured at direct form putting containers in the three conditions mentioned before. With this measurement, we can get the corrected model plus the results convergence grade for real results and estimated results. Finally, knowing the hydric erosion grade, a proposal is done for soil recovery and its soil organic carbon through preservation practices, Factor [P], for favors social well-being.

#### Keywords

Social Welfare; Semiarid Ecosystem; Hydric Erosion; (R) USLE; Metrology; Remote Sensors; Geographic Information Systems.

## Dedicatoria

A la memoria de mi niño Ian Coronel.



## Agradecimientos

A CONACyT por la beca nacional y mixta que otorgo para realizar mis estudios de maestría en forma nacional e internacional.

Al PICyT en CIDESI por el soporte administrativo y académico.

Al Laboratorio de Hidráulica de la UAQ por la colaboración en mi maestría.

Al Laboratorio de Metrología de CIDESI por la colaboración en mi maestría.

Agradecimiento especial al Dr. Enrique González Sosa por la vocación que demuestra, la enseñanza que brinda, todo el soporte académico, su valioso tiempo, la excelente asesoría y guía para la realización de esta tesis y mi maestría.

Agradecimiento especial a los revisores de la tesis por su tiempo y conocimiento.

Agradecimiento especial a la Señora María Virginia Velázquez Jiménez por el interés en apoyar la investigación al permitir experimentar en “*Predio el Cortijo*”.

A la Universidad Federal de Lavras, en Brasil, por la formación académica durante mi estancia, en especial al Dr. Nilton Curi, al Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior y al Dr. Junior Cesar Avanzi.

Al Mtro. Armando González Basaldúa y al Mtro. Emerenciano Salvador Lecona Uribe por su guía y apoyo para la realización de mi maestría.

A los maestrantes Ana Berenice García Pérez y Antonio Carlos Yado Loredo, así como al Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza y al Laboratorio de Geotecnia de la UAQ por las facilidades para la experimentación y soporte académico.

## Índice

	Página
Resumen.....	i
Summary .....	iii
Dedicatoria .....	v
Agradecimientos .....	vi
Índice.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. BIENESTAR SOCIAL.....	5
2.1. Definición.....	5
2.2. Concepción y medición.....	6
3. EROSIÓN HÍDRICA .....	11
3.1. El Suelo .....	11
3.1.1. <i>Formación del suelo</i> .....	12
3.1.2. <i>La degradación del suelo</i> .....	12
3.1.3. <i>Límites permisibles de erosión hídrica [LPE]</i> .....	14
3.1.4. <i>Factores que influyen en la erosión</i> .....	15
3.2. Medición de la erosión hídrica [A] por método directo.....	15
3.2.1. <i>Medición de la erosividad de la lluvia</i> .....	16
3.2.2. <i>Medición de la erosionabilidad del suelo</i> .....	17
3.2.3. <i>Medición de la longitud de la pendiente a través de los [DEM]</i> .....	19
3.2.4. <i>Medición del grado de la pendiente a través de los [DEM]</i> .....	20
3.2.5. <i>Medición del uso y manejo del suelo a través de imágenes GEOTIFF</i> .....	20
3.2.6. <i>Estimación de las prácticas de conservación del suelo</i> .....	21
4. OBJETIVO E HIPÓTESIS.....	22
4.1. Objetivo.....	22
4.2. Hipótesis.....	22
4.3. Objetivos específicos .....	22

5.	NORMAS QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN .....	23
5.1.	Normatividad para medir la erosividad de la lluvia.....	23
5.1.1.	<i>Precipitación</i> .....	23
5.1.2.	<i>Instrumentos de observación</i> .....	24
5.1.3.	<i>Pluviómetros</i> .....	25
5.1.4.	<i>Estándares internacionales y nacionales</i> .....	27
5.1.5.	<i>Técnicas de calibración</i> .....	29
5.1.6.	<i>Fuentes de error</i> .....	30
5.1.7.	<i>Modelo de incertidumbre</i> .....	31
5.1.8.	<i>Características de los pluviómetros empleados para la experimentación</i> .....	33
5.2.	Normatividad para medir la erosionabilidad del suelo .....	33
5.2.1.	<i>Instrumentos de observación</i> .....	33
5.2.2.	<i>Cribas</i> .....	36
5.2.3.	<i>“Anillo permeámetro”</i> .....	39
5.2.4.	<i>MUFLA</i> .....	41
5.2.5.	<i>Estándares internacionales y nacionales</i> .....	41
5.2.6.	<i>Fuentes de error</i> .....	43
5.2.7.	<i>Modelos de incertidumbre</i> .....	44
5.2.8.	<i>Características de instrumentos de medición empleados en experimentación</i> .	47
6.	UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	48
7.	RESULTADOS .....	50
7.1.	Resultados de (R) USLE medición indirecta .....	50
7.1.1.	<i>[R] estimada por medición indirecta</i> .....	51
7.1.2.	<i>[K] estimada por medición indirecta</i> .....	55
7.1.3.	<i>[LS] estimada por medición indirecta</i> .....	60
7.1.4.	<i>Erosión hídrica potencial estimada por medición indirecta</i> .....	61
7.1.5.	<i>[C] estimada por medición indirecta</i> .....	62
7.1.6.	<i>Erosión hídrica estimada por medición indirecta</i> .....	66
7.2.	(R) USLE medición directa.....	66
7.2.1.	<i>[R] estimada por medición directa</i> .....	67
7.2.2.	<i>[K] estimada por medición directa</i> .....	69

7.2.3. Erosión hídrica estimada por medición directa.....	73
7.3. Captación de sedimentos por medición directa.....	73
7.4. Comparación de la erosión hídrica estimada por el método captación de sedimentos (observado) y (R) USLE medición directa (pronosticado) .....	75
8. DISCUSIONES .....	76
8.1. Pros y contras de las metodologías empleadas .....	76
8.2. ¿Cómo se comporta (R) USLE?.....	77
8.3. ¿Cómo se comporta la vegetación?.....	78
8.4. ¿Cómo se comporta la [MO]?.....	78
8.5. Eficiencia del método captación de sedimentos contra (R) USLE .....	79
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
9.1. Conclusiones .....	80
9.2. Recomendaciones.....	80
BIBLIOGRAFÍA .....	81
SIMBOLOGÍA.....	86
ANEXOS .....	90

## Índice de tablas

Tabla 1. Principales causas degradación del suelo [ $10^6$ ha] (Arnold. E., 1992) .....	3
Tabla 2. Estado del arte para estimar erosión hídrica con SIG y SR .....	11
Tabla 3. LPE por la profundidad y el material padre (SARH., 1977).....	14
Tabla 4. Estructura del suelo (Wischmeier. W y Smith. D., 1978).....	17
Tabla 5. Permeabilidad suelo (Wischmeier. W y Smith. D., 1978).....	18
Tabla 6. Estimación de [pm] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978).....	19
Tabla 7. Desviación máxima aceptable (BS., 2012) .....	28
Tabla 8. Clases del indicador de lluvia (UNI., 2012).....	28
Tabla 9. Calibración para pluviómetros (WMO., 2017) .....	29
Tabla 10. Juego de mallas (SCT., 2003).....	37
Tabla 11. Suelo típico del estado de Guanajuato. ....	49
Tabla 12. Régimen de lluvias por CONAGUA para Guanajuato .....	52
Tabla 13. [K] en acuerdo a la (FAO., 1975) .....	56
Tabla 14. [C] en acuerdo a la (FAO., 1975).....	63
Tabla 15. Estructura del suelo en $\varnothing$ de 0.002 – 0.10 [mm] y 0.10 – 2.00 [mm] .....	69
Tabla 16. Estructura del suelo valor nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978) ..	69
Tabla 17. Segundo bloque valor de nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978) ...	70
Tabla 18. Permeabilidad valor del nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978) .....	71
Tabla 19. Algunas posibles combinaciones para el método (R) USLE .....	77

## Índice de figuras

Figura 1. Índice global de aridez.....	1
Figura 2. Sistemas de información geográfica.....	2
Figura 3. Mapa de sequía para México.....	3
Figura 4. El suelo como parte del bienestar social.....	6
Figura 5. Índice de desarrollo humano para México.....	7
Figura 6. La vegetación atenuadora de la erosión.....	8
Figura 7. Ciclo de la vida a partir de la [MO].....	9
Figura 8. Suelo degradado con tendencia a la desertificación por pérdida de [MO].....	10
Figura 9. Componentes del suelo.....	11
Figura 10. Mecanismos responsables de la degradación.....	13
Figura 11. Ciclo de erosión hídrica.....	13
Figura 12. [R] para México por (Cortés. T., 1991).....	16
Figura 13. Nomograma para [K] por (Wischmeier. W y Smith. D., 1978).....	18
Figura 14. Posición de los captadores pluviales.....	24
Figura 15. Primeros instrumentos de observación (WMO., 2014).....	25
Figura 16. Medidor pluvial totalizador.....	25
Figura 17. Medidor pluvial automático del tipo “tipping - bucket” (WMO., 2014).....	26
Figura 18. Determinación de la estructura del suelo.....	34
Figura 19. “Anillo permeámetro” de carga constante.....	35
Figura 20. Esquema de una MUFLA (Andrades. M. et al., 2015).....	36
Figura 21. Juego de cribas.....	38
Figura 22. Hidrómetro (UMASS LOWELL., 2015).....	38
Figura 23. “Anillo permeámetro” (DEP, 2013).....	39
Figura 24. Esquema de un “anillo permeámetro” (DEP, 2013).....	40
Figura 25. MUFLA.....	41
Figura 26. Incertidumbre de la estructura del suelo.....	44
Figura 27. Ubicación Área de Estudio.....	48
Figura 28. Metodología para estimar erosión hídrica en “Predio el Cortijo”.....	50
Figura 29. Mapa de régimen de lluvias para Guanajuato.....	51

Figura 30. Gráfica de precipitación estaciones meteorológicas de CONAGUA en Gto .	53
Figura 31. Comportamiento mensual de la precipitación en Guanajuato .....	54
Figura 32. Mapa de [R] para Guanajuato.....	55
Figura 33. Unidad de clasificación del suelo para Guanajuato.....	56
Figura 34. Mapa de [K] para Guanajuato.....	60
Figura 35. Mapa [LS] para Guanajuato .....	61
Figura 36. Erosión hídrica potencial para Guanajuato.....	62
Figura 37. Mapa [C] para Guanajuato.....	65
Figura 38. Erosión hídrica para Guanajuato .....	66
Figura 39. Gráfica lectura de los pluviómetros para “Predio el Cortijo” .....	67
Figura 40. Mapa régimen de lluvias para “Predio el Cortijo” .....	68
Figura 41. Mapa [R] para “Predio el Cortijo” .....	68
Figura 42. Gráfica de [MO] para “Predio el Cortijo”.....	70
Figura 43. Gráfica de permeabilidad para “Predio el Cortijo” .....	71
Figura 44. Gráfica nomograma de [K] para “Predio el Cortijo” .....	72
Figura 45. Mapa [K] para “Predio el Cortijo” .....	72
Figura 46. Erosión hídrica para “Predio el Cortijo” .....	73
Figura 47. Evidencia de la erosión hídrica para “Predio el Cortijo” .....	74
Figura 48. Erosión hídrica por medición directa.....	75
Figura 49. Pérdida de [MO] para el evento de lluvia de 502 [mm] .....	79

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas semiáridos son muy diversos en su composición vegetal, fauna, recursos hídricos y en sus actividades económicas para el bienestar social. El deterioro de las condiciones naturales de los ecosistemas semiáridos, llevan a una pérdida de suelo que por resultado disminuye el porcentaje su cantidad de [MO], destacando en un suelo de estructura frágil. Por lo anterior, se busca que el suelo frágil sea mundialmente investigado para mitigar su efecto con programas de conservación de suelo (Verón. S *et al.*, 2006). La superficie mundialmente cubierta por este tipo de ecosistemas semiáridos corresponde al 40% global (Deichmann. U y Eklundh. L., 1991), y lo habitan aproximadamente un billón de personas (UNSO., 1997) (Reynolds. J y Stafford. S., 2002), ver Figura 1.

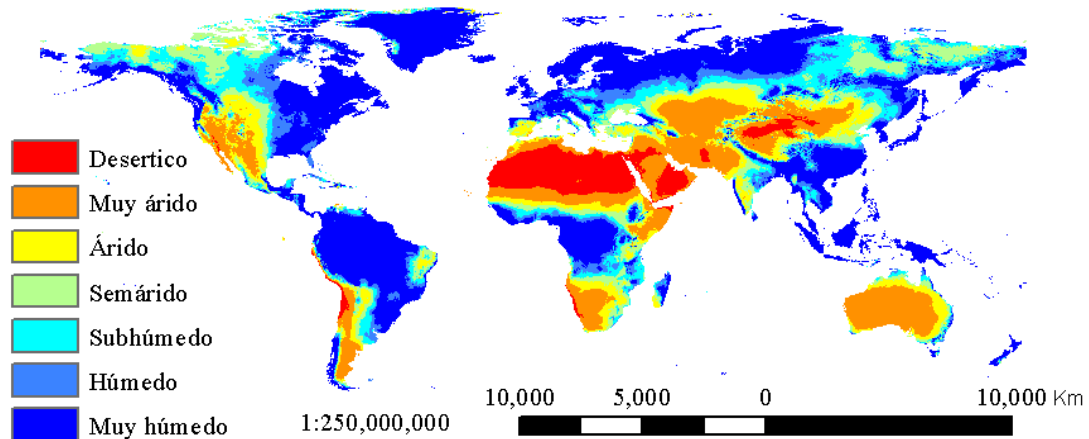


Figura 1. Índice global de aridez

En México, la investigación orientada a cuantificar el estado de los ecosistemas semiáridos es insuficiente, en consecuencia la identificación de las características para las actividades económicas a desarrollar en función del bienestar social se ausenta. Los organismos oficiales en México que se encargan de monitorear y cuantificar periódicamente los fenómenos como el erosión hídrica por ejemplo, no muestran un consenso para entregar valores convergentes al momento de reportar los resultados, siendo lo anterior un problema potencial para caracterizar el estado real de los ecosistemas semiáridos. La realidad es que en los últimos 70 años, a pesar que los



porcentajes de erosión hídrica son determinados por métodos como (R) USLE por ejemplo, aún se continúa generando conflictos en la publicación de resultados, por la incertidumbre de los datos que se muestran (Verón. S *et al.*, 2006).

Para cuantificar la erosión hídrica hoy en día es posible hacerlo a través de los SIG, que son resultado de los avances tecnológicos en procesamiento de datos, se emplean [DEM] e imágenes en formato GEOTIFF que se obtienen de satélites que están o han estado en órbita pero aún se conservan sus informaciones, con ello se facilita la exploración a grandes escalas de las regiones, en el cómputo asistido (UNSO., 1997), ver Figura 2.



Figura 2. Sistemas de información geográfica

Para la caracterización de la erosión hídrica, es decir, la pérdida del suelo, se utilizan métodos de medición directos o indirectos. Los métodos directos comprenden mediciones *in situ* por diferentes técnicas, por ejemplo la captación de sedimentos en contenedores, con ello se capta la pérdida del suelo, siendo uno de los indicadores para la determinación de la desertificación proveniente de cuencas con ecosistemas semiáridos (UNSO., 1997), ver Tabla 1.

Tabla 1. Principales causas degradación del suelo [ $10^6$  ha] (Arnold. E., 1992)

Región	Deforestación	Sobre Pastoreo	Agricultura	Sobre Explotación	Bio - industrial	Total
África	18.60	184.6	62.20	54.00	0.00	319.40
Asia	115.50	118.80	96.70	42.30	1.00	374.30
Oceanía	4.20	78.50	4.80	2.00	0.00	89.50
Europa	38.90	41.30	18.30	2.00	0.90	101.40
América	36.50	53.90	53.00	15.20	0.00	158.60
Total	213.70	477.10	235.00	115.50	1.90	1043.20

La degradación del suelo en ecosistemas semiáridos, está relacionado con las actividades humanas, cambio climático, entre otras, que ocasionan incrementos en la temperatura, y causan un aumento (inundaciones) o disminución (sequía) de lluvias, y con ello la producción de la erosión hídrica que aumenta o disminuye la cantidad de [MO] del suelo hasta por un 25% (Kemp. P *et al.*, 2003). La [MO] que actúa como una unión entre las partículas del suelo, mejora la capacidad de cohesión y estabilidad del suelo, por lo anterior se determina que si el suelo carece de [MO], será más vulnerable a la erosión hídrica (Goudie. A., 2008) (Kusky. T., 2009), ver Figura 3.

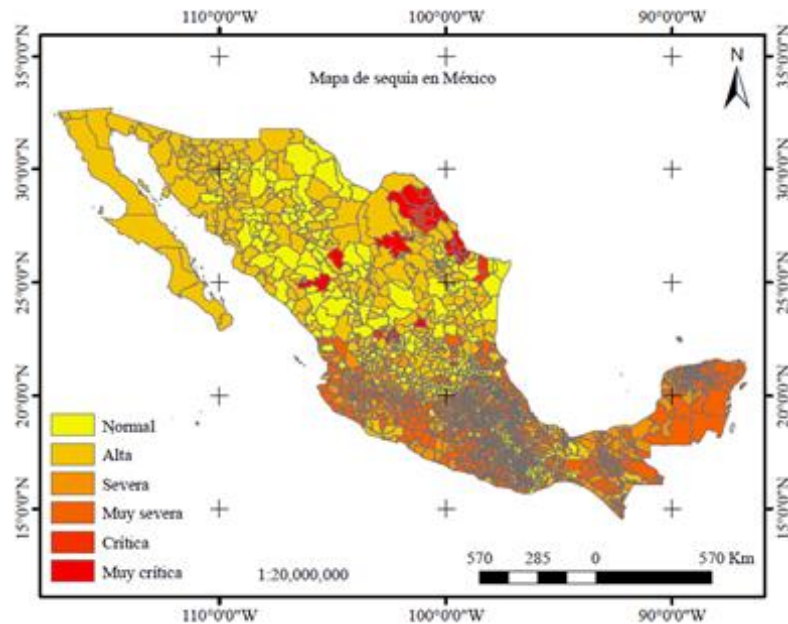


Figura 3. Mapa de sequía para México

El (Gobierno Federal., 2019) en México como parte de sus objetivos en el PND, en el capítulo 3, en el apartado Autosuficiencia Alimentaria y Rescate del Campo, propone el impulso de la restauración de pequeñas parcelas con programas para la gestión en la conservación del suelo. También el programa sembrando vida en el objetivo 4 de SAGARPA, considera el contribuir a revertir el deterioro de los ecosistemas en la producción primaria a través de preservar el suelo (SAGARPA., 2008).

Por lo anterior, para cumplir, con dichos objetivos es necesario definir claramente los métodos y técnicas que caracterizan el indicador que cuantifica el grado de erosión hídrica del suelo, y con ello poder proponer la actividad económica que se puede desarrollar en función del bienestar social para la población que habita.

## 2. BIENESTAR SOCIAL

### 2.1. Definición

En acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (RAE., 2019), la definición de bienestar social está compuesta de dos vocablos:

*Del bien y estar*

- *m. Conjunto de las cosas necesarias para vivir bien*
- *m. Vida holgada o abastecida de cuanto conduce a pasarlo bien y con tranquilidad*
- *m. Estado de la persona en el que se le hace sensible el buen funcionamiento de su actividad somática y psíquica*

*Del latín Socialis*

- *adj. Perteneciente o relativo a la sociedad*
- *adj. Perteneciente o relativo a una compañía o sociedad, o a los socios o compañeros, aliados o confederados*

Por otra parte, con base en el Diccionario Jurídico Mexicano (Suprema Corte de Justicia de la Nación., 2019), la definición de bienestar social es:

*Es la contribución de la sociedad moderna al mejoramiento de la persona a efecto de que cada vez dependa menos de su esfuerzo individual y obtenga mayores satisfactores que le permitan una vida saludable, sin graves preocupaciones y con las mínimas comodidades que sea posible disfrutar*

En este contexto, podemos sintetizar que bienestar social es:

*Conjunto de cosas que permiten tener una vida holgada para el buen funcionamiento somático y psíquico de la sociedad o población*

## 2.2. Concepción y medición

El alcanzar el bienestar social de la población, genera metas en cualquier país, porque conlleva a niveles positivos de educación, salud e ingreso, aunado de bajos niveles de inequidad social.

El bienestar social es la saciedad que experimentan los individuos que componen una comunidad en función de sus necesidades, desde las más vitales hasta las más superfluas (Duarte. T. y Jiménez. R., 2007). El concepto de bienestar social debe ser entendido como el proceso tendiente a crear las condiciones necesarias para ampliar las oportunidades de participación activa de diversos actores (sociedad civil, sector privado y sector público) en el manejo eficiente de los recursos naturales, tecnológicos y humanos. Este proceso tiene como objetivo obtener una mayor capacidad autónoma de crecimiento y modificar las relaciones entre los grupos sociales, de forma que conlleve mejoras económicas y un mayor nivel de bienestar de la población (Parra. M. *et al.*, 1982), ver Figura 4.

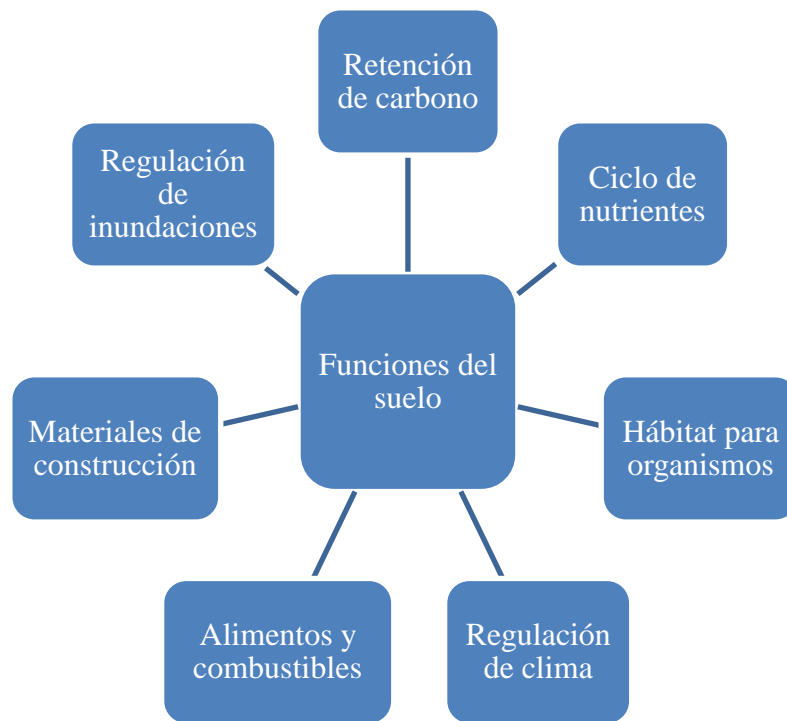


Figura 4. El suelo como parte del bienestar social

Para la medición del bienestar social, se han utilizado principalmente tres enfoques: el puramente económico, el basado en las funciones de utilidad y el realizado a través de indicadores sociales (Pena. B., 2009). El enfoque que opta por utilizar indicadores sintéticos, a partir de los cuales se obtiene una perspectiva global del bienestar, ha motivado la creación de distintos índices entre los que destaca el Índice de Desarrollo Humano [IDH]. El IDH, publicado por primera vez en 1990 por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], retomado los postulados de Amartya Sen (1981), es un mecanismo de medición del nivel de desarrollo de un país, estado o región a partir de la determinación de su grado de bienestar social. Considera para ello las condiciones de salud, educación e ingreso de las personas, cada una de estas dimensiones se ponderan de la misma manera en el índice (PNUD., 2009). Como consecuencia de sus simplicidad y fácil acceso a la información estadística requerida, se ha convertido en el mecanismo más utilizado para medir el desarrollo humano y el bienestar social, así como el éxito o fracaso de las políticas aplicadas en las naciones (PNUD., 2009), ver Figura 5.

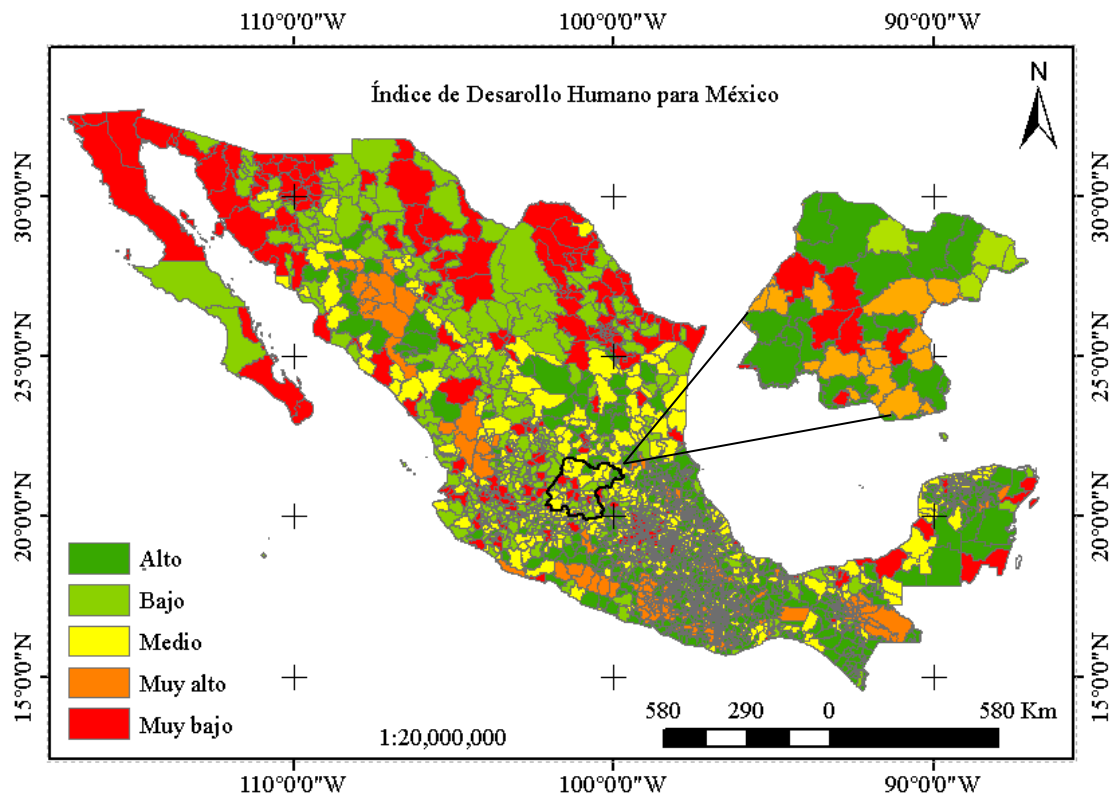


Figura 5. Índice de desarrollo humano para México

El bienestar social por el beneficio del suelo, constituye un recurso económico esencial de los sistemas productivos. La sustentabilidad de estos sistemas depende de su manejo y su [MO], la cual se convierte en un indicador de calidad. La pérdida de [MO] no es percibida como un hecho alarmante o preocupante por el productor, la razón es que no se da cuenta, el contenido de [MO] tampoco constituye un parámetro que determine el valor comercial ni el de arrendamiento de su predio (Trossero. M. *et al.*, 2012). Sin embargo, desde hace años los investigadores presentan resultados de trabajos en los que se evidencia que el cambio en el contenido de [MO] bajo el actual sistema productivo tiene una magnitud significativa (Andriulo. A. y Cordone. G., 1998). Esta falta de comunicación entre investigadores y usuarios es una restricción para implementar alternativas de manejo conservacionistas. Algo similar sucedió con el tema del cambio climático (Trossero. M. *et al.*, 2012), ver Figura 6.



Figura 6. La vegetación atenuadora de la erosión

La [MO] siendo el indicador de calidad más representativo y dentro de un enfoque sustentable, es tomada en cuenta como un producto de los sistemas agrícolas y forma parte de la rentabilidad de los mismos y del bienestar social. Sin embargo, actualmente, las pérdidas económicas debido al deterioro del suelo no son tomadas en cuenta en el sistema convencional de cálculo de resultados (Trossero. M. *et al.*, 2012), ver Figura 7.

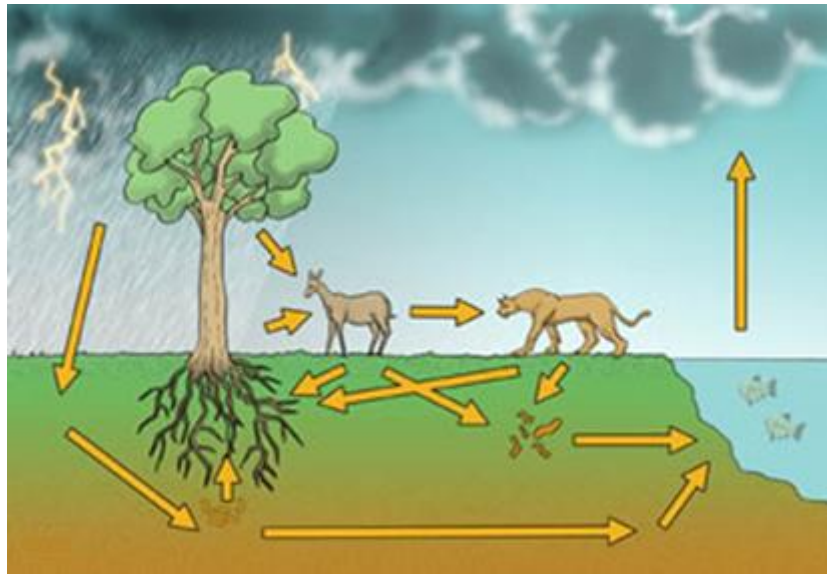


Figura 7. Ciclo de la vida a partir de la [MO]

(Sparling. G. *et al.*, 2006), encontraron que el valor económico de la [MO] en función del bienestar social, por ejemplo, midiendo los beneficios en la sociedad con producción de leche, se contabilizó la modificación de la producción de pastura. El valor económico de la disminución de leche por disminución de la pérdida de [MO], fue 42 a 73 veces menor que el valor hipotético.

Históricamente el bienestar social, el Estado lo plantea como que está vinculado con los valores fundamentales de justicia y libertad, se refiere a un reclamo expresado en los derechos sociales que consagra la Constitución, con fines de asegurar la satisfacción de las necesidades esenciales, por ende la dimensión se extiende a todas las estrategias económicas en todos los sectores, incluida la conservación del suelo. El crecimiento y la estabilidad tendrían poco significado para el desarrollo si no se reflejan en el bienestar colectivo (Zuñiga. E., 1992).



Culturalmente en las políticas deben incorporar la protección al medio ambiente y el equilibrio ecológico como una de sus vertientes principales. El bienestar social sería difícilmente concebible si no se pone un límite a los procesos que hoy actúan en contra de la salud y la calidad de vida en las ciudades y zonas agrícolas, en nuestros bosques, costas, mares, ríos y lagos, tampoco se puede aspirar a un crecimiento sostenido y equilibrado, si nuestra base de recursos está sometida a la degradación o a la falta de control de la degradación (Zuñiga. E., 1992), ver Figura 8.



Figura 8. Suelo degradado con tendencia a la desertificación por pérdida de [MO]

Económicamente y socialmente el bienestar social será el ataque frontal a la pobreza extrema. Si no se corrigieron los aspectos más lacerantes de la miseria, el aumento del nivel general de vida se refleja en mayores diferencias sociales. Aliviar los extremos de la pobreza es la labor social más urgente: una responsabilidad inaplazable, se siguen las siguientes estrategias:

- Atención de las demandas para el bienestar social
- Protección y cuidado del medio ambiente
- Erradicación de la pobreza.

### 3. EROSIÓN HÍDRICA

Como parte del análisis histórico en las metodologías para estimar la erosión hídrica, a continuación se muestra un estudio en el estado del arte, ver Tabla 2.

Tabla 2. Estado del arte para estimar erosión hídrica con SIG y SR

Año	Autor y clase	Título	Metodología
1965	Wischmeier, W and Smith, D	Predicting rainfall erosion losses	(R) USLE
1987	Jensen, J and Lulla, K	Introductory digital image processing	SIG y SR
1991	Cortés, H	Caracterización de la erosividad de la lluvia en México	Factor R para México
1997	Becerra, M	Erosión de suelos	(R) USLE, SIG y SR
2010	Cotler, A	An assessment of soil erosion cost in México	(R) USLE, SIG y SR

#### 3.1. El Suelo

El suelo es considerado un recurso natural compuesto por minerales, [MO], agua y aire. Los porcentajes en condiciones ideales aproximadamente son minerales 45%, [MO] 5%, agua 25%, aire 25% (Ortiz. B y Ortiz. C., 1990), ver Figura 9.

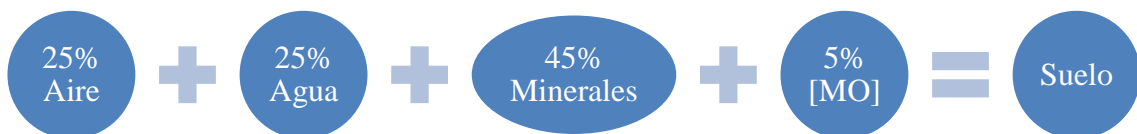


Figura 9. Componentes del suelo

### 3.1.1. Formación del suelo

En 1941 Hans Jenny (1899 – 1992) determinó que la formación del suelo está en función del siguiente modelo, donde: material parental es [mp], clima es [cl], biosfera es [o], relieve es [r], tiempo es [t], ver Ecuación 1:

$$S = f (mp, cl, o, r, t) \quad (1)$$

### 3.1.2. La degradación del suelo

El último estudio que se tiene con adecuada resolución sobre la degradación del suelo en México, es del año 2002, donde se señala que el 44.9% de superficie nacional mostraba algún grado de degradación, en donde la erosión hídrica es la que principalmente afecta al territorio nacional (SEMARNAT., 2007).

El proceso de degradación de suelos se determina por (Matlock. H y Reese. L., 1960):

- Reducción y desaparición de la cobertura vegetal
- Mayor tasa de escurrimiento y menor de infiltración de la precipitación
- Reducción y desaparición de la [MO]
- Erosión

Los problemas principales de la degradación del suelo es la erosión por la falta o remoción de la cubierta vegetal a causa de actividades como: tala forestal, modificaciones al uso de suelo, actividades agropecuarias, sobrepastoreo, entre otras (Morgan. R., 2005).

La erosión se define como la acción de provocar pérdidas de suelo en el relieve que origina una disminución del volumen y sus fases son: desprendimiento del suelo, transporte y depositación. La unidad de medida para la erosión hídrica en SI es [Mg ha<sup>-1</sup>] por el periodo [t<sup>-1</sup>], normalmente al año (Morgan. R., 2005), ver Figura 10.

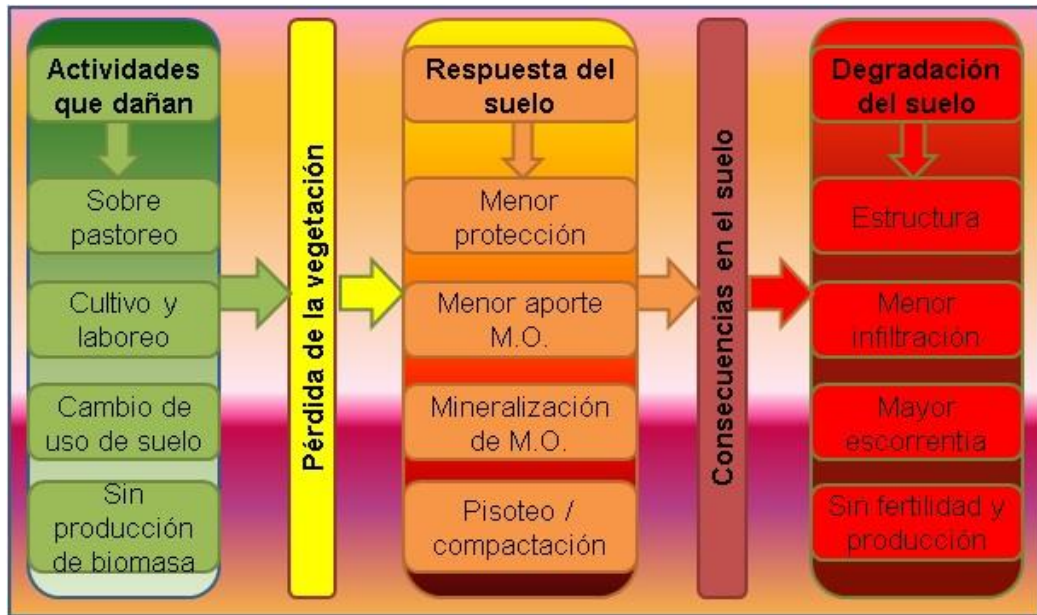


Figura 10. Mecanismos responsables de la degradación

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la intensidad de la lluvia, debido a la energía cinética que del impacto de las gotas con el suelo emana, para incrementar la pérdida en la contribución de la escorrentía formada (Morgan. R., 1996), ver Figura 11.

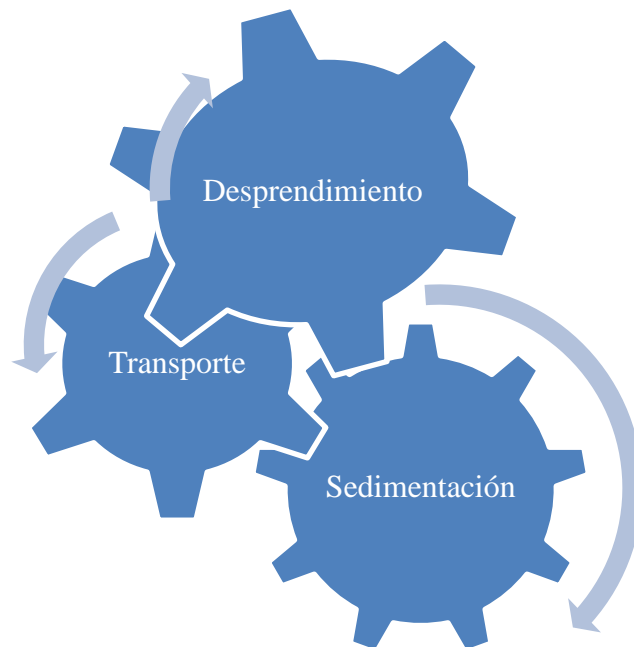


Figura 11. Ciclo de erosión hídrica

Los procesos erosivos, no son de carácter local, sino regional, de acuerdo a los principios que regulan las cuencas hidrográficas (Brooks. K *et al.*, 1991). Una cuenca es toda área limitada por un parte aguas y drenada por una corriente o por un sistema de corrientes, cuyas aguas concurren en un punto de salida (SARH., 1977).

### 3.1.3. Límites permisibles de erosión hídrica [LPE]

Se ha observado que siempre existen pérdidas de suelo, aunque estas sean mínimas para algunos ecosistemas, sobre todo en los abundantes en su vegetación, por ejemplo bosque y pastizal en buenas condiciones. Para que el sistema se mantenga productivo sin sufrir degradación, sus pérdidas deben ser menores o iguales que las tasas de erosión hídrica permisibles (Loredo. C *et al.*, 2007).

En 1977 el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés, USDA, propuso algunos LPE hídrica, los cuales consideran la pérdida del suelo que un terreno puede tolerar en función a la profundidad del suelo y al material parental, ver Tabla 3.

Tabla 3. LPE por la profundidad y el material padre (SARH., 1977)

Profundidad del suelo [cm]	Material Parental	LPE hídrica [Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ]
> 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	Arcilloso	6.7
<25	Rocoso	2.2
<25	Arena o grava	4.5
<10	Arcilloso	4.5

### 3.1.4. Factores que influyen en la erosión

Los factores que influyen en la erosión hídrica se pueden conjuntar en dos: un grupo que considera el factor energía, representado por la precipitación y el escurrimiento de la pendiente; y otro grupo donde se incluyen los factores atenuantes o de resistencia, representado por la erosionabilidad del suelo y el uso y manejo del suelo o cobertura vegetal. Estas dos últimas características son consideradas a su vez factores de protección (Loredo. C *et al.*, 2007).

### 3.2. Medición de la erosión hídrica [A] por método directo

La erosión hídrica es caracterizada a través de un modelo experimental que aplica la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, EUPS, y con ello estimar pérdidas de suelo promedio por hectárea. Las observaciones realizadas en más de 10,000 lotes de escurrimiento, aportaron datos para cuantificar la de pérdida de suelo, y se analizaron con geo estadística (Wischmeier. W y Smith. D., 1978).

Los variables de la EUPS se determinaron mediante una unidad de evaluación denominada lote estándar. Un lote estándar tiene 22.13 [m] de longitud y se encuentra ubicado en una pendiente uniforme con 9 % de inclinación. El lote se mantiene laboreado en el sentido de la pendiente y en barbecho continuo, por lo menos, para observaciones durante dos años. Este lote estándar se utiliza como base para definir la variación de las variables que forman la ecuación EUPS (Becerra. M., 1999).

Las variables determinadas en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo se conocen como factores, ver Ecuación 2, donde la pérdida de suelo, denominada erosión hídrica con denotación [A], sus unidades son [ $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ], la erosividad de la lluvia [R] está en [ $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ ], la erosionabilidad del suelo [K] está en [ $\text{Mg ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ ha mm}^{-1} \text{ h}$ ], la longitud y Grado de la Pendiente [LS] es [Adimensional], el uso y manejo del suelo [C] es [Adimensional] y las prácticas de conservación del suelo [P] es [Adimensional] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978):

$$A = R * K * LS * C * P \quad (2)$$

### 3.2.1. Medición de la erosividad de la lluvia

Relaciona la agresividad de la lluvia para producir erosión hídrica a través de su energía cinética al contacto con el suelo por un desprendimiento y transporte de este. Su energía cinética daña los agregados que facilitan la cohesión entre las partículas del suelo y se genera con ello a una ligera compactación de la superficie y con ello se disminuye la capacidad de infiltración y se obtiene un escurrimiento superficial estimado por la siguiente Ecuación 3, índice de erosividad para un evento [EI<sub>30</sub>] compuesta por la energía cinética de la lluvia [E<sub>c</sub>] en unidades [MJ ha<sup>-1</sup>] e intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia [I<sub>30</sub>] en [mm h<sup>-1</sup>] (Wischmeier. W y Smith. D., 1965):

$$R = EI_{30} = E * I_{30} \quad (3)$$

(Cortés. T., 1991), estimó [R] para la República Mexicana, se obtuvo modelos corregidos para el [EI<sub>30</sub>] con valores que van desde los 500 a los 29,000 [MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>], entre los resultando obtuvo 14 modelos de regresión lineal a partir de datos de precipitación media anual acumulada, por sus siglas en inglés, MAP, ver Figura 12.

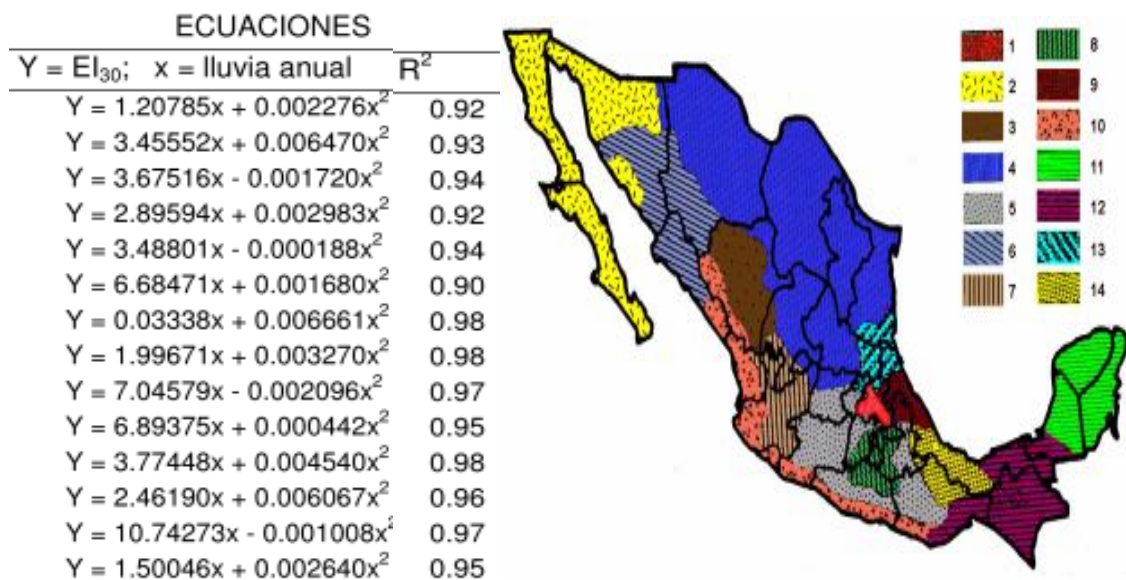


Figura 12. [R] para México por (Cortés. T., 1991)

### 3.2.2. Medición de la erosionabilidad del suelo

- Medición de la textura del suelo por método directo

Para definir el tamaño de los granos de suelo, la técnica de granulometría está definida en la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo o en la USDA, donde se relaciona el tamaño a una clase estructural para después asignarlo al nomograma [K], ver Tabla 4.

Tabla 4. Estructura del suelo (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Código	Clase de Estructura	Tamaño [mm]
1	Granular muy fina	<1
2	Granular fina	1 – 2
3	Granular media y granular gruesa	2 – 10
4	Laminar, prismática, columnas, masiva, bloques y granular muy gruesa	>10

- Medición de la [MO] por método directo

La [MO] es la propiedad química del suelo que define la estabilidad de su estructura y fertilidad; si esta propiedad está ausente o es nula se considera suelo frágil, poco favorable para el crecimiento de la cobertura vegetal lo que es favorable a la erosión hídrica. Cualquier residuo vegetal o animal es [MO], se transforma a través de los microorganismos contenidos en el suelo a la fase humus o carbono orgánico del suelo [COS] que es la fracción más estable de la [MO] (Loredo. C *et al.*, 2007).

- Medición de la permeabilidad del suelo por método directo

Permeabilidad es la propiedad física del suelo en su capacidad para permitir el paso de agua desde la superficie hacia su interior en un determinado tiempo y una altura [cm h<sup>1</sup>], la permeabilidad se reporta en un valor constante proporcional a las lluvias prolongadas debido a la saturación del suelo que propicia el escurrimiento superficial. Está en



función de la porosidad del suelo, contenido de humedad por tiempo de lluvia o riego y la propia permeabilidad del perfil del suelo (Baver. H *et al.*, 1980), ver Tabla 5.

Tabla 5. Permeabilidad suelo (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Código	Clasificación	Conductividad Hidráulica [ $\text{cm h}^{-1}$ ]
1	Muy rápida	$>12.5$
2	Moderadamente rápida	6.0 – 12.5
3	Moderada	2.0 – 6.0
4	Moderadamente lenta	0.5 – 2.0
5	Lenta	0.125 – 0.5
6	Muy lenta	$<0.125$

Con las propiedades mecánicas, químicas y físicas del suelo, es posible cuantificar su capacidad y vulnerabilidad a ser erosionado, a partir de proyectar los valores obtenidos en las pruebas realizadas al nomograma propuesto por (Wischmeier. W y Smith. D., 1978) para determinar [K]. Pueden presentarse variaciones de carácter estacional, por las variaciones de [MO] según la época del año, lo cual genera la principal variable de incertidumbre en la medición, la densidad en cobertura vegetal según la estación del año en que se esté haciendo la medición, llámese también variaciones de carácter de [C], por ejemplo, temporada de cultivo (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), ver Figura 13.

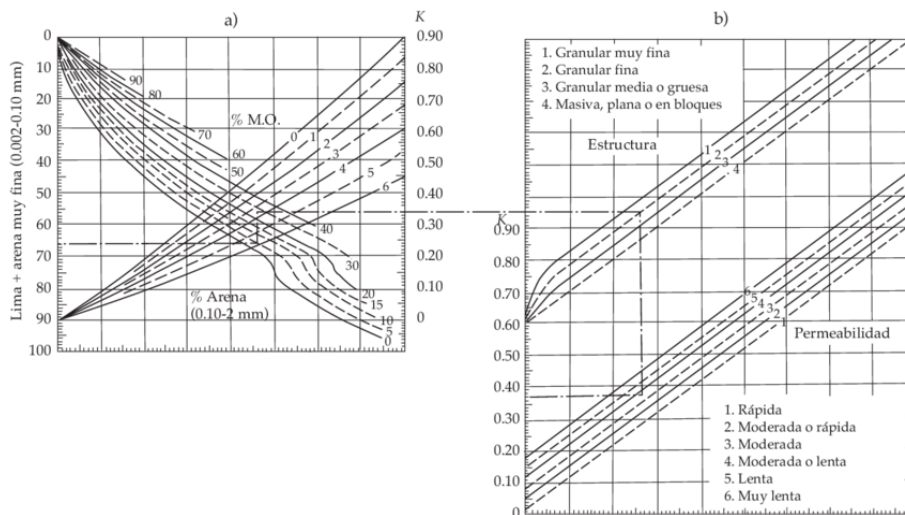


Figura 13. Nomograma para [K] por (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

### 3.2.3. Medición de la longitud de la pendiente a través de los [DEM]

La longitud de la pendiente, factor [L], se define como la relación entre la pendiente calculada en grados [ $\lambda$ ], y la pérdida del suelo ocurrida en las condiciones de lote estándar, 22.13m de longitud, a una potencia de la pendiente [pm], procesando archivos [DEM], obtenidos a través de los [SR] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), ver Ecuación 4 y Ecuación 5:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1m} \right)^{pm} \quad (4)$$

$$pm = \frac{F}{(1+F)} \quad (5)$$

Donde el índice [F], es la acumulación del flujo superficial a lo largo de la pendiente, es decir, incrementa la capacidad del fenómeno de erosión hídrica por saturación y escorrentía, y contribuye al transporte de sedimentos (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), ver Ecuación 6, donde [ $\beta$ ] es el grado de la pendiente.

$$F = \frac{(\text{sen } \beta / 0.0896)}{(3(\text{sen } \beta)^{0.8} + 0.56)} \quad (6)$$

Para estimar [L] sin uso de los [DEM], es decir, a través de una medición directa, la potencia de la pendiente [pm] se estima por medición directa según las características físicas del terreno, ver Tabla 6.

Tabla 6. Estimación de [pm] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Porcentaje de pendiente	[pm]
>5	0.5
3 - 5	0.4
1 - 3	0.3
<1	0.2

#### 3.2.4. Medición del grado de la pendiente a través de los [DEM]

El grado de la pendiente, factor [S], modifica el tiempo de permanencia de la lámina de la escorrentía que se mueve a través de la superficie por la pendiente del terreno. Para paisajes llanos, con baja o nula inclinación, se da una mayor infiltración que las de mayor inclinación. Se hace uso de los [DEM] para procesar la estimación de [S] los cuales se obtienen de los [SR] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), ver Ecuación 7:

$$S = 0.065 + 0.045s + 0.0065s^2 \quad (7)$$

En la Ecuación 8 se corrige la limitación que presenta la ecuación anterior para representar la topografía a pendientes mayores de 16% (Pongsai. S *et al.*, 2010) (Renard. K *et al.*, 1997):

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \operatorname{sen} \beta + 0.03, \text{ para } \tan \beta < 0.09 \\ S &= 16.8 \operatorname{sen} \beta - 0.5, \text{ para } \tan \beta \geq 0.09 \end{aligned} \quad (8)$$

#### 3.2.5. Medición del uso y manejo del suelo a través de imágenes GEOTIFF

Es la densidad de cobertura vegetal que se encuentra en el ecosistema, su estimación tiene relación directa a la época del año, además de las condiciones del suelo para el ecosistema en el que se encuentra la vegetación, es decir, la cantidad de [MO]. La vegetación es el factor más importante en el control de la producción de la erosión hídrica; esta puede ser del tipo natural, semi natural y plantada, con efectos de protección a la superficie, y que aporta unidad a los granos del suelo, para atenuar la cantidad de erosión hídrica en valores potenciales; y permanecer en valores aceptables según él [LPE] (Reynolds. J y Stafford. S., 2002).

Son empleados las imágenes con formato GEOTIFF, obtenidas a través de los [SR], se procesa una clasificación supervisada y puede ser apoyada por un [NDVI].

La manera en la que influye la cobertura vegetal a la reducción de la productividad del

fenómeno de erosión hídrica se describe a continuación (Loredo. O., 1994):

- Intercepción de la lluvia para la reducción de la  $[E_c]$  de las partículas de lluvia por la velocidad de impacto con el suelo e incluso provocar la falta de contacto con este
- Interferencia superficial a la transportación de las escorrentías debido se encuentra áspera, y bloquea el escurrimiento
- Define el perfil del suelo, su estructura y porosidad por causa de la  $[MO]$ , la estabilidad de los agregados y la capacidad de infiltración

### *3.2.6. Estimación de las prácticas de conservación del suelo*

$[P]$  está en función de las prácticas mecánicas y no mecánicas, vegetativas y agronómicas que se realizan; es directamente un factor atenuante a la producción del fenómeno de erosión hídrica, que sus valores van del 0 al 1, la unidad es el valor que corresponde a nulas prácticas de conservación del suelo; las prácticas de conservación del suelo se define para mantener y aumentar la productividad del suelo en función de las características particulares de la región (Torres. E., 1984).

## 4. OBJETIVO E HIPÓTESIS

### 4.1. Objetivo

Determinar el grado de erosión hídrica en los ecosistemas semiáridos a través del modelo lineal paramétrico (R) USLE corregido con la captación de sedimentos para comparar y ajustar un modelo de la zona usando las normas e instrumentos de medición estandarizados, los SIG y SR.

### 4.2. Hipótesis

La erosión hídrica en ecosistemas semiáridos reduce la cantidad de materia orgánica afectando la fertilidad y productividad del suelo que aporta para el bienestar social.

### 4.3. Objetivos específicos

- a. Cuantificar por métodos de medición directa e indirecta las variables del modelo (R) USLE
- b. Cuantificar por métodos de medición directa la captación de sedimentos en tres condiciones de uso y manejo del suelo: suelo expuesto, suelo con vegetación herbácea, y suelo con vegetación herbácea y arbórea
- c. Comparar ambos métodos y ajustar un modelo

## 5. NORMAS QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN

Las normas que influyen en la medición de la erosión hídrica, definen las pautas que proporcionan las formas y pasos para cuantificar bajo los requerimientos de los estándares nacionales e internacionales, con el solo fin de tener una única interpretación de los resultados, establecer el mensurando, el instrumento de medición, el rango del instrumento de medición y su alcance, así como el error y la incertidumbre. El instrumentar y medir *in situ* permite cuantificar de manera directa fenómenos físicos tales como la lluvia, la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, el emplear la medición directa permite llevar una trazabilidad o registro, conocer la repetibilidad del evento, la variación estadística de los datos, la dispersión estadística de los datos, la precisión y exactitud de las mediciones, analizar la tendencia o comportamiento de los datos y ajustar o corregir los procesos.

En el presente capítulo se menciona la normatividad empleada para la medición directa de la lluvia, la estructura del suelo, la materia orgánica y la permeabilidad del suelo.

### 5.1. Normatividad para medir la erosividad de la lluvia

#### 5.1.1. *Precipitación*

Precipitación está definida como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae desde las nubes o depositado desde el aire sobre la tierra. Lo anterior puede ser a través del fenómeno de lluvia, granizo, nieve, rocío, escarcha, niebla. La cantidad total de precipitación cuando alcanza la tierra en un evento es expresada en términos de profundidad vertical del agua, para lo cual debería cubrir una proyección horizontal de la superficie de la tierra (WMO., 2014).

La intensidad de la precipitación está definida como la cantidad de precipitación captada por intervalo de unidad de tiempo (WMO., 2014), ver Figura 14.



Figura 14. Posición de los captadores pluviales

### 5.1.2. Instrumentos de observación

En los instrumentos de observación para la precipitación, los dos mensurados más importantes son la cantidad de precipitación y su intensidad. El viejo método manual para medir la precipitación, se limita a realizarlo una vez por día a través de un vaso graduado, lo que actualmente es demasiado impreciso e inexacto, y la respuesta de sus datos no cumple para efectos de la ciencia o comercio. El método antiguo artesanal, desde un punto de vista, entrega un estado relacionado a la cantidad total de la precipitación durante un periodo bastante largo de tiempo, pero este no entrega algún estado relacionado a su intensidad o el tiempo de caída de la precipitación (Nilsson. O., 1962).

Una caída de precipitación suave o lenta, es de gran importancia para la vegetación donde la misma cantidad de precipitación pero en forma torrencial puede causar grandes daños. Para proyecciones de urbanización, cuando se planean por ejemplo, redes de drenaje, carreteras, puentes, puertos, aeródromos, entre otros, no solo deberá ser tomado en cuenta la cantidad de precipitación, y el lugar en cuestión, sino también la intensidad máxima de precipitación registrada (Nilsson. O., 1962).

Diferentes problemas están presentes para la definición de los instrumentos de observación de la precipitación y sus requerimientos, como por ejemplo, cuando la precipitación consiste de nieve, el adaptar un mecanismo que prevenga la captación de

nieve y compensar la cantidad que salpica, o cuando la precipitación se da en regiones con temperaturas altas, el prevenir la evaporación y compensarla en acuerdo a las condiciones del día que sucedió el evento (Nilsson. O., 1962).

La invención de los pluviómetros comprende de un "vessel" el cual tiene una apertura superior para captar la precipitación, combinado con el grabado del vaso para leer la cantidad de precipitación captada (Nilsson. O., 1962), ver Figura 15.

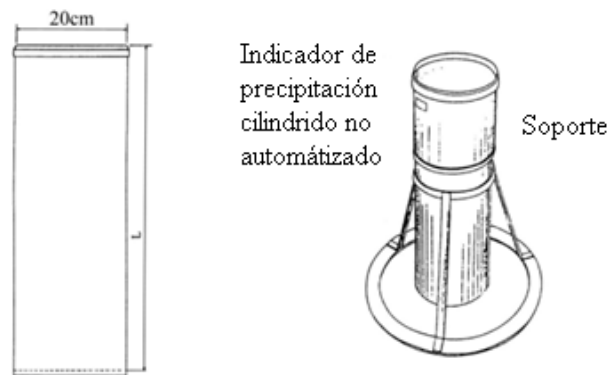


Figura 15. Primeros instrumentos de observación (WMO., 2014)

### 5.1.3. Pluviómetros

Los medidores de precipitación totalizadores son del tipo no automatizados, consisten de un receptáculo, una botella de almacenamiento, un "vessel" y un cilindro de medición graduado en cantidades de precipitación (WMO., 2014), ver Figura 16.



Figura 16. Medidor pluvial totalizador



Con lo que, el método para la observación es remover el receptáculo, sacar el "vessel" para recuperar la precipitación en el cilindro de medición graduado, y leer este donde se pueden asumir errores e incertidumbre en la medición derivados del error de paralelismo (WMO., 2014).

Los medidores de precipitación del tipo automatizados, por ejemplo, "tipping - bucket", consiste en la generación de una señal eléctrica, a través de pulsos por cada unidad de precipitación colectada, y permite la observación automática o remota con un grabador o un contador (WMO., 2014).

Este tipo de medidor de precipitación consiste en un receptor y una parte de medición, con el receptor que sirve como el contenedor del dispositivo. La parte de la medición consiste de un "punteado", es decir, un generador de pulso ensamblado al receptor (WMO., 2014), ver Figura 17.

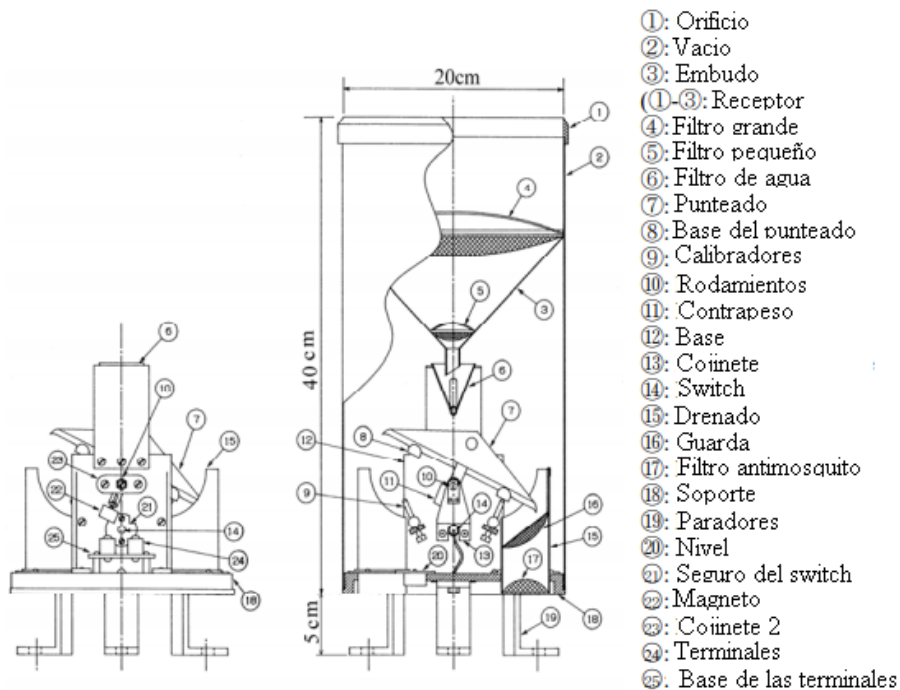


Figura 17. Medidor pluvial automático del tipo "tipping - bucket" (WMO., 2014)

Los medidores de precipitación "tipping - bucket" consiste de dos "vessel" triangulares adjuntos al lado izquierdo y derecho del eje de rotación o "punteado", cada uno con

capacidad equivalente a la cantidad de precipitación especificada pero con sistema de drenado por sí mismo. El switch es conectado para generar la señal eléctrica, los pulsos, cada “*punteado*” (WMO., 2014).

Los medidores pluviales automáticos, en síntesis, se caracterizan a los siguientes conceptos (WMO., 2016):

- Pueden ser calibrados en laboratorio
- Tienen la capacidad para medir la intensidad de la lluvia con intervalos desde pocos segundos hasta varios minutos
- Tienen resolución finita en rangos desde 0.001 mm hasta 1 mm
- Tienen buena reproducibilidad y estabilidad en periodos prolongados
- Son ampliamente usados y a precios accesibles
- Son propensos a pérdidas por humedad y evaporación, sobre todo para lluvias que no son intensas

#### 5.1.4. *Estándares internacionales y nacionales*

- WMO-8:2014. Guía para los instrumentos meteorológicos y los métodos de observación editada por la World Meteorological Organization, por sus siglas en inglés, WMO, actualizada en 2017, para el capítulo 6. medición de la precipitación. Dicho estándar, provee los principios y requerimientos para los medidores de lluvia, así como los procedimientos y sistemas de calibración (WMO., 2017) .
- BS 7843-3:2012. Adquisición y administración de datos meteorológicos de precipitación para una red de medidores. Parte 3, código de prácticas para el diseño y manufactura de los pluviómetros totalizadores y automáticos. Estándar británico para la concepción de los medidores de lluvia diaria, sus aspectos, calibración y conceptos que son basados en la CEN/TR 16469:2012. Define la desviación máxima aceptable de los valores en los modelos de indicadores de lluvia “*tipping – bucket*” (BS., 2012), ver Tabla 7:

Tabla 7. Desviación máxima aceptable (BS., 2012)

Clase	Desv. Máx. Aceptable	
A	$\pm 5\%$	Calibración dinámica en acuerdo con la CEN/TR 16469
B	$10 - 15 \text{ mm h}^{-1}$	Calibración estática solo

- UNI 11452:2012. Hidrometría, medición de la intensidad de lluvia (precipitación líquida) requisitos metrológicos y métodos de prueba para los indicadores de tipo totalizadores y automático (UNI., 2012).

Se definen los requisitos metrológicos para los indicadores que miden la intensidad de la lluvia, precipitación líquida, y establece los criterios de clasificación basados en exactitud de las mediciones. Este estándar es aplicable a los principios de medición, por ejemplo, los principios físicos en los cuales la medición es basada, y las características técnicas y tecnológicas de las especificaciones para fabricar los indicadores (UNI., 2012).

La descripción de los procedimientos de prueba y el equipo para la calibración y confirmación metrológica, ambos realizados en un laboratorio local, bajo condiciones de flujo constante, son descritas para solo pluviómetros totalizadores y automáticos. Varias clases deberán ser atribuidas al indicador según la intensidad de la lluvia, para intervalos de valores de intensidad de lluvia donde la clase es requerida, en acuerdo con lo siguiente (UNI., 2012), ver Tabla 8:

Tabla 8. Clases del indicador de lluvia (UNI., 2012)

Clase	Desv. Máx. Aceptable	Tiempo de respuesta
A	$\pm 3\%$	$< 1 \text{ min}$
B	$\pm 5\%$	$< 1 \text{ min}$
C	$\pm 5\%$	$\geq 1 \text{ min}$
	$\pm 10\%$	$< 1 \text{ min}$

Donde el error relativo,  $e_{rel}$  está definido por la siguiente Ecuación 9, donde  $I_{obs}$  es la

intensidad de la lluvia observada e  $I_{ref}$  es la intensidad de la lluvia referida (UNI., 2012):

$$e_{rel} = \frac{I_{obs} - I_{ref}}{I_{ref}} * 100 \quad (9)$$

- Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, editado en Diciembre de 2007 por la Comisión Nacional del Agua.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, titulada Conservación del Recurso Agua, se encuentran establecidas las pautas para determinar el MAP, a través de pluviómetros totalizadores y automáticos.

#### 5.1.5. Técnicas de calibración

Los métodos para calibración de los pluviómetros totalizadores y automáticos están soportados por un simulador de la variable intensidad de la lluvia de laboratorio que permite (WMO., 2017):

- Calibrar la intensidad de la lluvia generada. Promedio de múltiples realizaciones
- Evaluación de la repetitividad para la intensidad de la lluvia
- Evaluación del retraso de los instrumentos en la ejecución de comandos (arranque, paro, cambio de la intensidad de la lluvia)

Tabla 9. Calibración para pluviómetros (WMO., 2017)

Rango operacional:	20 – 450 [ml min <sup>-1</sup> ]	
Estimación del valor verdadero	Máx. $e_{prom} = 1\%$	Evaluado a 60 [ml min <sup>-1</sup> ]
Estimación de la precisión	Máx. CV = 0.4%	Evaluado a 20 [ml min <sup>-1</sup> ]
Tiempo de resolución	$\Delta t_{min} = 15$ s	< 200 [ms]

### 5.1.6. Fuentes de error

Errores en la medición de la precipitación son causados por influencias del medio ambiente, el instrumento, y errores debido a la humedad y evaporación (WMO., 2014).

- Errores del instrumento

El indicador de precipitación tipo “*tipping – bucket*” tiene una exactitud de 0.5 [mm] en 20 [mm h<sup>-1</sup>], pero podría haber errores en la medición de hasta superiores al 3% en precipitaciones tipo “tormenta” (WMO., 2014).

- Errores por humedad

Si la pared interna del receptáculo y la superficie del embudo no repele lo suficiente, el agua de lluvia se adhiere a estos no llegando el agua al “*vessel*” o al “*punteado*” y causa errores en la medición. Si el agua de lluvia residual en el bote de almacenamiento o en el “*vessel*”, de lluvias anteriores no es eliminada, causa errores en la medición. Si el agua de lluvia es medida repetidamente con el cilindro de medición, el aguas de lluvia residuales entre cada medición causa errores en la medición. Suciedad, polvo y otros contaminantes adheridos dentro del “*vessel*” causa errores en la medición (WMO., 2014).

- Errores por evaporación

Aguas de la lluvia remanentes en el bote de almacenamiento sin ser procesadas para la medición, se comienzan a evaporar y causan errores en la medición (WMO., 2014).

- Errores por la falta mamparas para interceptar el viento

La lluvia que cae al receptáculo del medidor de precipitación puede ser afectada y reducida por los vientos, por lo que la falta de mamparas para interceptar el viento, es

una falta de apoyo al medidor de precipitación y puede ser causante de errores significativos (WMO., 2014).

- Errores por precipitaciones tipo tormenta

El instrumento de medición de precipitación tipo “*tipping – bucket*”, el agua de lluvia entra a través del embudo y cae al “*punteado*” para ser medida, el agua que es drenada sin pasar por este proceso causa errores en la medición, estos errores incrementan con las lluvias del tipo tormenta, y la cantidad medida llega a ser menor a la cantidad real (WMO., 2014).

Agua equivalente a una precipitación de 50 [mm] fue escurrida desde un vessel simulador para una lluvia estándar con diferente intensidad de la precipitación, y el número de “*punteado*” resultante fue encontrado que decrece casi lineal con el incremento de la intensidad de la precipitación. El error excedido al nivel permisible fue del 3% cuando la intensidad de la lluvia fue mayor que 150 [mm h<sup>-1</sup>], por lo tanto la cantidad de precipitación medida fue menor a la cantidad real (WMO., 2014).

#### 5.1.7. Modelo de incertidumbre

La medición correcta del líquido proveniente del fenómeno de precipitación, y otras variables hidrológicas y meteorológicas, además de la correcta interpretación del histórico de los datos, es la principal variable para caracterizar el cambio de clima. Los medidores de lluvia, proveen la medición directa de la intensidad de la lluvia, a lo que con las nuevas técnicas desarrolladas para las múltiples observaciones de la caída de lluvia basada en SR (radares de clima, radiómetros aerotransportados y satélites), proveen una descripción espacio – temporal para el análisis de la lluvia (WMO., 2016).

Mejoras en la confiabilidad de las mediciones para la intensidad de la lluvia han sido realizadas por ejemplo el indicador de lluvia tipo “*tipping bucket*”, y otros tipos como por ejemplo ópticos, por peso, flotantes, goteo, entre otros. Los estándares de alta

calidad en la medición de la lluvia, son requeridos para proveer una base en el intercambio y la evaluación de los datos para la caída de lluvia reportados entre los países, sobre todo para abordar los temas críticos como cambio climático y sus inundaciones o sequías, la administración de los ríos, y el control para la calidad del agua (WMO., 2016).

La medición de la lluvia está sujeta a un gran número de variables de incertidumbre y los errores instrumentales. El laboratorio de la WMO está enfocada en los errores de la mecánica y electrónica de los dispositivos para la estimación de la incertidumbre de medida proporcionada por estos. Entre otros errores por ejemplo el viento, que tiene un influencia a la caída de la lluvia en el orden de 20 – 50 [mm h<sup>-1</sup>] con una incidencia alrededor del 5% observado (WMO., 2016).

En las mediciones de la precipitación, los errores sistemáticos comúnmente tomados en cuenta para la corrección del modelo están expresados generalmente de la siguiente manera (WMO., 2016), ver Ecuación 10.



$$P_c = v(P_g + \sum_i P_{gi}) \quad (10)$$

Donde  $P_c$  es la precipitación corregida,  $P_g$  es la precipitación observada, y  $v$  es el coeficiente de deformación por el viento. El modelo, originalmente propuesto por Sevruk, 1982 y más tarde modificado por Legates y Willmott, 1990, toma en cuenta ambas condiciones de precipitación, líquida y sólida (nieve), por lo tanto, la precipitación corregida se expresa de la siguiente manera (WMO., 2016), ver Ecuación 11:

$$P_c = v_{\gamma}(P_{g\gamma} + \Delta P_{w\gamma} + \Delta P_{e\gamma} + \Delta P_{m\gamma}) + v_{\delta}(P_{g\delta} + \Delta P_{w\delta} + \Delta P_{e\delta} + \Delta P_{m\delta}) \quad (11)$$

Donde  $P_w$ ,  $P_e$  y  $P_m$  son los términos de corrección del error para la humedad, evaporación y mecánicos respectivamente, y los índices  $\gamma$  y  $\delta$  son la precipitación líquida y la precipitación sólida (nieve) respectivamente (WMO., 2016).

5.1.8. Características de los pluviómetros empleados para la experimentación

	
<p style="text-align: center;">Totalizador</p> <p style="text-align: center;">Cantidad: 7 pluviómetros</p> <p style="text-align: center;">Resolución: 2 [mm]</p> <p style="text-align: center;">Alcance: 0 – 2500 [mm]</p>	<p style="text-align: center;"><i>“Tipping – bucket”</i></p> <p style="text-align: center;">Cantidad: 3 pluviómetros</p> <p style="text-align: center;">Resolución: 1 [mm]</p> <p style="text-align: center;">Alcance: Finito</p>

5.2. Normatividad para medir la erosionabilidad del suelo

5.2.1. Instrumentos de observación

*Estructura del suelo.* El tamaño de los granos de un suelo refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos mientras que las más finas por ser tan pequeñas pueden ser observadas con un microscopio, de igual forma constituye uno de los fundamentos teóricos en los que se basan los diferentes sistemas de clasificación del suelo, como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS. A través de la granulometría, se permite determinar los tamaños de las partículas del suelo, este se hace pasar por una serie de mallas con diferentes tamaños, y en las partículas más finas se realiza una prueba con hidrómetro fundamentado en la ley de stocks (SCT., 2003), ver Figura 18.





Figura 18. Determinación de la estructura del suelo

*Permeabilidad.* Para las validaciones de estabilidad de la pendiente y formación de escorrentía, el manejo y uso del suelo, y los problemas de transporte de contaminantes, usualmente se requieren de numerosas pruebas de permeabilidad. Para ello se cuenta con un método de validación en campo rápido y efectivo, el cual es conocido como “*anillo permeámetro*”, y es un método que entrega mediciones las cuales pueden ser garantizadas para ser reportadas (Chappell. N. y Ternan. J., 1997).

Un material permeable es aquel que permite la circulación de un fluido a través de sí, usualmente en suelos, el fluido de interés es el agua y aunque la permeabilidad es inherente a las propiedades físicas del suelo como el tamaño de grano, distribución granulométrica, relación de los huecos, la temperatura a la que ocurre el proceso, influye de una u otra forma en la variación de la permeabilidad (Juárez. B. y Rico. R., 2008).

El coeficiente de permeabilidad  $[k]$  de un suelo es la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. Este valor refleja propiedades físicas del suelo y en cierta medida indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, y está sujeta a un gradiente hidráulico dado (Chappell. N. y Ternan. J., 1997). El “*anillo permeámetro*” de carga constante y de carga variable hacen uso de la ley de Darcy, quien descubrió que para velocidades

suficientemente pequeñas, la velocidad es directamente proporcional al gradiente hidráulico (Juárez. B. y Rico. R., 2008).

“Anillo permeámetro” de carga constante. Este dispositivo, como su nombre lo indica, se asegura que la diferencia de cargas sea constante  $[\Delta h]$  en todo el tiempo de la prueba, para garantizar esto es necesario que el dispositivo este alineado en todo momento, y que el nivel de entrada y salida de agua se mantenga siempre constante (Juárez. B. y Rico. R., 2008), ver Figura 19.

## Permeámetro Aro $\varnothing 500 \times 254$ [mm]



Figura 19. “Anillo permeámetro” de carga constante

*Materia Orgánica.* Se conoce [MO] un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y vegetal que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Rosell, 1999). Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos, conocida como [COS] (Aguilera. S., 2000). El [COS] es el principal elemento que forma parte de la [MO], por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente uno de otro (Alemán. I. y Guido. F., 2015). Al respecto, cabe señalar que los métodos analíticos determinan el [COS], estos son: Calcinación Húmeda o Calcinación Seca.

El método de pérdida de peso por ignición [LOI] o calcinación, como se le llame, se basa en la ignición de una porción del suelo seco y molido en un horno de MUFLA con alcance hasta 2000 [°C]. Se determina una rampa de temperatura para la operación a tal forma que se produzca la pérdida de [MO] en forma gaseosa, principalmente como CO<sub>2</sub> y vapor de agua.

La rampa de temperatura para el proceso está determinada en tres etapas de la siguiente manera: El aumento de la temperatura hasta 550 [°C] para permanecer durante 4 [h], la disminución de la temperatura en una primera etapa hasta 150 [°C] para permanecer durante 90 [min], y finalizar con otra etapa de disminución de la temperatura hasta 50 [°C] para permanecer durante 30 [min], finalmente se obtiene la pérdida de [MO] por diferencia de masas (Andrades. M. *et al.*, 2015), ver Figura 20.

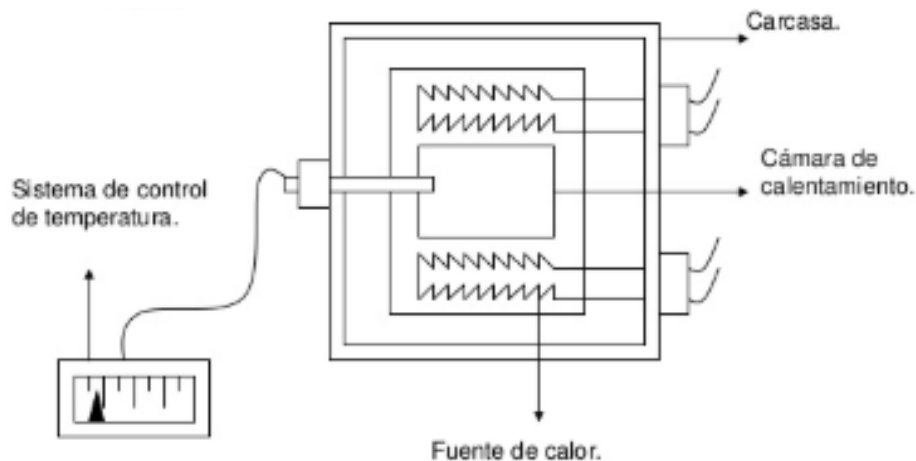


Figura 20. Esquema de una MUFLA (Andrades. M. *et al.*, 2015)

### 5.2.2. Cribas

Mallas fabricadas con alambre de bronce o acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de  $206 \pm 2$  [mm] de diámetro interior y  $68 \pm 2$  [mm] de altura, sujeta la malla de forma rígida y firme mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 [mm] del borde superior del bastidor (SCT., 2003), ver Tabla 10.

Tabla 10. Juego de mallas (SCT., 2003)

Fracción	Malla		Variación permisible de la abertura promedio con respecto a la denominación de la malla [mm]	Abertura máxima permisible para no más del 5% de las aberturas de la malla [mm]	Abertura máxima individual permisible [mm]	Diámetro nominal del alambre <sup>[1]</sup> [mm]
	Designación [Inch]	Abertura nominal [mm]				
Grava	3"	75,0	±2,2	78,1	78,7	5,80
	2"	50,0	±1,5	52,1	52,6	5,05
	1 ½"	37,5	±1,1	39,1	39,5	4,59
	1"	25,0	±0,8	26,1	26,4	3,80
	¾"	19,0	±0,6	19,9	20,1	3,30
	½"	12,5	±0,39	13,1	13,3	2,67
	3/8"	9,5	±0,30	9,97	10,2	2,27
	¼"	6,3	±0,20	6,64	6,78	1,82
	#4	4,75	±0,15	5,02	5,14	1,54
Arena con finos	#10	2,0	±0,070	2,14	2,22	0,90
	#20	0,850	±0,035	0,93	0,97	0,51
	#40	0,425	±0,019	0,47	0,50	0,29
	#60	0,250	±0,012	0,28	0,31	0,18
	#100	0,150	±0,008	0,17	0,19	0,11
	#200	0,075	±0,005	0,09	0,10	0,05

<sup>[1]</sup>El diámetro promedio de los alambres que forman cualquier malla, considerados separadamente en cada una de sus dos direcciones, no variara de los valores nominales en más de lo siguiente: 5% para mallas con aberturas mayores de 0,6 [mm], 7,5% para mallas con aberturas de 0,6 a 0,125 [mm], 10% para mallas con aberturas menores de 0,125 [mm], ver Figura 21.



Figura 21. Juego de cribas

El hidrómetro basado en el principio de sedimentación de los granos de suelo en el agua que relaciona a la ley de Stokes en acuerdo con la siguiente Ecuación 12, (UMASS LOWELL., 2015):

$$V = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (12)$$

Donde los términos  $V$  es la velocidad,  $\rho_s$  es la densidad de las partículas del suelo,  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $\eta$  es la viscosidad del agua y  $D$  es del diámetro de las partículas del suelo (UMASS LOWELL., 2015), ver Figura 22.

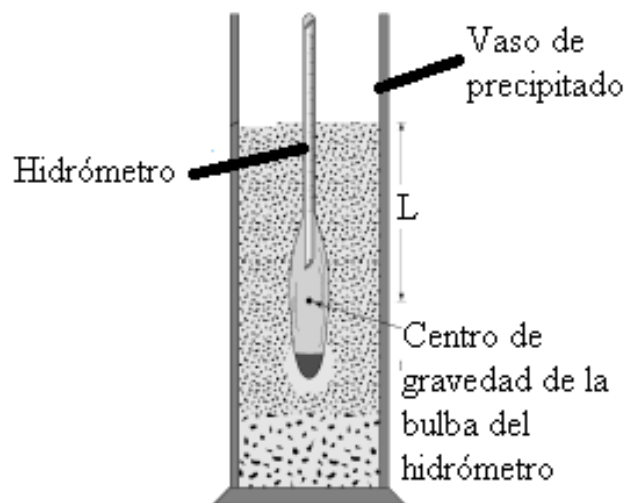


Figura 22. Hidrómetro (UMASS LOWELL., 2015)

### 5.2.3. “Anillo permeámetro”

El método comúnmente empleado es el determinado por la ASTM D5084. Para esta prueba, el fluido es el agua, y la conductividad hidráulica [ $Kh$ ] que es la habilidad o tasa del agua para fluir [ $q$ ] a través de los espacios huecos en el suelo [ $iA$ ], también conocido como permeabilidad del suelo, es calculada con la teoría en la ley de Darcy, ver Ecuación 13, (DEP, 2013):

$$Kh = q/(iA) \quad . \quad (13)$$

La [ $Kh$ ] depende primeramente del tamaño y la forma de los granos del suelo, la relación de [ $iA$ ] y el grado de [ $q$ ] o conocido como saturación. La prueba por medio de la ASTM D5084 puede usar uno o dos sistemas hidráulicos comunes y aplican la ley de Darcy para medir la conductividad hidráulica y son el conocido como flujo constante o flujo variable. La prueba de flujo constante es el mayormente usado para los granos de suelo gruesos, tales como arenas limpias y gravas. En este tipo de prueba, es colocado un molde en forma de cilindro y una toma continua de agua para alimentar a través del molde (DEP, 2013), ver Figura 23.

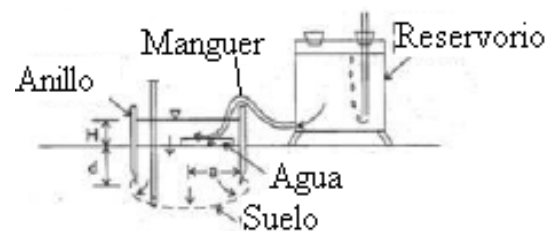


Figura 23. “Anillo permeámetro” (DEP, 2013)

El agua es introducida en la parte más alta del cilindro y pasa a través de la muestra de suelo por su sección de área [ $a$ ], en un tiempo [ $t$ ], a una tasa de flujo [ $q$ ]. Se tiene la siguiente Ecuación 14, (DEP, 2013).

$$Kh = q/(Ia) \text{ o } (Ql)/(aHt) \quad . \quad (14)$$

Donde los términos [Kh] es la conductividad hidráulica del suelo en [cm h<sup>-1</sup>], [q] es la tasa de descarga en [cm<sup>3</sup>] a través del suelo en un área [a] en [cm<sup>2</sup>], [I] es el gradiente hidráulico y [a] es el área perpendicular a la dirección de [q]. Donde [Q] es el caudal en [cm<sup>3</sup>], [l] es la longitud del “anillo permeámetro” [cm], [H] es el promedio de la pérdida de flujo en [cm], t es el intervalo del tiempo [s], ver Ecuaciones 15 y 16, (DEP, 2013).

$$q = Q/t \quad . \quad (15)$$

$$I = H/l \quad . \quad (16)$$

La prueba de flujo variable es generalmente usada para suelos menos permeables, tales como arenas finas a arcillas densas. Esta prueba es similar a la prueba de flujo constante por que mide la cantidad de agua que pasa a través de una muestra de suelo. La diferencia es que no se mantiene constante la alimentación de agua (DEP, 2013), ver Figura 24.

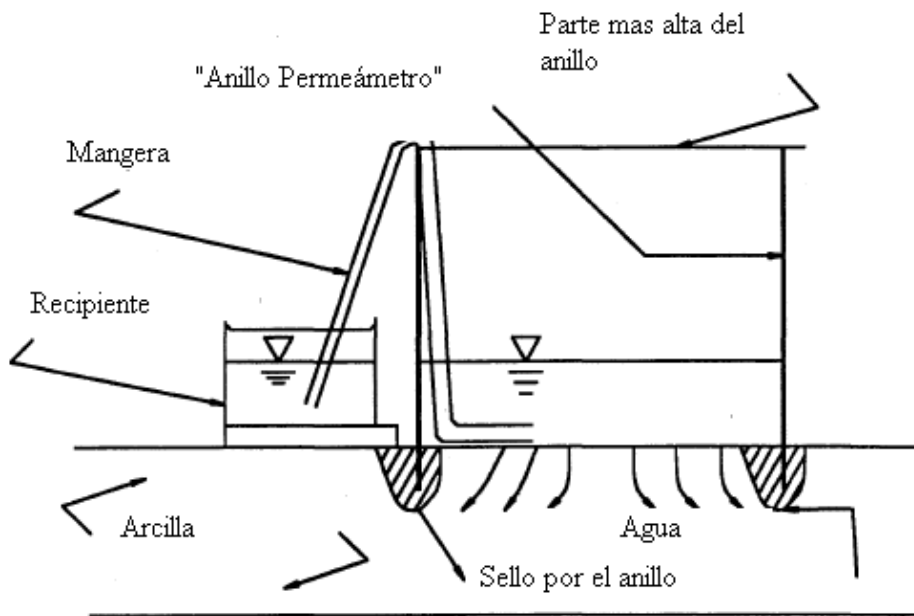


Figura 24. Esquema de un “anillo permeámetro” (DEP, 2013)

#### 5.2.4. MUFLA

El método de pérdida de masa por calcinación es aplicable a muestras de todo tipo de suelos, sin embargo puede existir cierto margen de error debido a la pérdida de agua en arcillas, pérdida de dióxido de carbono, descomposición de sales hidratadas y óxidos (Azcárate. P. *et al.*, 2017). Este error puede ser más acentuado en muestras de suelo con bajos contenidos de [MO] (<1.5%) por lo que resulta un método no apto para este tipo de suelos (Azcárate. P. *et al.*, 2017).

El método de pérdida por ignición para la determinación de [MO] es más aplicable a aquellos materiales identificados como turbas, lodos orgánicos y suelos que contengan materia vegetal relativamente no descompuesta ni deteriorada o materiales de plantas frescas como madera, raíces, pasto o materiales carbonáceos como lignito, carbón, entre otros (AASHTO., 2008), ver Figura 25.



Figura 25. MUFLA

#### 5.2.5. Estándares internacionales y nacionales

- ASTM D2487-11. Unified Soil Classification System [USCS]. Practice for classification of soils for engineering purposes. United States of America.



- ASTM D2788-00. Standard practice for description and identification of soils (Visual – manual procedure). United States of America.
- ASTM D3282-09. American Association of state highway and transportation officials, A.ASHTO.
- ASTM D422-63:2007. Standard test method for particle-size analysis of soils.
- ASTM E11-09e1. Commonly used standard sieve sizes.
- ASTM D152-H. Hydrometer.
- SCT-M-MMP-1-06/03:2003. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Suelos y materiales para terracería. Granulometría de materiales compactables para terracerías. México, D.F.
- ASTM D2434-68:2006. Standard test method for permeability of granular soils (Constant Head). United States of America.
- ASTM D5084. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.
- ASTM D5856. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid – wall, compaction mold permeameter.
- ASTM D2974 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils.
- IRAM – SAGyP 29571-1:2008 Parte I. Método de pérdida de masa por calcinación.

- IRAM – SAGyP 29571-2:2011 Parte II. Determinación de COS oxidable por mezcla oxidante fuerte escala semi – micro.
- IRAM – SAGyP 29571 – 3:2016 Parte III. Determinación de COS oxidable por mezcla oxidante fuerte. Micro escala.
- AASHTO T 267 – 86 (2004) Determination of organic content in soils by loss on ignition.

#### 5.2.6. Fuentes de error

Los errores pueden surgir en tres formas: el dispositivo, los de medición, y el análisis de los datos (U.S. Government., 1996).

- Errores de dispositivo

Este método asume que el espesor completo de la zona de interés, está abierto a la ventana donde el flujo es radial. Si este no es el caso, la conductividad hidráulica computada podría ser demasiado alta. Si el dispositivo no está propiamente desarrollado, la conductividad computada será demasiado baja (U.S. Government., 1996).

- Errores de medición

Se Determina o graban el nivel de fluido en el “*anillo permeámetro*” y el tiempo de medición incorrectamente. Los niveles de agua deberían ser medidos a una exactitud de al menos 1% del nivel inicial del agua. Para materiales moderadamente permeables, el tiempo deberá ser medido con una exactitud de fracciones de minuto y para los demás materiales permeables, el tiempo deberá ser medido en términos de segundos o fracciones de segundo. Las fracciones de segundo podrían requerir el uso de una rápida respuesta del transductor de presión y el sistema de grabado (U.S. Government., 1996).

- Errores de análisis de datos:

El tipo de curva requiere coincidir con los datos de una familia de curvas, descritas por el parámetro, el cual es una medición del registro del “*anillo permeámetro*”. Papadopoulos *et al* (1973), muestran que el error de dos órdenes de magnitud en la selección de la curva debería resultar en un error de al menos 30% y en el valor de la transmisividad determinada. Se asume el no error de al menos 30% en la conductividad hidráulica (U.S. Government., 1996).

### 5.2.7. Modelos de incertidumbre

El análisis de la incertidumbre para la medición de la estructura del suelo por medio de la ASTM C 136-05: Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos se define en acuerdo con su proceso de medición como se describe con la siguiente Ecuación 17, (Alamilla. H. *et al.*, 2005):

$$\%Pasa = \left(1 - \frac{M_{ret}}{M_{total}}\right) * 100 \quad (17)$$

Donde los términos  $M_{ret}$  es la masa retenida en la malla y  $M_{total}$  es la masa total de la muestra, se establece una definición de variables aleatorias (Alamilla. H. *et al.*, 2005), ver Figura 26.

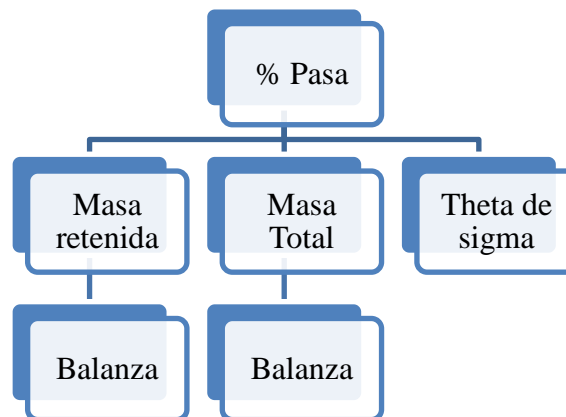


Figura 26. Incertidumbre de la estructura del suelo

Se debe tomar en cuenta que el análisis de incertidumbre para este método de medición de la estructura del suelo, depende del resultado de cada cálculo, es decir, el porcentaje de lo que pasa y del tamaño del material, grueso o fino, por tanto, se debe realizar un cálculo por cada malla. Se establece la relación matemática que describe la función del proceso de medición, como lo expresa la Ecuaciones 18 y 19, (Alamilla. H. *et al.*, 2005):

$$\%Pasa = f(M_{ret}, M_{total}, \theta_{\sigma}) \quad (18)$$

$$\%Pasa = \left(1 - \frac{M_{ret}}{M_{total}}\right) * 100 + \theta_{\sigma} \quad (19)$$

Por lo que la expresión para la estimación de la incertidumbre queda de la siguiente manera, Ecuación 20, (Alamilla. H. *et al.*, 2005):

$$u_{\%pasa} = \sqrt{\left(\frac{\partial \%pasa}{\partial M_{ret}} uM_{ret}\right)^2 + \left(\frac{\partial \%pasa}{\partial M_{tot}} uM_{tot}\right)^2 + \left(\frac{\partial \%pasa}{\partial \theta_{\sigma}} u\theta_{\sigma}\right)^2} \quad (20)$$

El análisis de la incertidumbre para la medición de la permeabilidad del suelo y sedimentos no consolidados típicamente varían desde diferentes niveles de magnitud incluso en áreas con la misma formación geológica. Numerosos puntos de medición de la permeabilidad son por lo tanto requeridos para derivar la exactitud del área estimada. Los puntos de medición a estimar son por sí mismos sujetos de incertidumbre en la medición debida, por ejemplo, la técnica de medición sobre el suelo, las rocas bajo la prueba (Chappell. N. y Ternan. J., 1997).

La incertidumbre debida a su variación espacial, es quizá el factor aleatorio más importante que debería tomarse en cuenta en los análisis de flujo de agua en suelos. Se pueden considerar en específico tres casos de incertidumbre en la medición, la de condiciones de frontera, el método de cálculo y la conductividad hidráulica del suelo (López. N., 2010).

- Incertidumbre por condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en los análisis de flujo de agua corresponden generalmente a los valores de la carga hidráulica en las fronteras permeables del dominio de flujo. Si se considera que existen ciertas situaciones, en las cuales se pueden tener dudas en cuanto a estos valores, por ejemplo, que no se conozca con precisión los niveles del agua, aguas arriba y aguas abajo en el caso de estudio, el error aleatorio sobre las condiciones de frontera pueden representarse mediante el sistema según la Ecuación 21, (López. N., 2010):

$$\{h_j\} = \varnothing\{h_{0j}\} \quad (21)$$

- Incertidumbre asociada al método de cálculo

La realidad es siempre tan compleja, que todo método de cálculo, analítico o numérico, implica cierto número de hipótesis simplificadoras que suelen introducir un error significativo en la apreciación de la realidad. Así, si  $w_i$  para toda  $i = 1, 2, \dots, n$  son los valores medios espaciales de las características del suelo, por ejemplo, las conductividades hidráulicas o sus logaritmos decimales o naturales en diversos puntos, y se supone que el modelo matemático que permite obtener el parámetro de interés, la carga hidráulica o cualquier otro resultado de un análisis de flujo de agua, es una función de las variables  $w_i$  en acuerdo con la Ecuación 22, (López. N., 2010):

$$Y = g(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (22)$$

La incertidumbre sobre el método de cálculo puede tomarse en cuenta a través de un término aleatorio de error de tipo multiplicativo como lo muestra la Ecuación 23, (López. N., 2010):

$$Y = g(w_1, w_2, \dots, w_n) * \mathcal{E} \quad (23)$$

El análisis de la incertidumbre para la medición de la materia orgánica del suelo es debido a la variabilidad propia del proceso de medida, errores aleatorios Se evalúa

mediante el análisis de réplicas de un material de referencia estable o de adiciones conocidas sobre una muestra y se rige por la siguiente Ecuación 24, (Prieto. J. *et al.*, 2014).

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n q_k - \bar{q}^2} \quad (24)$$

Donde los términos  $q_k$  son los valores individuales,  $\bar{q}$  es la media.

#### 5.2.8. Características de instrumentos de medición empleados en experimentación

		
<p style="text-align: center;"><b>Criba / Tamiz</b> Alcance: 0,038 – 10 [mm]</p>	<p style="text-align: center;"><b>Anillo para infiltración</b> Resolución: 1 [mm] Alcance: 0 – 125 [mm]</p>	<p style="text-align: center;"><b>MUFLA</b> Resolución: 1 [°C] Alcance: 1100 [°C]</p>

## 6. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente capítulo aborda la localización y caracterización del área de estudio seleccionada para el monitoreo de la erosión hídrica. Se mencionan aspectos como el régimen de lluvia típica de la zona, la clasificación del suelo típica de la zona, su altimetría y topografía así como la cubierta vegetal clásica de la región.

El área que se estudió para el monitoreo de la erosión hídrica está localizada en las coordenadas  $21^{\circ}13'19.9''\text{N}$   $100^{\circ}47'58.2''\text{W}$ ; esta comprende una extensión territorial de aproximadamente 30 [ha], ver Figura 27, en acuerdo con la clasificación de Köppen – Geiger le corresponde un clima BS1kw: Desértico frío, ver Anexo 3.d, está dentro de la zona conocida como Altiplano Mexicano que tiene por característica pertenecer a un ecosistema de tipo semiárido.

Esta área de estudio tiene por nombre “*Predio el Cortijo*”, la hidrología que le rige es la de la región Lerma – Santiago, que se alimenta del acuífero de la Cuenca Río Laja con una extensión territorial de 982.92 [ha] y pertenece al municipio de Dolores Hidalgo, en el estado de Guanajuato, ver Anexo 3.a, 3.b, 3.c.

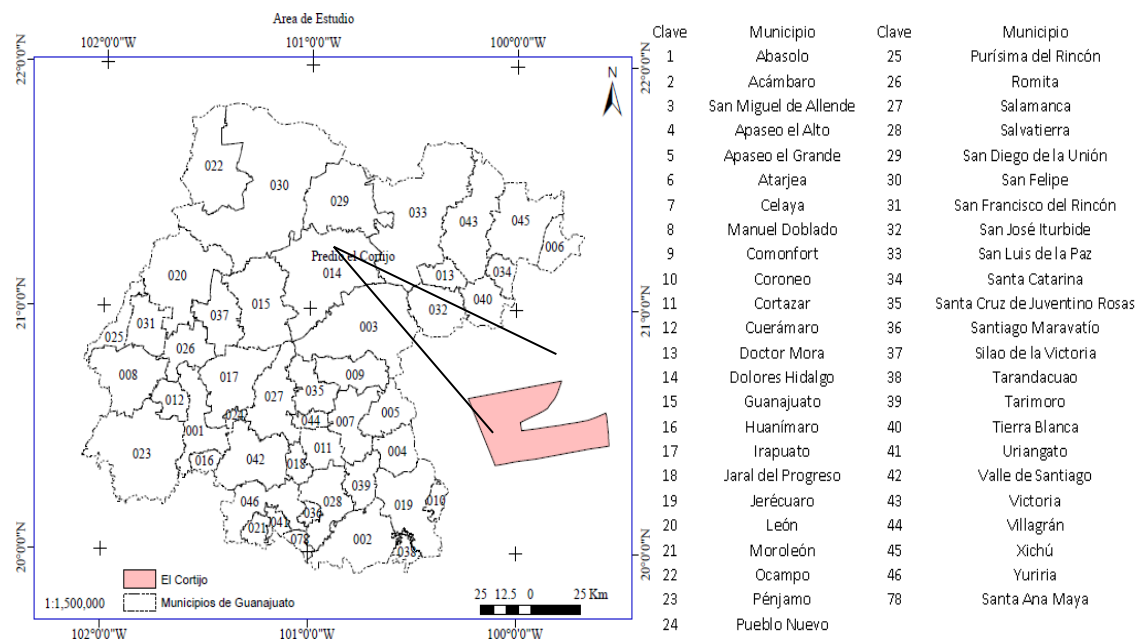


Figura 27. Ubicación Área de Estudio

El 43% de la superficie está representado por un clima seco y semiseco al norte de la región, el 33% de la superficie por un clima cálido subhúmedo al sureste de la región y el 24% de la superficie por un clima templado subhúmedo al este de la región (INEGI, 2011).

La temperatura media anual es de 18 [°C]. La temperatura promedio más alta es alrededor de 30 [°C], se presenta en los meses de mayo y junio y la más baja, alrededor de 5.2 [°C], en el mes de enero (INEGI, 2011).

Las lluvias se presentan en verano, principalmente en los meses de junio a septiembre, la precipitación media anual del estado es de aproximadamente 650 [mm] anuales (INEGI, 2011). Los tipos de suelo típicos de la región son ver Tabla 11, (CONABIO, 2001):

Tabla 11. Suelo típico del estado de Guanajuato.

SUELO	DESCRIPCIÓN	TEXTURA	FASE FÍSICA
Ah	ACRISOL HUMICO	MEDIA	LITICA
Ap	ACRISOL PLINTICO	FINA	LITICA
Be	CAMBISOL EUTRICO	MEDIA	LITICA
E	RENDZINA	MEDIA	LITICA
Hh	FEOZEM HAPLICO	MEDIA	LITICA
Hi	FEOZEM LUMICO	MEDIA	DURICA
I	LITOSOL	MEDIA	ND
IC		ND	PETROCALCICA
Je	FLUMSOL EUTRICO	GRUESA	ND
Kk	CASTAÑOZEM CALCICO	MEDIA	LITICA
Kl	CASTAÑOZEM LUMICO	MEDIA	ND
Lc	LUMSOL CROMICO	MEDIA	ND
Lo	LUMSOL ORTICO	FINA	ND
Re	REGOSOL EUTRICO	MEDIA	PETROCALCICA
To	ANDOSOL OCRICO	GRUESA	LITICA PROFUNDA
Vc	VERTISOL CROMICO	FINA	PEDREGOSA
Vp	VERTISOL PELICO	FINA	LITICA
We	PLANOSOL EUTRICO	MEDIA	DURICA
Wm	PLANOSOL MOLICO	FINA	DURICA
Xh	XEROSOL HAPLICO	MEDIA	PEDREGOSA
Zg	OLONCHAK GLEYICO	FINA	ND

Gracias al tipo de suelo y clima, Guanajuato es un estado que se caracteriza por su producción agrícola de cultivos tales como maíz, frijol, cebada, trigo, linaza, garbanzo, además de durazno, manzana, ajo, alfalfa, avena, cebada, centeno, tomate, remolacha, sorgo y chabacano entre otros.



## 7. RESULTADOS

En el presente capítulo se abordan los resultados de la investigación, para estimar la erosión hídrica en el área de estudio conocida como “*Predio el Cortijo*” se siguieron los pasos de la metodología resumida en el siguiente esquema, ver Figura 28:

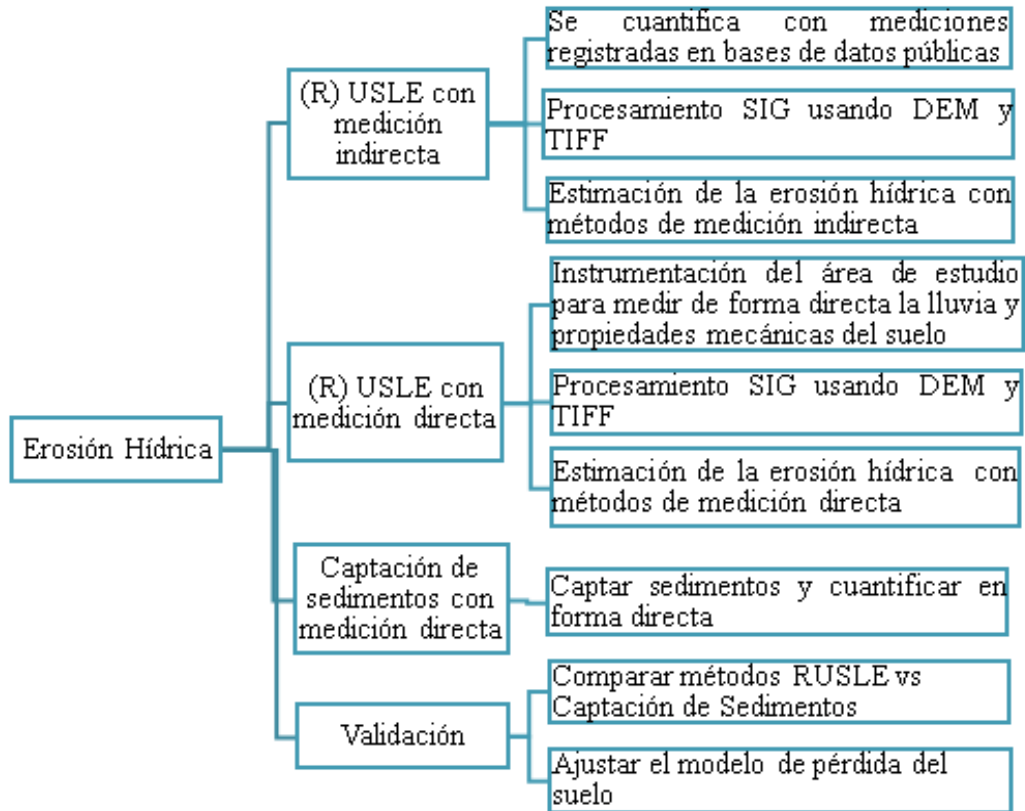


Figura 28. Metodología para estimar erosión hídrica en “*Predio el Cortijo*”

### 7.1. Resultados de (R) USLE medición indirecta

Se obtuvieron los valores de las diferentes variables del modelo lineal paramétrico (R) USLE en forma indirecta, de tal manera que se estimó un resultado de erosión hídrica, se tuvo que consultar bases de datos públicas y obtener valores de medición directa registrada por varios años, a través de estaciones meteorológicas para el caso de la lluvia por ejemplo, o calculado las propiedades mecánicas, físicas y químicas del suelo para el caso de [K], o a través de imágenes satelitales para el caso de [LS] y [C]. De esta manera

con mediciones indirectas se obtiene un modelo de erosión hídrica estimado al cual denominaremos “modelo pronosticado” por medición indirecta.

### 7.1.1. *[R] estimada por medición indirecta*

Por el interés del monitoreo de diferentes parámetros ambientales, la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] instaló 57 estaciones meteorológicas en el estado de Guanajuato, ver Anexo 3.e, las cuales proporcionan datos de medición directa pluvial consistentes para un periodo del año 1970 – 2017, con lo anterior, se tiene determinado que el régimen de lluvias para el estado de Guanajuato en el periodo mencionado se establece en la Tabla 12.

En la Figura 29 se muestra el mapa de información en donde se observa que el área de estudio está dentro de un régimen de lluvias semihúmedo, el mapa se obtuvo por el método de interpolación Inverse Square Distance Weighed [IDW] y se consideró los datos de las 57 estaciones metrológicas en él está de Guanajuato.

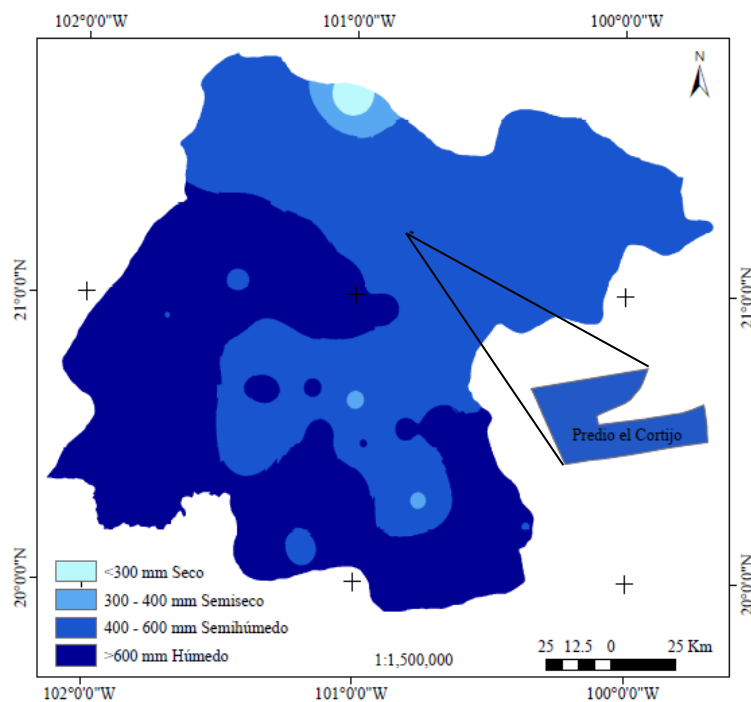


Figura 29. Mapa de régimen de lluvias para Guanajuato



Las estaciones meteorológicas de CONAGUA que influyen para la estimación del régimen de lluvias en “Predio el Cortijo” vía método de interpolación [IDW], se muestran en la siguiente gráfica, son siete estaciones las que afectan el comportamiento del área de estudio, ver Figura 30. En esta misma gráfica, se puede interpretar el comportamiento de la tendencia de datos de lluvia para el periodo 1970 – 2017 por mes, permitiendo obtener una correlación mes – lluvia, la variabilidad del régimen de lluvias, cuales meses son más secos, cuales son más húmedos, entre otros.

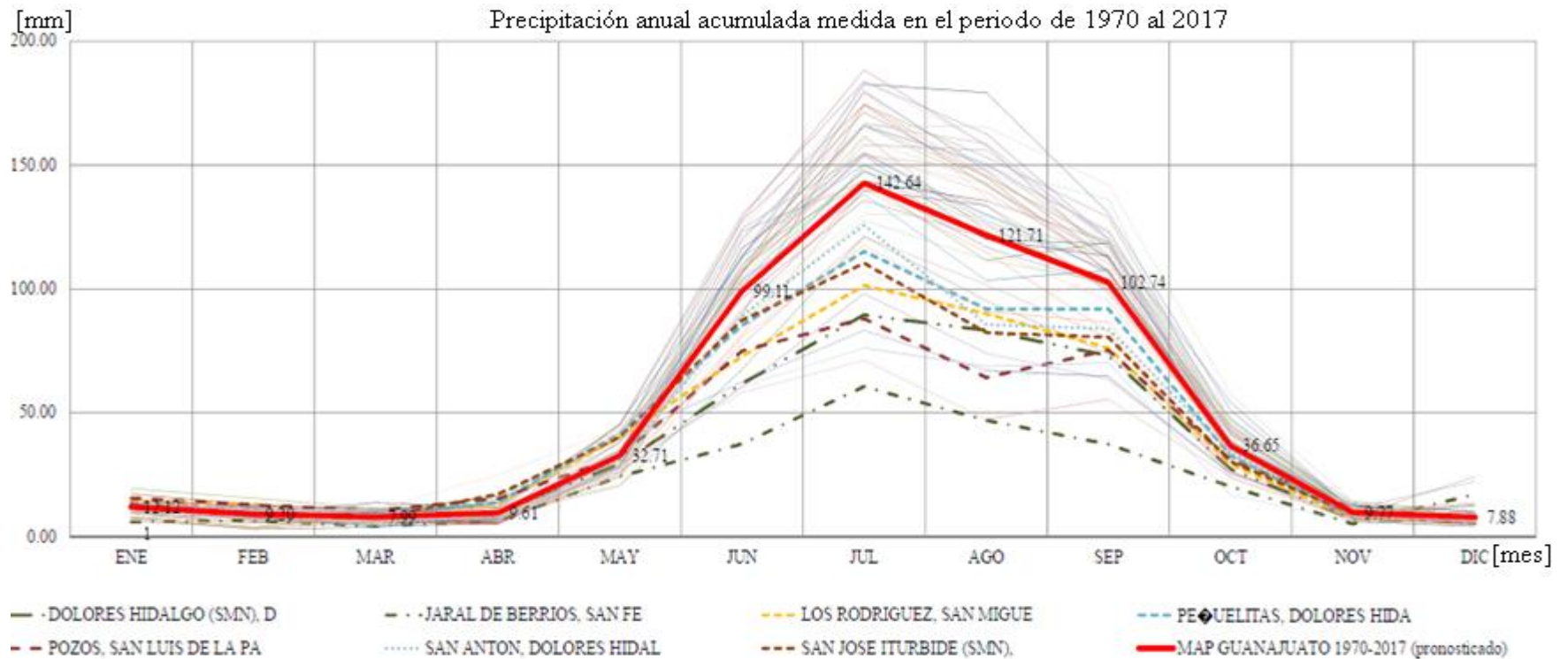


Figura 30. Gráfica de precipitación estaciones meteorológicas de CONAGUA en Gto

La siguiente gráfica de barras muestra el comportamiento del registro de lluvias en relación con las estaciones meteorológicas, se puede apreciar la carga de datos por cuartil y analizar su media de los mismos, así como la mediana (barra roja), por ejemplo, la media (barra negra) se aprecia que oscila en los 400 [mm] anuales, los límites se aprecia que oscilan entre los 300 y 500 [mm] anuales, se puede correlacionar estación – lluvia, su variabilidad, cuales estaciones son más secas, cuales son más húmedas, ver Figura 31.

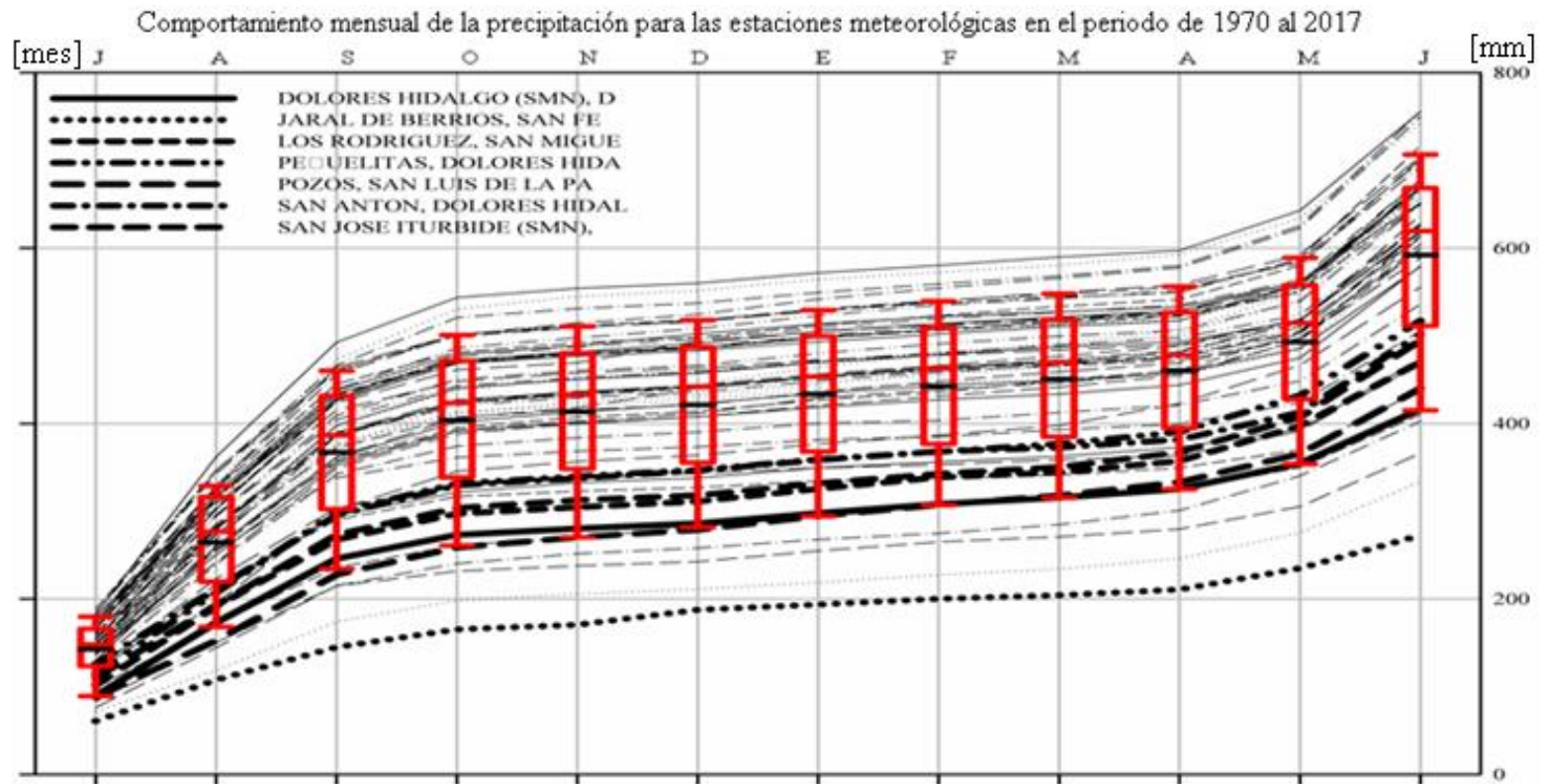


Figura 31. Comportamiento mensual de la precipitación en Guanajuato

Considerando el régimen de lluvias para Guanajuato y con el método de (Cortés. T., 1991) que propone una ecuación en acuerdo a la región según se ubica el área de estudio, le corresponde la número 5, ver Ecuación 25, esta cuenta con una confiabilidad de  $R^2 = 94\%$ , y se estima  $[R]$  en medición indirecta, ver Figura 32:

$$[R] = Y(x) = 3.48801x - 0.000188x^2 \quad (25)$$

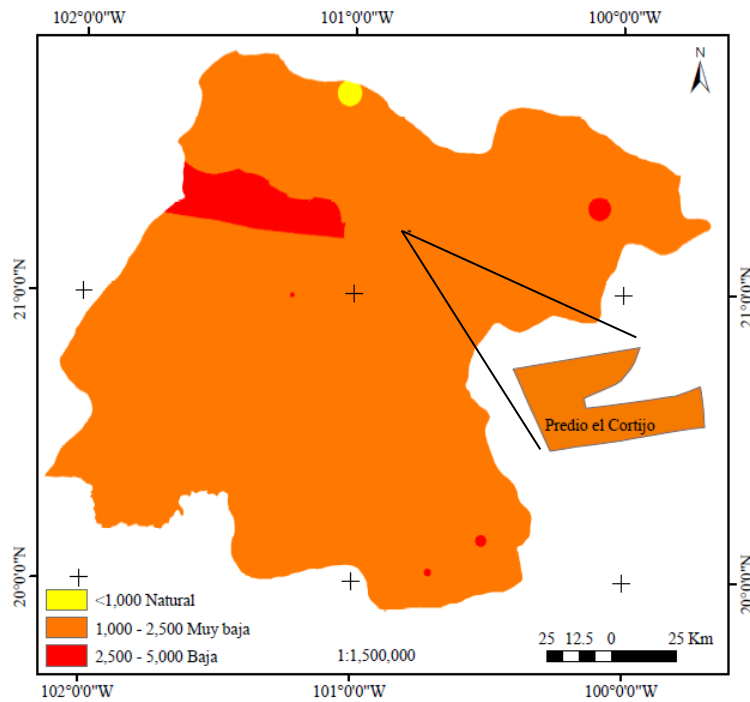


Figura 32. Mapa de  $[R]$  para Guanajuato

Con ello se determina que  $[R]$  medido en forma indirecta tiene valores para una clasificación muy baja.

### 7.1.2. $[K]$ estimada por medición indirecta

Para la consulta de las propiedades mecánicas, físicas y químicas del suelo según las regiones, la [FAO] establece que al no contar con muestras *in situ* de suelo para ser procesadas en laboratorio, se puede consultar un método alternativo el cual se define a través de la selección del valor de  $[K]$  por su unidad de clasificación del suelo y su

textura. De esta manera, será necesario contar antes con un mapa de edafología de la zona a estudiar, es decir, tener un inventario del suelo disponible en la región, su unidad de clasificación y su textura, ver Figura 33.

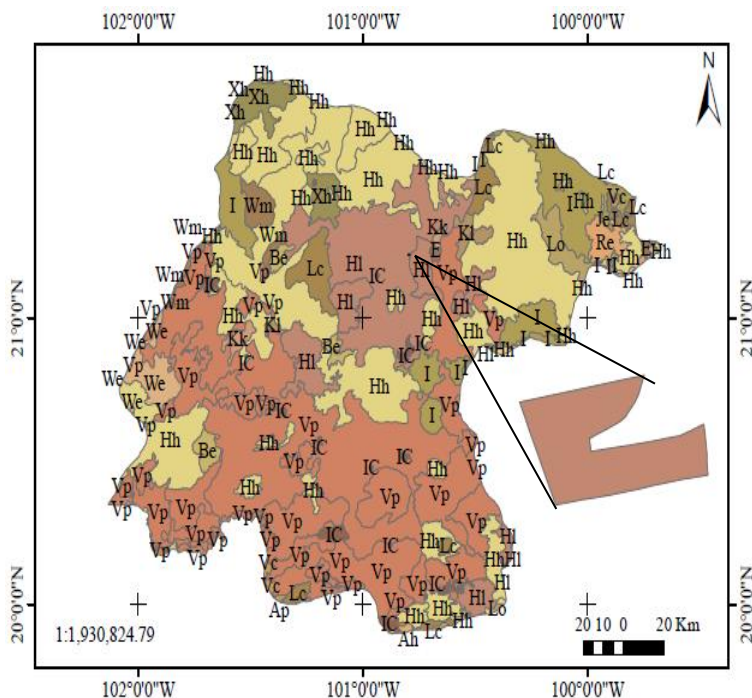


Figura 33. Unidad de clasificación del suelo para Guanajuato

El procedimiento a seguir es: determinar la unidad de clasificación del suelo en acuerdo a los mapas de edafología de la región que se estudia; determinar su textura por gruesa, media o fina; localizar el valor de [K] según la [FAO], ver Tabla 13.

Tabla 13. [K] en acuerdo a la (FAO., 1975)

Unidad de Clasificación del Suelo		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
A	Acrisol	0.026	0.040	0.013
Af	Acrisol férrico	0.013	0.020	0.007
Ag	Acrisol gléyico	0.026	0.030	0.013
Ah	Acrisol húmico	0.013	0.020	0.007
Ao	Acrisol órtico	0.026	0.040	0.013

Unidad de Clasificación del Suelo		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
Ap	Acrisol plántico	0.053	0.079	0.026
B	Cambisol	0.026	0.040	0.013
B (c,d,e,k)	Cambisol crómico, dístrico, éutrico, cálcico	0.026	0.040	0.013
Bf	Cambisol férrico	0.013	0.020	0.007
Bg	Cambisol gléyico	0.026	0.040	0.013
Bh	Cambisol húmico	0.013	0.020	0.007
Bk	Cambisol cálcico	0.026	0.040	0.013
B (v,x)	Cambisol vértico, xérico	0.053	0.079	0.026
C (h,k,l)	Chernozem háptico, cálcico, y lúvico	0.013	0.020	0.007
D (d,g,e)	Podzoluvizol dístrico, gléyico, éutrico	0.053	0.079	0.026
E	Rendzina	0.013	0.020	0.007
F (a,h,p,o)	Ferrasol ácrico, húmico, plántico, ócrico	0.013	0.020	0.007
G	Gleysol	0.026	0.040	0.013
Gc	Gleysol calcárico	0.013	0.020	0.007
G (d,e)	Gleysol dístrico éutrico	0.026	0.040	0.013
G (h,m)	Gleysol húmico, mólico	0.013	0.020	0.007
G (p,x)	Gleysol plántico, gélico	0.053	0.079	0.026
Gv	Gleysol vértico	0.053	0.079	0.026
H (c,g,h,l)	Feozem calcárico, gléyico, háptico, lúvico	0.013	0.020	0.007
I	Litosol	0.013	0.020	0.007
J	Fluvisol	0.026	0.040	0.013
Jc	Fluvisol calcárico	0.013	0.020	0.007
Jd	Fluvisol dístrico	0.026	0.040	0.013
Je	Fluvisol éutrico	0.026	0.040	0.013
Jt	Fluvisol tiónico	0.053	0.079	0.026
Jp	Fluvisol plántico	0.053	0.079	0.026
K (h,k,l)	Kastañosem húmico, cálcico, lúvico	0.026	0.040	0.013
L	Luvisol	0.026	0.040	0.013



Unidad de Clasificación del Suelo		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
La	Luvisol alábico	0.053	0.079	0.026
Lc	Luvisol crómico	0.026	0.040	0.013
Lf	Luvisol férrico	0.013	0.020	0.007
Lg	Luvisol gléyico	0.026	0.040	0.013
Lk	Luvisol cálcico	0.026	0.040	0.013
Lo	Luvisol órtico	0.026	0.040	0.013
Lp	Luvisol plántico	0.053	0.079	0.026
Lv	Luvisol vértico	0.053	0.079	0.026
M (a,g)	Greysen ácrico, gléyico	0.026	0.040	0.013
N (d,e,h)	Nitosol dístrico, éútrico, húmico	0.013	0.020	0.007
O (d,e,x)	Histosol dístrico, éútrico, gélico	0.013	0.020	0.007
P	Podzol	0.053	0.079	0.026
Pf	Podzol férrico	0.053	0.079	0.026
Pg	Podzol gléyico	0.053	0.079	0.026
Ph	Podzol húmico	0.026	0.040	0.013
Po	Podzol órtico	0.053	0.079	0.026
Pp	Podzol plácico	0.053	0.079	0.026
Q (a,c,f,l)	Arenosol alábico, cámbico, ferrálico lúvico	0.013	0.020	0.007
R	Regosol	0.026	0.040	0.013
Re	Regosol éútrico	0.026	0.040	0.013
Rc	Regosol calcárico	0.013	0.020	0.007
Rd	Regosol dístrico	0.026	0.040	0.013
Rx	Regosol gélico	0.053	0.079	0.026
S	Solonetz	0.053	0.079	0.026
Sg	Solonetz gléyico	0.053	0.079	0.026
Sm	Solonetz mólico	0.026	0.040	0.013
So	Solonetz órtico	0.053	0.079	0.026
T	Andosol	0.026	0.040	0.013

Unidad de Clasificación del Suelo		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
Th	Andosol húmico	0.013	0.020	0.007
Tm	Andosol mólico	0.013	0.020	0.007
To	Andosol órtico	0.026	0.040	0.013
Tv	Andosol vítrico	0.026	0.040	0.013
U	Ranker	0.013	0.020	0.007
V (c,p)	Vertisol crómico, pélico	0.053	0.079	0.026
W	Planosol	0.053	0.079	0.026
Wd	Planosol dístrico	0.053	0.079	0.026
We	Planosol éutrico	0.053	0.079	0.026
Wh	Planosol húmico	0.026	0.040	0.013
Wm	Planosol mólico	0.026	0.040	0.013
Wx	Planosol gélico	0.053	0.079	0.026
X (k,h,l,g)	Xerosol cálcico, háplico, lúvico, gypsico	0.053	0.079	0.026
Y(h,k,l,g,t)	Yermosol háplico, cálcico, lúvico, gypsico	0.053	0.079	0.026
Z	Solonchak	0.053	0.079	0.026
Zg	Solonchak gléyico	0.026	0.040	0.013
Zm	Solonchak mólico	0.013	0.020	0.007
Zo	Solonchak órtico	0.026	0.040	0.013
Zt	Solonchak takirico	0.053	0.079	0.026

De esta manera se determina que el valor de [K] estimada por medición indirecta, primero se consulta su unidad de clasificación del suelo en el mapa de la Figura 33, el cual indica que para el área de estudio la unidad de clasificación del suelo es “HI”, segundo de la Tabla 11 observamos que para “HI” la textura que le corresponde es “Media”, y finalmente la Tabla 13 con los datos anteriores se obtiene el valor para [K] estimado de 0.02 [Mg ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> ha mm<sup>-1</sup> h] al año, ver Figura 34.

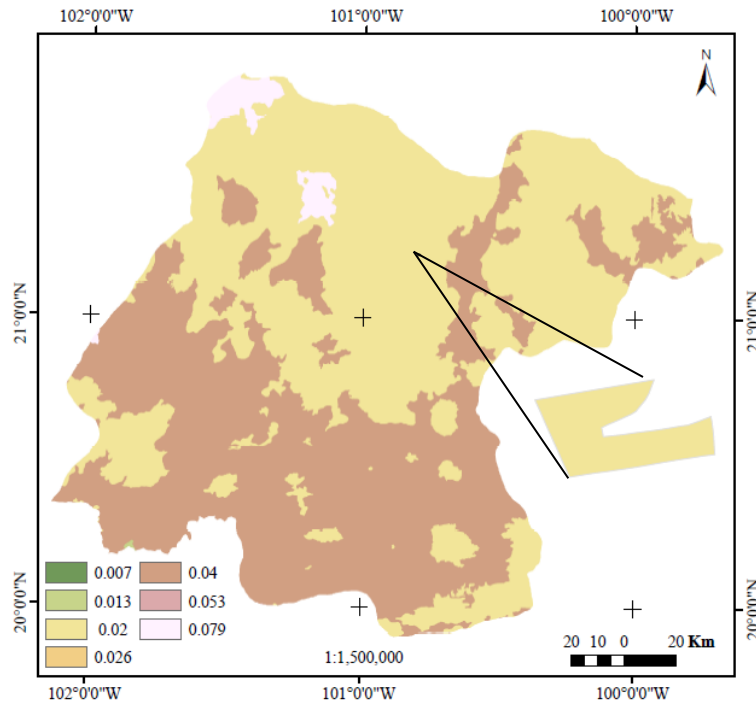


Figura 34. Mapa de [K] para Guanajuato

### 7.1.3. [LS] estimada por medición indirecta

Para la estimación de [LS], se hace uso de los archivos [DEM] obtenidos de los [SR] para en este caso [SRTM] con una resolución espacial de 30 [m]. Los [DEM] proporcionan información tales como medidas de altimetría, determinadas a partir de métodos por radiometría, ver Anexo 3.g, y en conjunto con el método descrito en el punto 3.2.3 y 3.2.4 del presente texto, se obtiene [LS] de unidades [Adimensionales], ver Figura 35.

Se obtuvieron 7 imágenes [DEM] del Satélite [SRTM] para generar el mosaico perteneciente al estado de Guanajuato, ver Anexo 3.f; Las características de cada uno de los [DEM] fueron Resolución Temporal de única toma, Resolución Espacial 30 [m], Resolución Espectral 1 Banda y Resolución Radiométrica 2<sup>8</sup>. Las imágenes ya cuentan con la corrección espacial en la referencia del sistema de coordenadas “WGS 1984 UTM Zone 14N” del sistema de proyección “Traverse Mercator”.

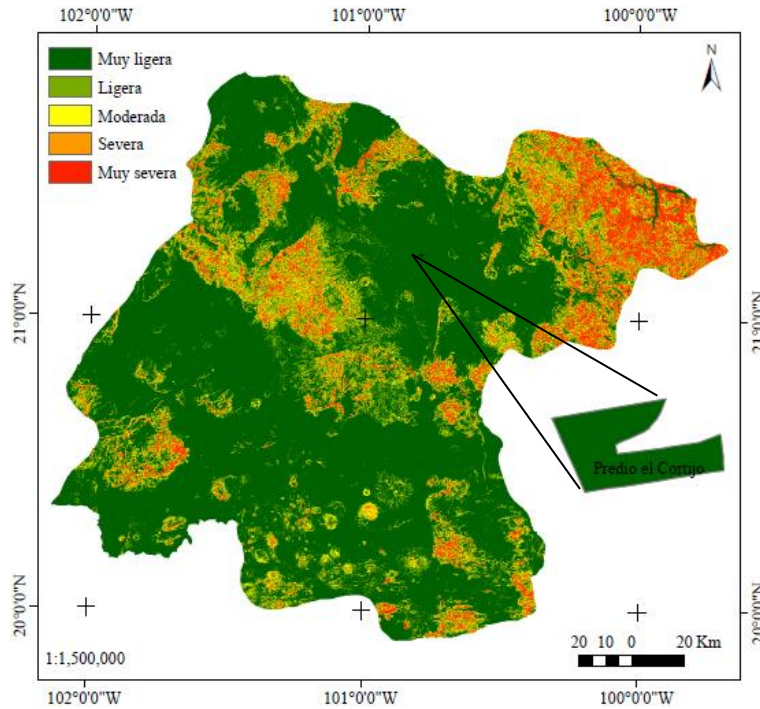


Figura 35. Mapa [LS] para Guanajuato

Se determina el [LS] del área de estudio estimada por medición indirecta corresponde a una clasificación muy ligera.

#### 7.1.4. Erosión hídrica potencial estimada por medición indirecta

Con los valores de [R], [K] y [LS] estimados por métodos de medición indirecta, se puede estimar la máxima erosión hídrica que se puede generar, también conocida como erosión hídrica potencial o erosión hídrica natural, véase Ecuación 26, ver Figura 36:

$$A = R * K * LS \quad (25)$$

Se determina que el valor de la erosión hídrica potencial estimada por métodos de medición indirecta corresponde a una clasificación natural.

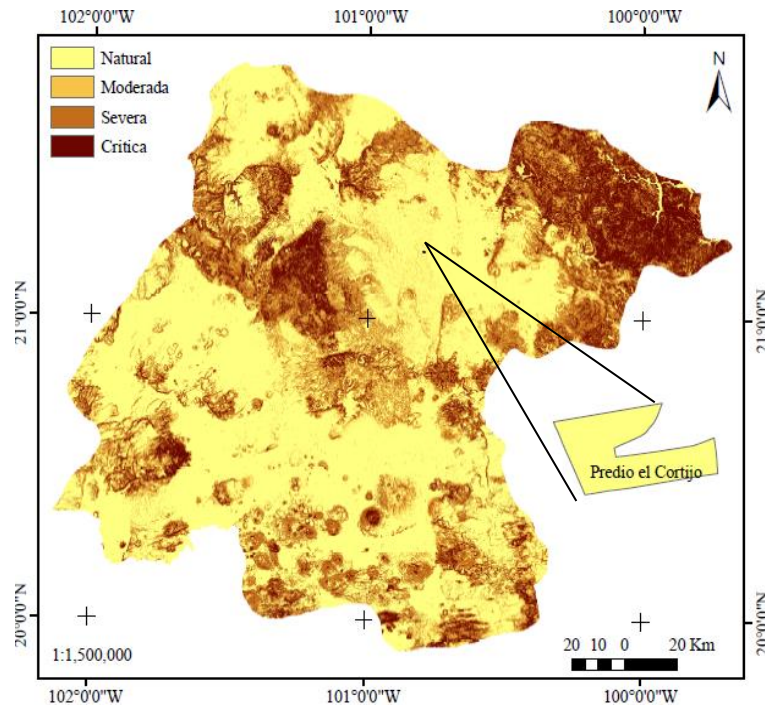


Figura 36. Erosión hídrica potencial para Guanajuato

#### 7.1.5. $[C]$ estimada por medición indirecta

Para la estimación de  $[C]$  las imágenes satelitales en formato GEOTIFF proporcionan las informaciones de base radiométrica para ser procesadas. Estas imágenes permiten procesar sus valores y obtener nuevas clasificaciones, las cuales pueden ser supervisadas y asistidas, se puede generar un  $[NDVI]$  para apoyar con un realce la vegetación y tener más visible las poblaciones de vegetación al momento de clasificar.

La forma en la que aporta la cobertura vegetal para reducir la productividad del fenómeno de erosión hídrica, se describe a continuación (Loredo. O., 1994):

- Intercepción de la lluvia para reducción de la  $[E_c]$  de las gotas de lluvia por la velocidad al impacto con los suelos o ausentar el contacto con estos.
- Interferencia superficial a la transportación de las escorrentías debida que se encuentran ásperos los terrenos y bloquean el escurrimiento de los torrenciales.
- Aporta a definir los perfiles del suelo, su estructura y porosidad debido a la

[MO], la estabilidad de los agregados y la capacidad de infiltración.

En acuerdo con la [FAO], se proporcionan valores los cuales deben ser usados durante la clasificación supervisada a manera de reclasificar el archivo en formato GEOTIFF que es procesado para estimar el valor de la cobertura vegetal actualizada, ver Tabla 14.

Tabla 14. [C] en acuerdo a la (FAO., 1975)

Tipo de cobertura vegetal	Factor
Agricultura de riego	0.150
Área de minería	0.500
Agricultura de temporal	0.150
Área sin vegetación aparente	0.450
Bosque	0.001
Bosque de galería	0.010
Chaparral	0.031
Cauce	0.780
Camino	0.450
Cuerpo de agua	0.000
Matorral de coníferas	0.100
Matorral crasicuale	0.110
Matorral desértico resetofilo	0.004
Matorral desértico microfilo	0.003
Matorral espinoso tamaulipeco	0.012
Matorral submontano	0.004
Mezquital	0.039
Pastizal	0.080
Pastizal inducido	0.150
Pastizal natural	0.540
Pradera de alta montaña	0.010 – 0.025
Vegetación de galería	0.001

Tipo de cobertura vegetal	Factor
Vegetación halófila	0.038
Sin vegetación	1.000
Zona urbana	0.450
Zona industrial	0.500
Suelo desnudo	1.000
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje	0.001
Sabana o pradera herbáceas o en buenas condiciones	0.010
Sabana o pradera sobre pastoreada	0.100
Maíz, sorgo o mijos, alto rendimiento sin laboreo convencional	0.020 – 0.550
Maíz, sorgo o mijos, alto rendimiento con laboreo convencional	0.500 – 0.990
Maíz, sorgo o mijos, alto rendimiento con mínimo o no laboreo	0.020 – 0.100
Maíz, sorgo o mijos, alto rendimiento, laboreo sin chisel entre res	0.120 – 0.200
Maíz, sorgo o mijos, alto rendimiento, laboreo con chisel entre res	0.300 – 0.450
Algodón	0.400 – 0.700
Pradera herbácea	0.010 – 0.025
Soja	0.200 – 0.500
Trigo	0.100 – 0.400
Arroz	0.100 – 0.200
Cacahuate	0.300 – 0.800
Palmera, cafeto, cocotero con cobertura vegetal	0.100 – 0.300
Piña cultivada a nivel con retirada de residuos	0.100 – 0.400
Piña cultivada a nivel con residuos en superficie	0.010
Patata surcos según la pendiente	0.200 – 0.500
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.270
Granado con cobertura de malas hierba	0.080
Granado limpio de malas hierbas	0.560
Caña de azúcar	0.130 – 0.400
Plátano, después de su plantado	0.050 – 0.100
Papaya	0.210

El NDVI ofrece al usuario generar un pre – procesamiento de su archivo GEOTIFF que será usado para procesar una clasificación supervisada y estimar los valores de [C]. El principio de este pre-procesamiento, es que todos los archivos en formato GEOTIFF, tienen una base de valores establecidos en valores radiométricos, lo que realiza el NDVI es aumentar los valores de radiometría de la vegetación por usar la longitud de onda de la banda roja e infrarroja, y disminuye los valores radiométricos de cualquier otra característica que no se la vegetación. Así se puede procesar una clasificación supervisada por el método de verosimilitud en conjunto con los valores que asigna la (FAO., 1975) a las diferentes clases de vegetación, ver Figura 37.

Se hizo la descarga de 7 imágenes en formato GEOTIFF del Satélite Landsat 8 para generar el mosaico perteneciente al estado de Guanajuato; Las características de cada una de las imágenes GEOTIFF fueron Resolución Temporal de única toma el día 16 de Noviembre del 2019, Resolución Espacial 30 metros, Resolución Espectral 7 Bandas y Resolución Radiométrica 2<sup>8</sup>. Las imágenes ya cuentan con la corrección espacial en la referencia del sistema de coordenadas “WGS 1984 UTM Zone 14N” del sistema de proyección “*Traverse Mercator*” y la corrección atmosférica.

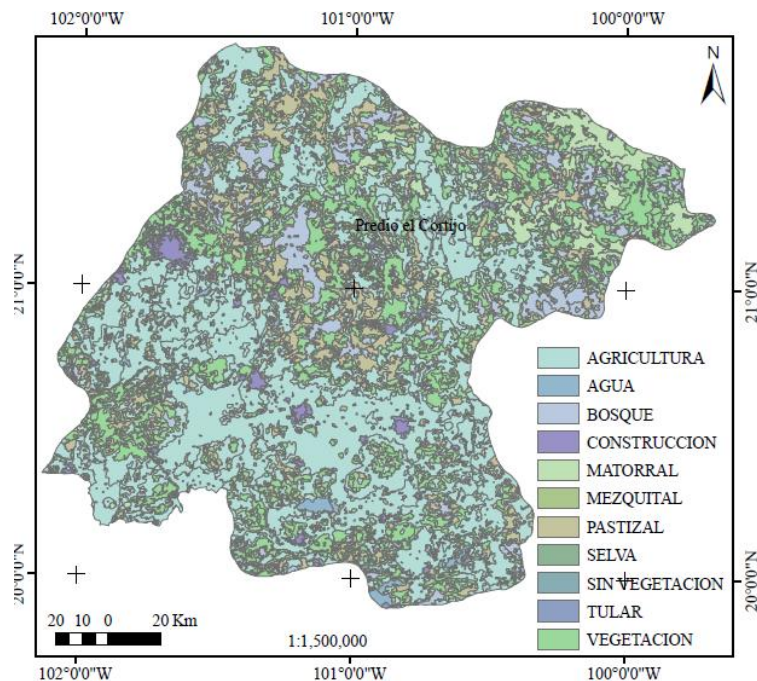


Figura 37. Mapa [C] para Guanajuato



### 7.1.6. Erosión hídrica estimada por (R) USLE

Los valores de [R], [K], [LS] y [C] estimados en forma indirecta, son las cantidades necesarias para estimar el grado de erosión hídrica, véase la Ecuación 2, principalmente en este mapa, la erosión hídrica potencial o natural del punto 7.1.4 se ve controlada por el efecto de la capa de cobertura vegetal, visualmente se aprecia que las zonas críticas y severas en este nuevo mapa tuvieron que disminuirse, ver Figura 38. Con lo anterior, se determina que el valor de la erosión hídrica estimada corresponde a una clasificación natural con un valor de 33 [Mg ha<sup>-1</sup>] al año, lo cual ya está excediendo los límites permisibles de erosión, según la Tabla 3, estaría en riesgo totalmente.

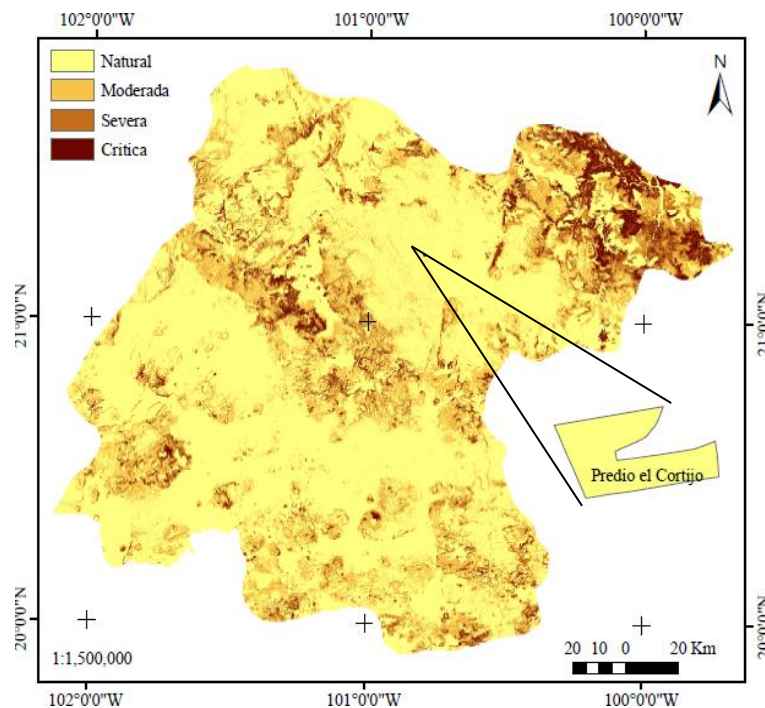


Figura 38. Erosión hídrica para Guanajuato

### 7.2. (R) USLE medición directa

Para generar una estimación directa de la erosión hídrica, se miden algunas de sus variables en forma directa con el estimador (R) USLE, tal es el caso de [R] y [K], lo que se hace es instrumentar el área de estudio, y medir sus propiedades mecánicas, físicas y

químicas de forma directa, lo anterior se realizó en un periodo del 22 de Septiembre al 24 de Noviembre del 2019, para el caso de [R] revisar el punto 5.1.8 del presente texto en función de consultar la metodología, y para el caso de [K] revisar el punto 5.2.8 del presente texto, así como para [LS] y [C] revisar los puntos 7.1.3, 7.1.5 respectivamente. Con el resultado de dichas mediciones hechas en forma directa, obtenemos un modelo de erosión hídrica al cual le denominaremos “pronosticado” por mediciones directas.

### 7.2.1. [R] estimada por medición directa

Para el monitoreo de la variable pluvial por medición directa en “Predio el Cortijo”, se instrumentó según se explicó en el punto 5.1.1 del presente texto. El Anexo 1, muestra la distribución espacial de los 7 pluviómetros totalizadores y 3 pluviómetros automáticos instalados en el área de estudio para el monitoreo pluvial en el periodo indicado. Con lo anterior, se determina que el régimen de lluvias para el área de estudio fue el siguiente, ver Figura 39.

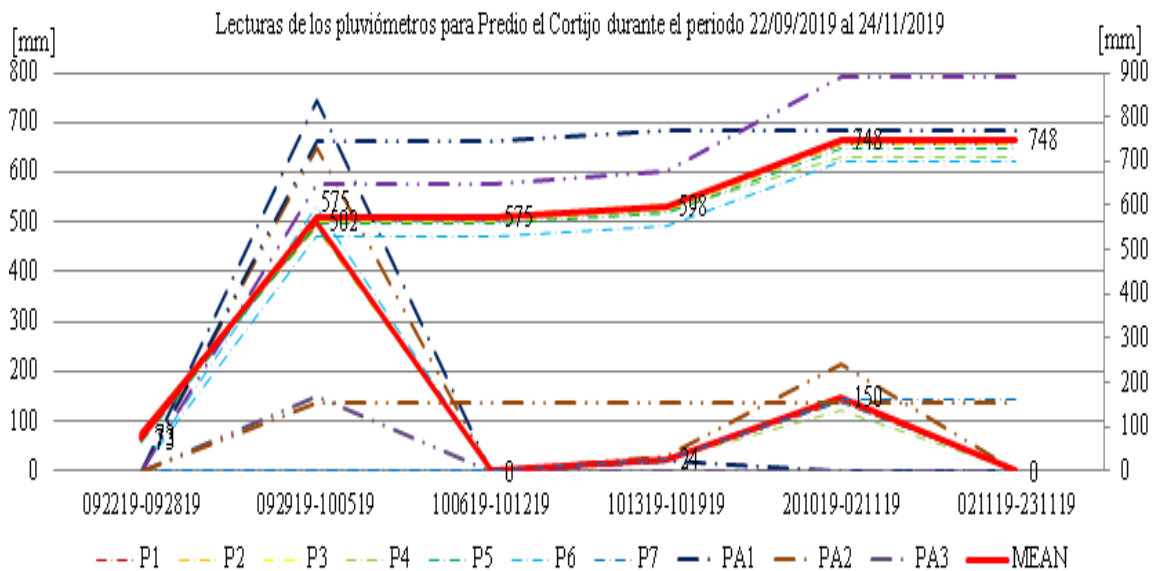


Figura 39. Gráfica lectura de los pluviómetros para “Predio el Cortijo”

Considerando el régimen de lluvias para el “Predio el Cortijo” y el método de interpolación Inverse Square Distance Weigthed, IDW, se obtiene el siguiente mapa de información para el área de estudio, ver Figura 40.

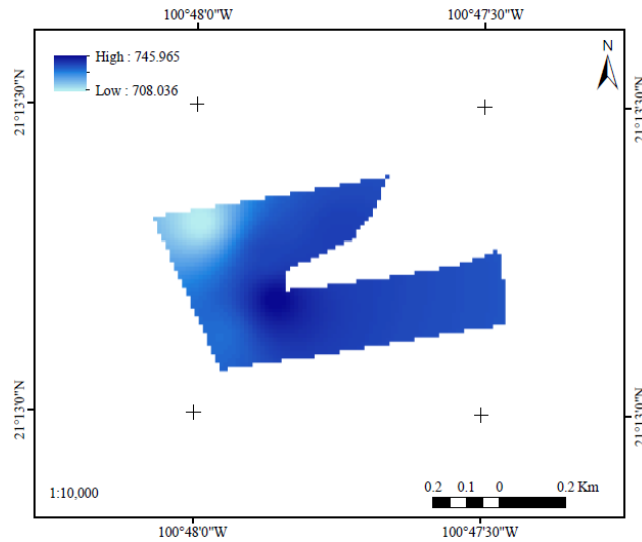


Figura 40. Mapa régimen de lluvias para "Predio el Cortijo"

Con el régimen de lluvias para el "Predio el Cortijo" y el método de (Cortés. T., 1991), el cual por la ubicación del área de estudio asigna la ecuación número 5 según su propuesta, ver Ecuación 25, con una confiabilidad de  $R^2 = 94\%$ , se obtienen los valores de [R] en medición por métodos directos, ver Figura 41:

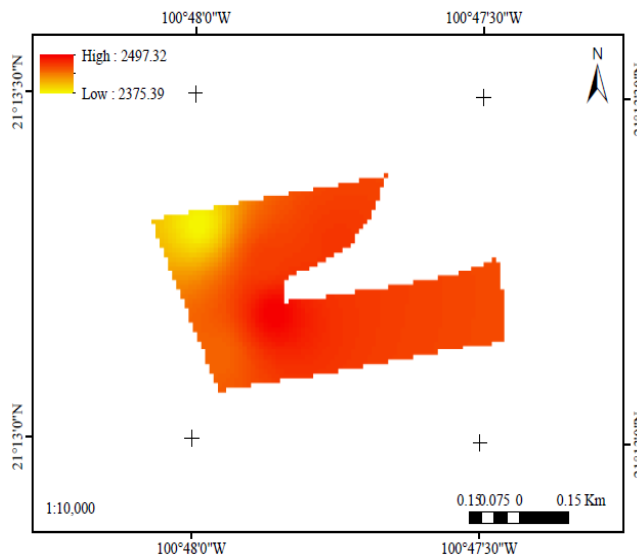


Figura 41. Mapa [R] para "Predio el Cortijo"

Con lo que se determina que el valor de [R] oscila en un rango de 2375.39 – 2497.32 [MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>].

### 7.2.2. [K] estimada por medición directa

Para medir las propiedades mecánicas del suelo en el área de estudio, se procesaron y analizaron muestras obtenidas a más de 1 [m] de profundidad, con ello se determinó la estructura del suelo, su cantidad de [MO] y su permeabilidad a fin de establecer un valor de [K], alimentando los resultados al nomograma propuesto por (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), ver Anexo 2.

La estructura del suelo se obtiene a partir de la metodología establecida en el punto 5.2.2 del presente texto, clasifica Limos y Arenas muy finas en diámetros de grano de 0.002 – 0.10 [mm], y Arenas en diámetros de grano de 0.10 – 2.00 [mm], con lo que los resultados de las muestras procesadas se observan en la Tabla 15:

Tabla 15. Estructura del suelo en  $\phi$  de 0.002 – 0.10 [mm] y 0.10 – 2.00 [mm]

Cribas			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Promedio
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
#	[in]	[mm]	Suelo expuesto	Suelo expuesto	Vegetación	Vegetación	Arbórea	Arbórea	Factor K
20	.033	0.84	9	16	9	11	6	11	53
40	.017	0.42	20	13	12	14	9	10	
80	.007	0.18	27	9	31	28	34	29	
100	.006	0.15	1	1	4	2	6	4	
200	.003	0.07	4	6	4	3	4	4	8
400	.002	0.04	1	10	2	2	3	3	

Con el resultado anterior, se asignan valores de estructura del suelo para el primer bloque del nomograma de (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), el segundo bloque del nomograma está dado por valores en la definición de la estructura del suelo determinaos por la Tabla 16 según se indica:

Tabla 16. Estructura del suelo valor nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Código	Clase de Estructura	Tamaño [mm]
1	Granular muy fina y grumosa muy fina	<1
2	Granular fina y grumosa fina	1 – 2
3	Granular media, grumosa media y granular gruesa	2 – 10

4	Laminar, prismática, columnar, masiva, bloques y granular muy gruesa	>10
---	--	-----

En función de esta clasificación mencionada y a partir del procesamiento y análisis de muestras ya indicadas las condiciones, se determina que la estructura para esta parte del bloque del nomograma está dada según la Tabla 17, que muestra los resultados:

Tabla 17. Segundo bloque valor de nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Estructura Granular								
Estructura		[%]T1	[%]T2	[%]T3	[%]T4	[%]T5	[%]T6	[%]Mean
		Suelo expuesto		Vegetación		Arbórea		Prom
4	Muy gruesa	9	11	8	11	5	9	9
3	Gruesa	29	34	29	30	33	30	30
2	Fina	9	16	9	11	6	11	10
<b>1</b>	<b>Muy Fina</b>	<b>53</b>	<b>39</b>	<b>54</b>	<b>48</b>	<b>56</b>	<b>50</b>	<b>51</b>
Totales		100	100	100	100	100	100	100

La [MO] del suelo se obtiene a partir de la metodología establecida en el punto 5.2.4, en este se establece un análisis de [MO] por el método de calcinación, los resultados se muestran en la siguiente gráfica, ver Figura 42.

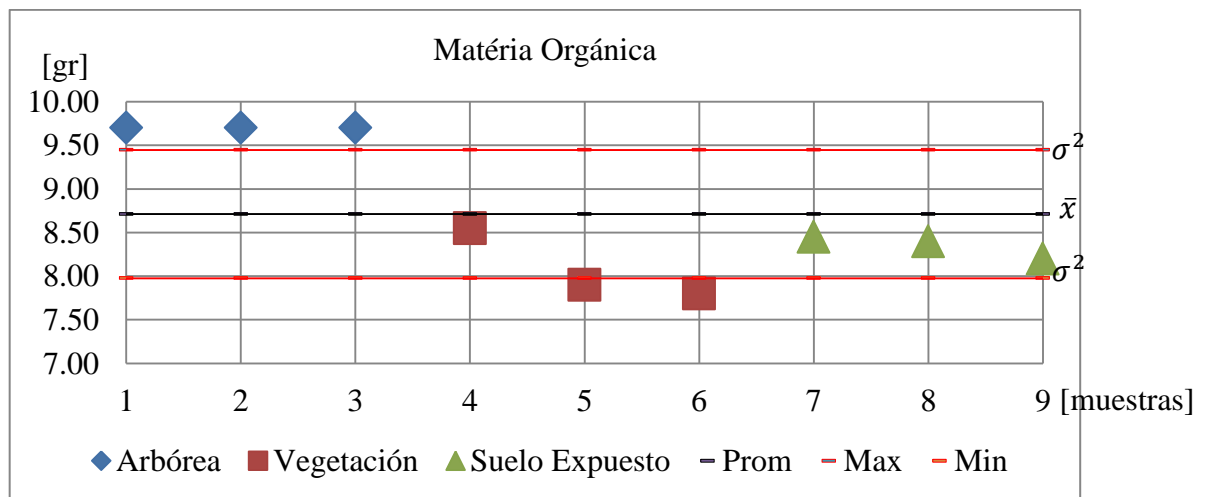


Figura 42. Gráfica de [MO] para "Predio el Cortijo"

La permeabilidad del suelo se obtiene a partir de la metodología establecida en el punto 5.2.3 del presente texto, en este se establece un análisis por “*anillo permeámetro*”, los resultados se muestran en la siguiente gráfica, ver Figura 43.



Figura 43. Gráfica de permeabilidad para “*Predio el Cortijo*”

La clasificación de la permeabilidad para el Nomograma de (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), está definida por la siguiente Tabla 18:

Tabla 18. Permeabilidad valor del nomograma (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)

Código	Clasificación	Conductividad Hidráulica [cm hr <sup>-1</sup> ]
1	Muy rápida	>12.5
2	Moderadamente rápida	6.0 – 12.5
3	Moderada	2.0 – 6.0
4	Moderadamente lenta	0.5 – 2.0
5	Lenta	0.125 – 0.5
6	Muy lenta	<0.125

Con los valores obtenidos de las propiedades mecánicas, físicas y químicas del suelo, es posible obtener el valor [K] alimentando los resultados al nomograma de (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), a continuación se resumen los valores, ver Figura 44:

- Diámetro del grano del suelo de 0.002 – 0.10 [mm], primer bloque = 8%
- Diámetro del grano del suelo de 0.10 – 2.00 [mm], primer bloque = 53%
- Materia orgánica = 8.71%
- Estructura del suelo, segundo bloque = Muy Fina = 1
- Permeabilidad del suelo = 12.5 [cm] en  $\frac{3}{4}$  [h] = Muy rápida = 1

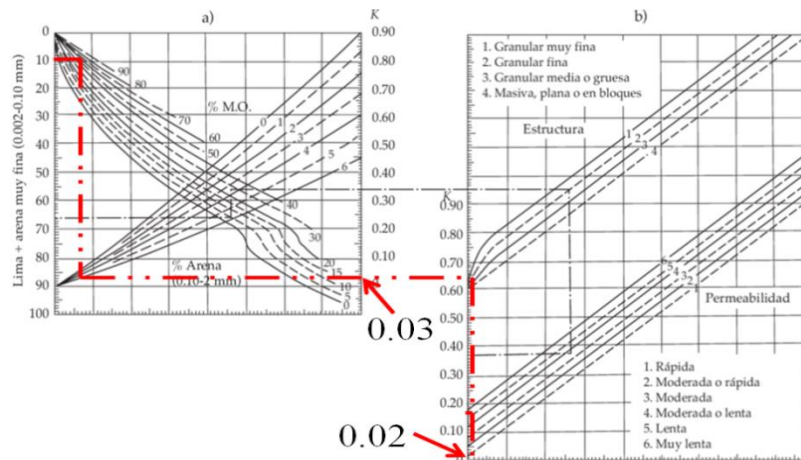


Figura 44. Gráfica nomograma de [K] para “Predio el Cortijo”

Con lo anterior, se determina que el valor del factor K estimada por el método (R) USLE medición directa, es de 0.02 [ $\text{Mg ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{ha mm}^{-1} \text{h}$ ] al año, ver Figura 45, coincidente con la obtenida para el punto 7.1.2 del presente texto, y su método correspondiente.

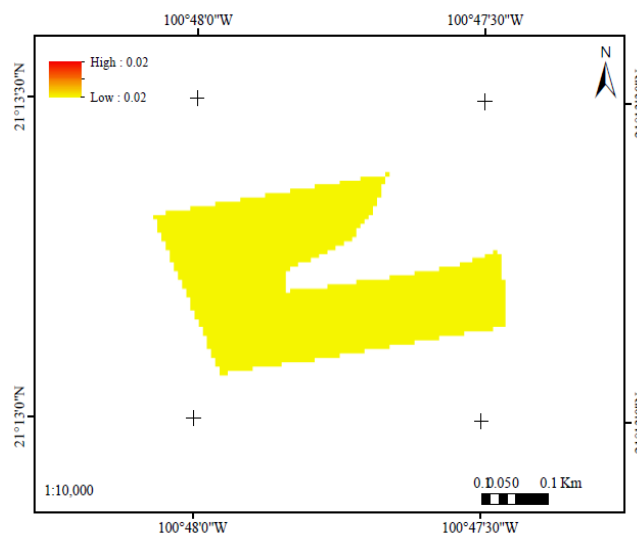


Figura 45. Mapa [K] para “Predio el Cortijo”

### 7.2.3. Erosión hídrica estimada por medición directa

Con los valores de [R] y [K] calculados por mediciones directas descritas en los puntos 7.2.1 y 7.2.2 del presente texto, y los valores de [LS] y [C] calculados por mediciones indirectas descritas en los puntos 7.1.3 y 7.1.5 del presente texto, se puede estimar el grado de erosión hídrica máximo, véase la Ecuación 2. Su resultado está en una clasificación natural con un valor de 6.9 [Mg ha<sup>-1</sup>] al año, ver Figura 46. Se puede apreciar de la medición directa a través de instrumentar el área de estudio y la conservación de cobertura vegetal para mantener el LPE en acuerdo a la Tabla 3 que vale 11.2 [Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>] para muestras arenosas mayores a 1 [m] de profundidad.

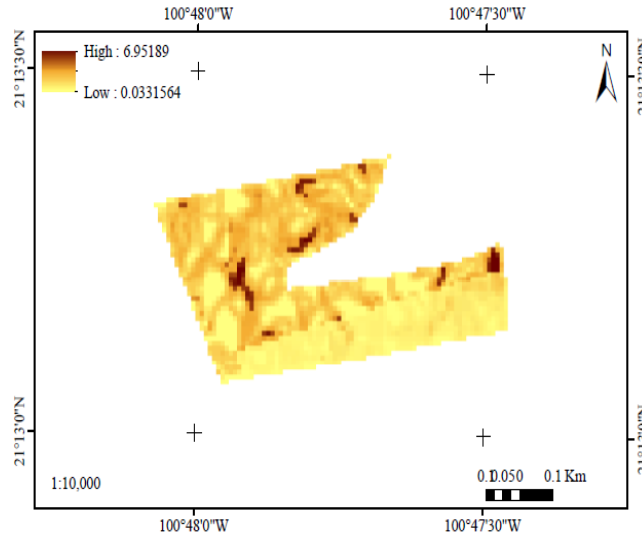


Figura 46. Erosión hídrica para “Predio el Cortijo”

### 7.3. Captación de sedimentos por medición directa

El método para la captación de sedimentos producidos por el fenómeno de la erosión hídrica y medidos de manera directa, es el principal aporte del presente proyecto, en este capítulo se encuentra la información más relevante desde el punto de vista científico y tecnológico, con beneficio directo a la sociedad, al pequeño parcelario de bajos recursos, el agricultor, el dueño de su pequeña tierra, al pequeño hacendario, en función del su bienestar y el de la sociedad de su entidad.



La relevancia y aportación a la sociedad puntualiza en el costo y la técnica que se propone para determinar el valor de la erosión hídrica, y por el mismo propietario, su simpleza del método solo implica hacer una medición directa durante el lapso de un año y compararla contra los mapas de las bases de datos públicas para conocer si se encuentra en riesgo su parcela, o las tablas de LPE. Para demostrar que es una propuesta sustentable, en el presente capítulo se comparan los métodos estudiados, se observa que el método de (R) USLE por medición directa, aunque ya está dentro del LPE aun sobreestima las variables de medición que lo componen, esto se debe a las características propias del método y el cómo fue conceptualizado inicialmente por (Wischmeier. W y Smith. D., 1978), con ello se determina que no puede ser un método universal, cada caso es un caso de estudio, sus características de cada caso son particulares, sin embargo la tendencia para el método es aceptarlo con universalidad, ver Figura 47.



Figura 47. Evidencia de la erosión hídrica para “Predio el Cortijo”

El método de captación de sedimentos propuesto para estimar la erosión hídrica, respeta el principio del ciclo de la misma, ver Figura 11, sin importar la condición de la vegetación, el colocar captadores en fosas y en sentido de la pendiente, permite cumplir con el experimento, para este estudio se proponen tres características de vegetación, la capacidad de los captadores está en función del régimen de lluvias del área de estudio y conectarlos con la superficie del suelo a través de un dren, para permitir la depositación, transporte y sedimentación del suelo para cuantificar de manera directa, ver Figura 48.



Figura 48. Erosión hídrica por medición directa

Para el “*Predio el Cortijo*”, en acuerdo a las variables que influyen en la erosión hídrica ya pronosticadas, se determinó que la capacidad de los captadores es de 400 [Lt], y también se determinaron los puntos altos y bajos de la pendiente para contar con la caída de los sedimentos.

#### 7.4. Comparación de la erosión hídrica estimada por el método captación de sedimentos (observado) y (R) USLE medición directa (pronosticado)

En el Anexo 4 se ajustó un modelo en acuerdo con los resultados de erosión hídrica obtenidos por el método de captación de sedimentos y (R) USLE medición directa, con sus unidades en  $[\text{gr m}^{-1}]$ . Para cada evento de lluvia presentado en el periodo del 22 de septiembre al 24 de noviembre del 2019, se obtuvo el suelo, se separó del agua, se secó y se pesó. La recta obtenida por el método  $R^2$  que proyecta el comportamiento de erosión hídrica es  $y(x) = 400.2259 + 1.2680x$  con una confiabilidad del 95.81%.

## 8. DISCUSIONES

### 8.1. Pros y contras de las metodologías empleadas

- (R) USLE pros: Al ser calculado en extensiones territoriales muy grandes en conjunto con los SIG y SR, porque la técnica es matricial y algorítmica, enfatizada en el análisis numérico de los valores del pixel en acuerdo a la información disponible, punto de vista que contrasta con (Pandey. A. *et al.*, 2007) que menciona que la combinación de (R) USLE y los SIG han sido encontrados efectivos y adaptables para una aproximación en la estimación de la magnitud y distribución espacial de la erosión; para calcular sus variables es necesario contar bases de datos actualizadas.
- (R) USLE puede ser estimado sin experimentación *in situ*, lo cual representa ventajas económicas al validar la pertinencia de los resultados, como concluye (Avanzi. J. *et al.*, 2013) comentando que la implementación del modelo (R) USLE en el ambiente del SIG fue encontrado como una herramienta simple y útil para predecir la distribución espacial del riesgo de erosión, e identificar las áreas críticas.
- (R) USLE es solo un valor de referencia debido que sus resultados están sobre-estimados, esto se debe a la naturaleza y condiciones del método, sin embargo se recomienda medir de forma directa para reducir la incertidumbre de los resultados, como concluye (Singh. M. and Khera. K., 2010) que los métodos para calcular las variables de (R) USLE son basados en conjunto de datos experimentales particulares de las condiciones del área donde se analizó el fenómeno, no repite ni reproduce en otras áreas.
- Captación de sedimentos a través de parcelas experimentales muestra mayores ventajas ya que mide de forma directa la erosión hídrica.
- Captación de sedimentos requiere de una inversión inicial para poder instrumentar las áreas en por lo menos tres condiciones de vegetación como se estudió, sus valores aplicaran en la extensión territorial que sea homogénea al resultado de las variables según se hayan medido, por lo que se pueden tener varias parcelas instrumentadas en una extensión territorial muy pequeña, o lo contrario según sea el caso, no se debe extrapolar de manera lineal y económico no es.
- Captación de sedimentos puede ser realizado por el propio dueño del área de

estudio con una mínima capacitación para la habilidad de interpretar los resultados y así concluir el comportamiento del área.

## 8.2. ¿Cómo se comporta (R) USLE?

El modelo (R) USLE al ser lineal muestra un comportamiento de combinaciones en acuerdo con el valor que asumen sus variables, si es alto [↑] o bajo [↓], ver Tabla 19.

Tabla 19. Algunas posibles combinaciones para el método (R) USLE

# Comb	Variables de (R) USLE					
1	R↑	K↑	L↑	S↑	C↑	P↑
2	R↑	K↑	L↑	S↑	C↑	P↓
3	R↑	K↑	L↑	S↑	P↑	C↑
4	R↑	K↑	L↑	S↑	P↑	C↓
5	R↑	K↑	L↑	C↑	P↑	S↑
6	R↑	K↑	L↑	C↑	P↑	S↓
7	R↑	K↑	S↑	C↑	P↑	L↑
8	R↑	K↑	S↑	C↑	P↑	L↓
9	R↑	L↑	S↑	C↑	P↑	K↑
10	R↑	L↑	S↑	C↑	P↑	K↓

La Tabla 19 solo muestra algunas combinaciones con repetición para el método (R) USLE, en total son 2002 combinaciones posibles, ver Ecuación 26, lo mismo que se traduce en 2002 resultados posibles; lo anterior significa que no se puede concluir de manera directa el valor de la erosión hídrica por el sentido de los valores de sus variables, es decir, por ejemplo si [R] es alta por causa de un evento de lluvia intenso, no significa que en resultado la erosión hídrica sea alta, concluir así sin tomar en cuenta todas sus variables estaría errado, debido a que alguna de las otras variables en combinación su valor podría estar atenuando un resultado alto de la erosión hídrica, y se estaría obteniendo una respuesta de una erosión hídrica baja, o tener el caso contrario, por eso es necesario hacer el cálculo sin el prejuicio del valor de sus variables.

$$CR_m^n = \frac{(m+n-1)!}{n!*(m-1)!} \quad (26)$$

Donde el término  $m$  es el número de posibles valores, que para este caso es 10 porque cada una de las variables del método asume dos posiciones, es decir, valor alto o valor bajo y  $n$  que es el número del grupo, es decir son 5 variables por lo tanto es 5.

### 8.3. ¿Cómo se comporta la vegetación?

El comportamiento de la vegetación está en función del porcentaje en abundancia de la misma, es decir, el modelo (R) USLE quedaría como lo muestra la Ecuación (27):

$$A = R * K * LS * [\%C] * P \quad (27)$$

Independiente cual sea el valor que le corresponda a  $C$  por su clase, ver Ecuación (27), el uso y manejo del suelo está ponderado [%], es decir, está en función de su cantidad, abundancia, o densidad. Si espacialmente se tiene un 0% de vegetación, el resultado de este caso se conoce como erosión hídrica natural o potencial, que es la máxima erosión hídrica posible del área de estudio dado que no existe ninguna condición de vegetación que atenué este fenómeno. Por el contrario, si espacialmente se encuentra el área de estudio abundante de vegetación en acuerdo a algún porcentaje, el valor de la erosión hídrica será proporcionalmente disminuida de forma lineal en función del porcentaje que se esté aplicando según la cantidad de vegetación se determine, visualmente consultar la Figura 36 y Figura 38, y observar el caso del resultado de erosión hídrica antes de vegetación y después con vegetación respectivamente.

### 8.4. ¿Cómo se comporta la [MO]?

El método para estimar la [MO] del suelo se puede consultar en el punto 5.2.4 del presente texto; a partir del evento inusual de lluvia que se midió en la semana del 092919 al 100519 de 502 [mm], se tuvo una pérdida promedio de [MO] del 2% tal como se muestra en la siguiente gráfica, donde los valores a posteriori van desde el 5.5 %

hasta el 6.5%, y en comparación con las otras mediciones, se aprecia la pérdida, ver Figura 49.

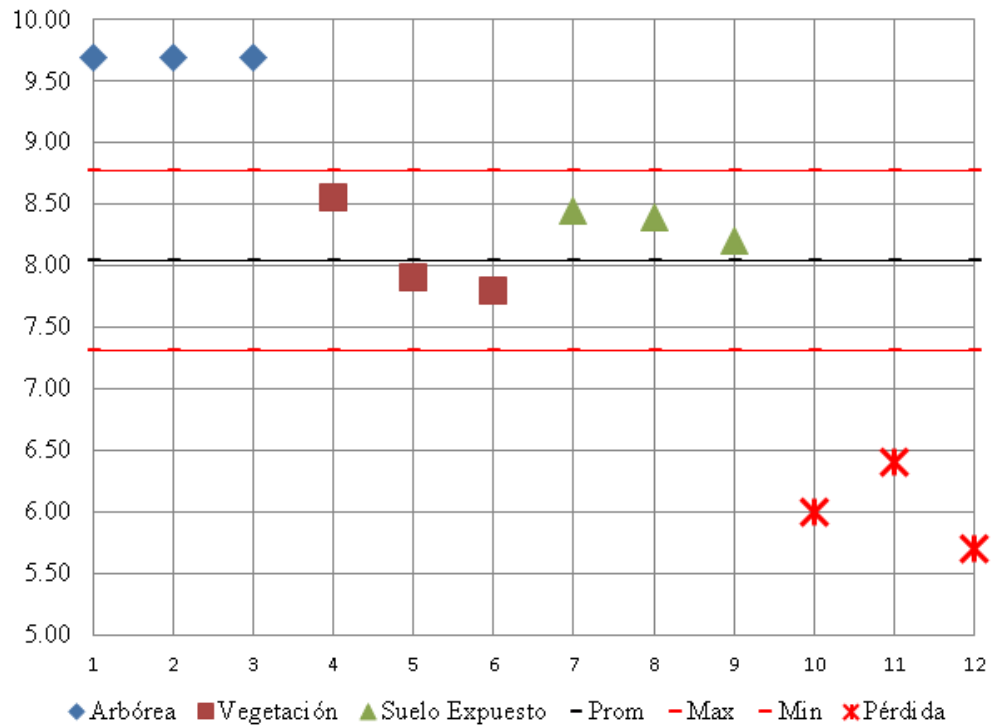


Figura 49. Pérdida de [MO] para el evento de lluvia de 502 [mm]

### 8.5. Eficiencia del método captación de sedimentos contra (R) USLE

(R) USLE se ofrece como una propuesta de carácter universal, lo cual es una posición errada, esto se debe a la ventaja en el análisis numérico que ofrece el método para estudiar grandes extensiones territoriales, sin embargo los resultados pueden ser muy errados si el publicador no ofrece el índice de error en el mapa de erosión hídrica que publica así como la fecha, es decir, su confiabilidad y pertinencia de los resultados. Por otro lado, el método propuesto, aunque muy artesanal, que se denominó captación de sedimentos, ofrece una alternativa práctica y de costo accesible para el pequeño propietario, lo cual lo vuelve una propuesta competente y con alta confiabilidad de los resultados, ya que solo se contabiliza lo que se tiene, es decir, lo que se capta, lo que lo vuelve un método más eficiente en comparación con (R) USLE.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1. Conclusiones

- (R) USLE sobre – estima los resultados, lo más conveniente medir sus variables de forma directa *in situ*.
- La cantidad de [MO] está en función del periodo estacional en que es medida debido la cantidad de vegetación que abunda según sea el caso y su pérdida por erosión.
- La distribución del valor de [R] se puede asumir constante para el área de 30 [ha] que aproximadamente mide “*Predio el Cortijo*”, este procedimiento fue adoptado por (Dabral. P. *et al.*, 2008) para cuencas hasta con un área de drenaje de 127,878 [ha].
- (R) USLE está universalizado sin embargo no lo es, cada caso es un caso de estudio y tiene sus particularidades.
- Captación de sedimentos solo mide lo que se colecta por lo que sus resultados guardan una baja incertidumbre lo que es un beneficio para el bienestar social.
- Captación de sedimentos es un excelente indicador para el semáforo de la degradación y el riesgo de la parcela.
- Los fenómenos naturales son muy impredecibles y se pueden comportar sin ningún patrón, es realmente complicado evaluar la naturaleza, por lo que en mi opinión, la mejor opción para pequeños propietarios con extensión territorial pequeña de sus parcelas y suelo similar es evaluar la erosión hídrica a través del método captación de sedimentos
- “*Predio el Cortijo*” no excede el LPE según la Tabla 3

### 9.2. Recomendaciones

- Si se coloca el sistema de captación de sedimentos, se recomienda lo recuperado por cada evento de lluvia, y preferente durante todo el año, de lo contrario los resultados serán inexactos.
- Mantener la vegetación nativa.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2008). United States of America: Determination of Organic Content in Soils by Loss on Ignition. AASHTO.
- Aguilera. S. (2000). *Importancia de la proteccion dela materia orgánica en suelos. Chile.*
- Alamilla. H. *et al.* (2005). Sanfandila, México.: Estimación de la incertidumbre en métodos de ensayos de construcción. SCT.
- Alemán. I. y Guido. F. (2015). *Comparación de dos Técnicas para la Determinación de Carbono Orgánico del Suelo. Departamento de Química. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.*
- Andrades. M. *et al.* (2015). Madrid, España.: Prácticas de Edafología. Métodos didácticos para análisis de suelos. Universidad de la Rioja.
- Andriulo. A. y Cordone. G. (1998). *Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos. En : Siembra directa.*
- Arnold. E. (1992). Londres.: World Atlas of Desertification. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA.
- Avanzi. J. *et al.* (2013). *Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and atlantic forest. Ciencias Agrote. Brasil.*
- Azcárate. P. *et al.* (2017). *Métodos de análisis e implementación de Calidad en Laboratorio de Suelos. Kloster Nanci. México.*
- Baver. H *et al.* (1980). Mexico.: Física de suelos.. Editorial ETEHA.
- Becerra. M. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Edición Universidad Autónoma de Chapingo.*
- Brooks. K *et al.* (1991). *Hydrology and the Management of Watersheds. Iowa State University.*
- BS. (2012). London, U.K.: BS 7843-3:012. British Standard International.
- Chappell. N. y Ternan. J. (1997). *Ring Permeametry: Design, Operation and Error Analysis. Earth Surface Processes and Landforms., 1197-1205.*
- CONABIO. (2001). *Mapa de Suelos, Edafología. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO.*



- Cortés. T. (1991). Montecillos, México.: Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados.
- Dabral. P. *et al.* (2008). *Soil erosion and sediment yield usign GIS at catchment scale. Water Resources Management. Amsterdam.*
- Deichmann. U y Eklundh. L. (1991). Global Digital Datasets for Land Degradation Studies: A GIS Approach. GRID, Global Resource Information Database. Grid Case Study Series No. 4. Global Environment Monitoring System, GEMS. United Nations Envorinment Programme.
- DEP. (2013). *Soil Permeability Testing for Earthen Secondary Containment Areas. New Jersey Department of Environmental Protection. Bureau of Release Prevention.*
- Duarte. T. y Jiménez. R. (2007). *Aproximación a la teoría del bienestar. Scientia et technica.*
- FAO. (1975). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO.*
- Gobierno Federal. (2019). México: Plan Nacional de Desarrollo, PND. Gobierno Federal.
- Goudie. A. (2008). *The history and nature of wind erosion in deserts. Annual Review of Earth and Planetary Sciences.*
- INEGI. (2011). Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/territorio/clima.aspx?tema=me&e=11>
- Juárez. B. y Rico. R. (2008). México. D.F.: *Mecánica de Suelo. Tomo I. Fundamentos de Mecánica de Suelos.* Editorial Limusa.
- Kemp. P *et al.* (2003). *Decomposition of leaf and root litter of Chihuahuan desert shrubs: effects of three years of summer drought. Journal of Arid Environments.*
- Kusky. T. (2009). *Climate Change. Shifting Glaciers, Deserts and Climate Belts. The hazardous Earth.*
- López. N. (2010). México, D.F.: *Incertidumbre en el Análisis de Flujo de Agua en Suelos.* Universidad Nacional Autónoma de México.
- Loredo. C *et al.* (2007). San Luis Potosí.: *Predicción de riesgo a la erosión hídrica a*

- nivel microcuencia. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP.
- Loredo. O. (1994). México: Efecto de la reforestación sobre el control de la erosión hídrica. Tesis de Maestría en Ciencias.
- Mastachi. C. (2007). Querétaro.: Intercepción de precipitación en dos especies de ambiente semidesértico: *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*. Tesis de Maestría; Universidad Autónoma de Querétaro.
- Matlock. H y Reese. L. (1960). *Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. Journal of the Soils Mecanics and Foundations Division.*
- Mojica. L *et al.* (2017). Chihuahua.: Diagnóstico de áreas degradadas y recursos forestales como alternativas para la diversificació productiva en la UMAFOR Semidesierto Norte. Comision Nacional Forestal, CONAFOR.
- Morgan. R. (1996). España.: Erosión y Conservación del Suelo. Mundi Prensa.
- Morgan. R. (2005). *Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University.*
- Nilsson. O. (1962). *Patente n° United States Patent Office 3229519.* Stockholm, Sweden.
- Ortiz. B y Ortiz. C. (1990). *Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo.*
- Pandey. A. *et al.* (2007). *Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and SR. Water Resources Management. Amsterdam.*
- Parra. M. *et al.* (1982). *Desarrollo histórico del concepto de región y su aplicación en México. Revista de Geografía Agrícola.*
- Pena. B. (2009). *La medición del bienestar social: una revision crítica. Estudios de Economía Aplicada.*
- PNUD. (2009). *El concepto de desarrollo humano. Informes sobre Desarrollo Humano.*
- Pongsai. S *et al.* (2010). *Calibration and validation of the modified universal soil loss equation for estimating sediment yield on sloping plots: A case study in Khun Satan catchment of nothern Thailand. Soil Sci.*
- Prieto. J. *et al.* (2014). *Spatial variability of organic matter in soil dedicated to growing malting barley. Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia.*

- RAE. (19 de 11 de 2019). Recuperado el 19 de 11 de 2019, de Real Academia Española.  
[https://dle.rae.es/bienestar?m=30\\_2](https://dle.rae.es/bienestar?m=30_2).
- Renard. K *et al.* (1997). *Predicting Soil Erosion by Water, a Guide for Conservation Planning with de Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE*. Agriculture Handbook 703.
- Reynolds. J y Stafford. S. (2002). *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?*. Dahlem University Press, Berlin.
- Rosell, R. (1999). *Materia Orgánica, fertilidad del suelo y productividad de cultivos*. Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo. Chile.
- SAGARPA. (2008). México.: Evaluación de Diseño del Programa de Uso Sustentable de Recursos Naturales para la Producción Primaria. Secretaría de agricultura ganadería desarrollo rural pesca y alimentación, SAGARPA.
- SARH. (1977). Manual de Conservación del Suelo y Agua. Instructivo. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH.
- SCT. (2003). México, D.F.: M-MMP-1-06.Métodos de muestreo y prueba de materiales. Granulometría de materiales. SCT.
- SEMARNAT. (2007). México.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT.
- Singh. M. and Khera. K. (2010). *Evaluation and estimation of soil erodibility by different techniques and their relationships*. Department of soils. World Congress of Soil Science. Australia.
- Sparling. G. *et al.* (2006). *What is soil organic matter worth? Jornal Environmental Quality*.
- Suprema Corte de Justicia de la Nación. (19 de 11 de 2019). Recuperado el 19 de 11 de 2019, de Diccionario Jurídico Mexicano.  
<https://mexico.leyderecho.org/bienestar-social/>.
- Torres. E. (1984). México.: Manual de conservación de suelos agrícolas. DIANA.
- Trossero. M. *et al.* (2012). *¿Cuánto vale la pérdida de carbono orgánico del suelo?. Para mejorar la producción*. INTA E EA OLIVEROS.
- U.S. Government. (1996). *Saturated Hydraulic Conductivity Saturated Leachate*

*Conductivity, and Intrinsic Premeability.*

- UMASS LOWELL. (2015). United States of America.: Soil Classification Basics.  
UMASS LOWELL.
- UNI. (2012). Italia: UNI 11452:2012. Uniente Italiano di Normazione.
- UNSO. (1997). *Assessment of population levels in the world's drylands. Office to combat desertification and drought. Aridity Zones and Dryland Populations.*
- Verón. S *et al.* (2006). *Assessing desertification. Journal of Arid Environments.*
- Wischmeier. W y Smith. D. (1965). *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. USDA Agr. Handbook 282.*
- Wischmeier. W y Smith. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses-a Guide to Conservation Planning-USDA. Agriculture Handbook 537. Sci. and Educ. Admin. USDA.*
- WMO. (2014). London, U.K.: Measurement of meteorological variables. World Meteorological Organization.
- WMO. (2016). London, U.K.: Instruments and Observing Methods. Report #84. World Meteorological Organization.
- WMO. (2017). London, U.K.: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: (CIMO guidelines). World Meteorological Organization/CIMO.
- Zuñiga. E. (1992). *Políticas sociales y administración del bienestar en México. Publicación del Centro Latinoamericano de Trabajo y de la Asociación Latinoamericana de Escuelas de Trabajo Social.*

## SIMBOLOGÍA

- a- Área de sección transversal [cm<sup>2</sup>]
- A - Erosión hídrica [Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>]
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials
- ArcGIS - Software de sistemas de información geográfica
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- BS - Estándar británico
- BS1kw - Desértico frío
- CONABIO - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- CONAFOR - Comisión Nacional Forestal
- CONAGUA - Comisión Nacional del Agua
- C - Manejo y uso del suelo o cobertura vegetal en unidades [Adimensional]
- cl - Clima
- COS - Carbono orgánico del suelo
- D - Diámetro de las partículas del suelo
- DEM - Archivos de Elevación Digital
- DEP - Department of Environmental Protection
- e\_rel - Error relativo
- e\_prom - Error promedio
- Ec - Energía cinética de la lluvia [MJ ha<sup>-1</sup>]
- EUPS - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
- F - Índice de acumulación de flujo superficial a lo largo de la pendiente [Adimensional]
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations
- GEOTIFF - Formato de imagen con valores radiométricos
- gr - Gramos
- h - Hora
- H - Promedio de la pérdida de flujo [cm]
- ha - Hectárea
- i - Cantidad de eventos
- iA - Huecos en el suelo

I - Gradiente hidráulico  
I30 - Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia [mm h-1]  
I\_obs - Intensidad de lluvia observada  
I\_ref - Intensidad de la lluvia referida  
IDH - Índice de Desarrollo Humano  
IDW - Inverse Squared Distance Weigth  
INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía  
k - Coeficiente de permeabilidad  
K - Erosionabilidad del suelo en unidades [Mg ha-1 MJ-1 ha mm-1 h]  
Kh - Conductividad hidráulica [cm h-1]  
l - Longitud del "Anillo permeámetro" [cm]  
L - Longitud de la pendiente [Adimensional]  
Landsat8 - Satélite con resolución espacial a 30 [m]  
LOI - Pérdida de peso por ignición o calcinación [gr]  
LPE- Límites permisibles de erosión [Mg ha-1 año-1]  
LS -Longitud y grado de pendiente en unidades [Adimensionales]  
m - Metros  
min - Mínimo  
ms - Milisegundos  
MAP - Precipitación media anual acumulada  
mp - Material parental  
MO - Materia Orgánica  
M\_ret - Masa retenida  
M\_total - Masa total  
MUFLA - Horno eléctrico [°C]  
 $\eta$  - Viscosidad del agua  
N - Norte  
NOM - Normas Oficiales Mexicanas  
NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [Adimensional]  
P - Prácticas de conservación del suelo [Adimensional]  
P\_c - Precipitación corregida [mm]

P<sub>e</sub> - Término de corrección para la precipitación por el error de la evaporación  
P<sub>g</sub> - Precipitación observada [mm]  
P<sub>m</sub> - Término de corrección para la precipitación por el error mecánico  
 $\rho_s$  - Densidad de las partículas [gr cm<sup>-3</sup>]  
P<sub>w</sub> - Término de corrección para la precipitación por el error de la humedad  
 $\rho_w$  - Densidad del agua [gr cm<sup>-3</sup>]  
pm - Potencia de la pendiente  
PND - Plan Nacional de Desarrollo  
PNUD - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo  
q<sub>k</sub> - Valores individuales de permeabilidad  
 $\bar{q}$  - Valor medio de la permeabilidad  
Q - Caudal de agua [cm<sup>3</sup>]  
R - EI30 - Erosividad de la lluvia en unidades [MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>]  
r - Relieve  
(R) USLE - Revised Universal Soil Loss Equation  
RAE - Diccionario de la Real Academia Española  
o - Biósfera  
q - Tasa de descarga a través del suelo en un área [cm<sup>3</sup>]  
s - Segundos  
S- Grado de la pendiente [Adimensional]  
SAGARPA - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación  
SAR - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos  
SCT - Secretaría de Comunicaciones y Transportes  
SEMARNAT - Secretaría del medio ambiente y recursos naturales  
SIG - Sistemas de información geográfica  
SR - Sensores Remotos  
SRTM - Satélite con resolución espacial a 30[m]  
SUCS - Sistem Unificado de Clasificación de Suelos  
t - Tiempo [s]  
UACH - Universidad Autónoma de Chapingo

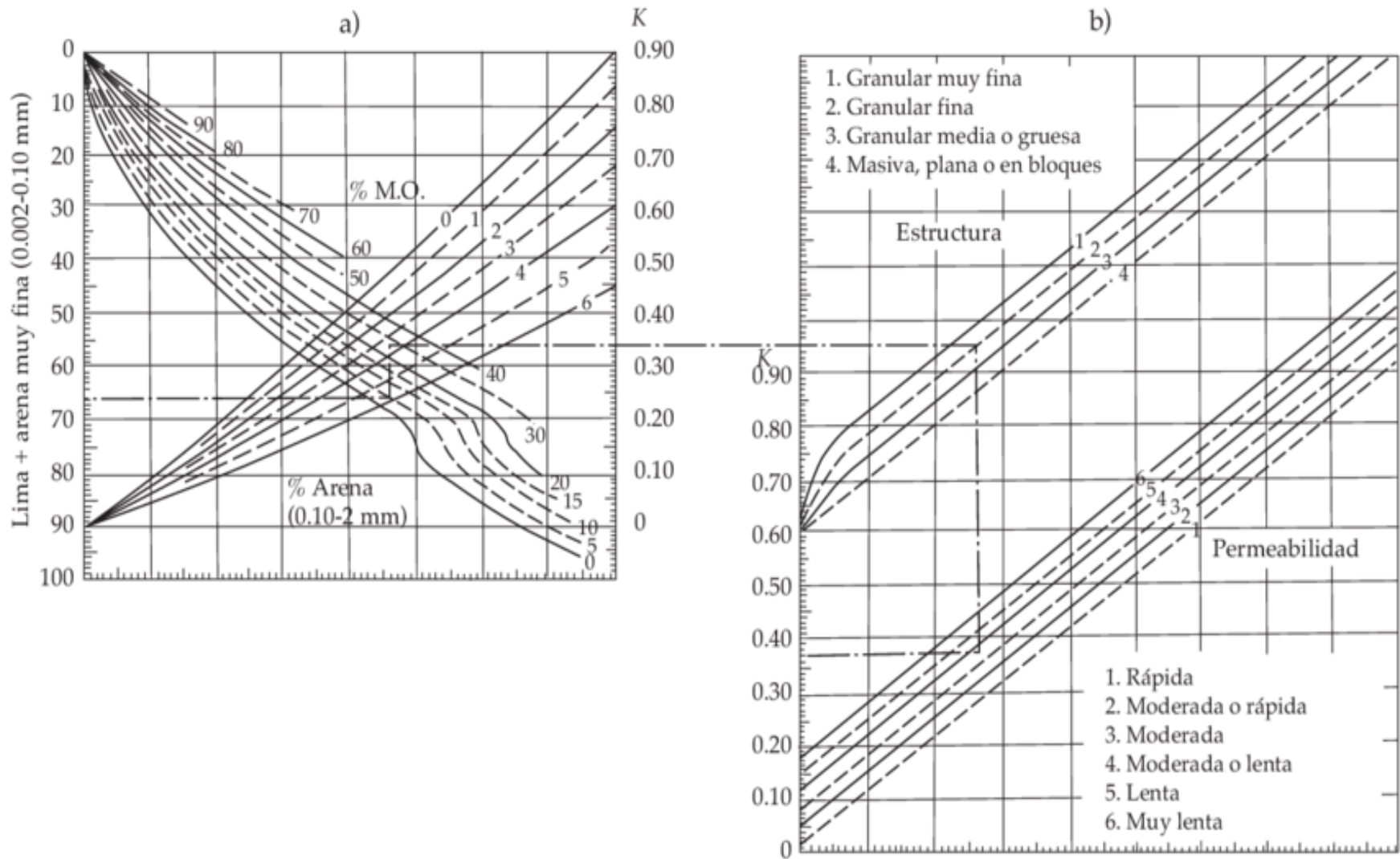
UNI - Ente nacional italiano de unificación  
USCS - Unified Soil Classification System  
UNSO - United nations statistical office  
USDA - Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos  
 $v$  - Coeficiente de deformación por el viento  
 $V$  - Velocidad  
vessel - Cilindro captador  
 $W$  - Oeste  
WMO - World Meteorological Organization  
 $x$  - Lluvia [mm]  
% - Porcentaje  
 $\lambda$  - Pendiente calculada [°]  
 $\beta$  - Grado de la pendiente  
 $\Delta$  - Delta  
 $\Delta h$  - Diferencia de cargas [mm]  
 $\Upsilon$  - Precipitación líquida [mm]  
 $\delta$  - Precipitación sólida [mm]  
° - Grados  
°C - Grados Celsius  
 $\varnothing$  - Diámetros



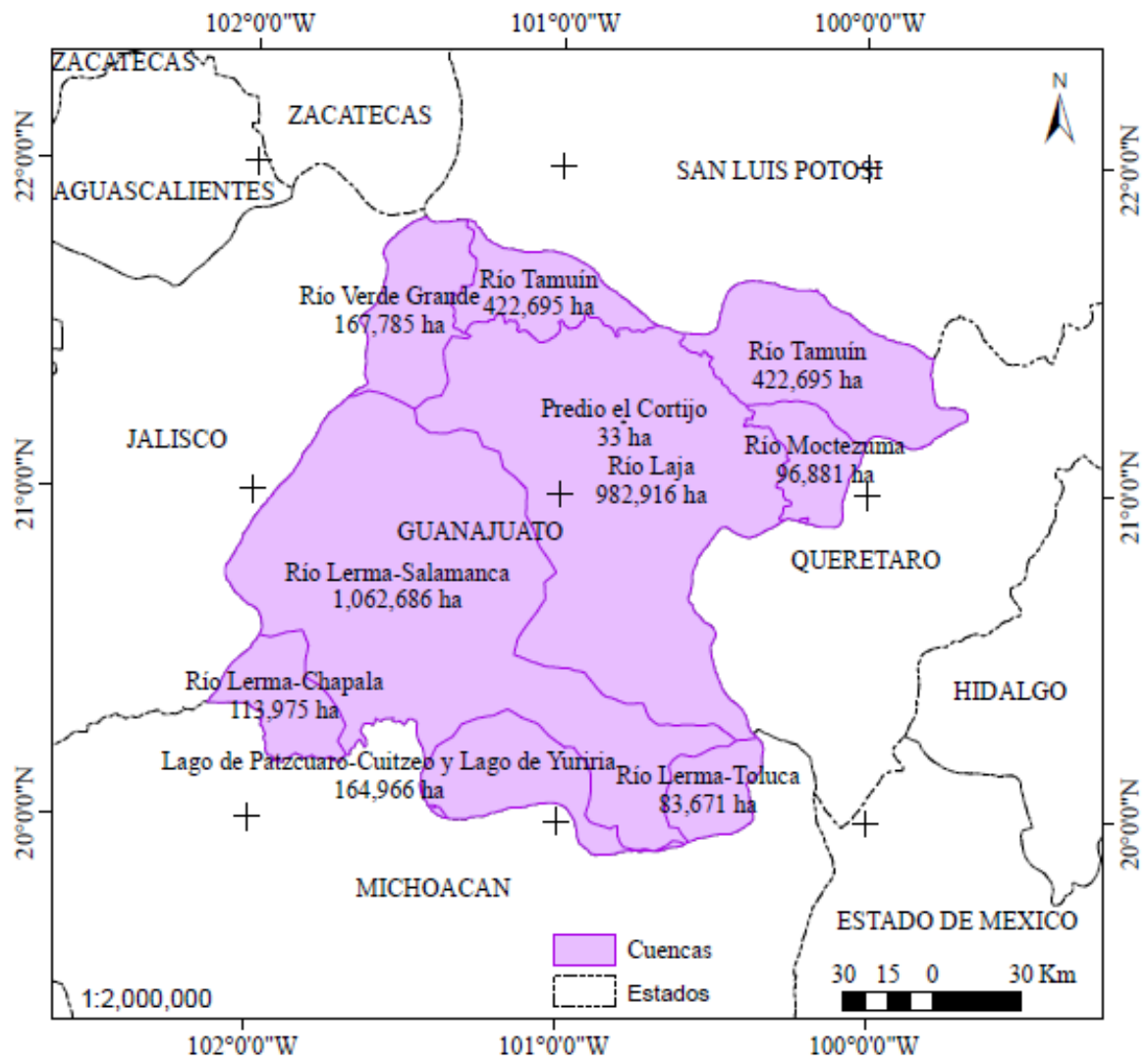
## ANEXOS



Anexo 1. Mapa para la distribución espacial de la instrumentación (7 pluviómetros totalizadores, 3 pluviómetros automáticos)



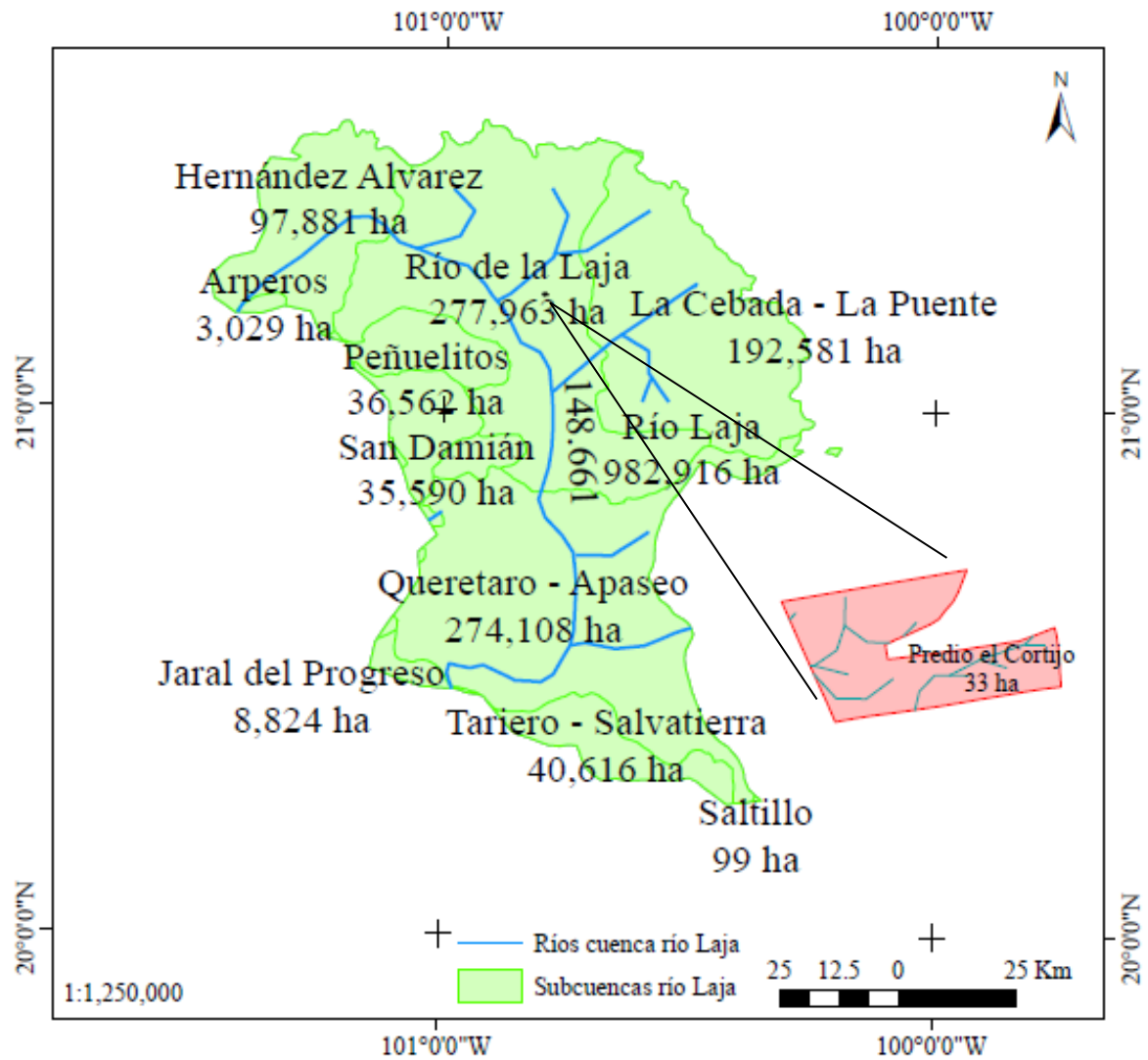
Anexo 2. Nomograma [K] (Wischmeier. W y Smith. D., 1978)



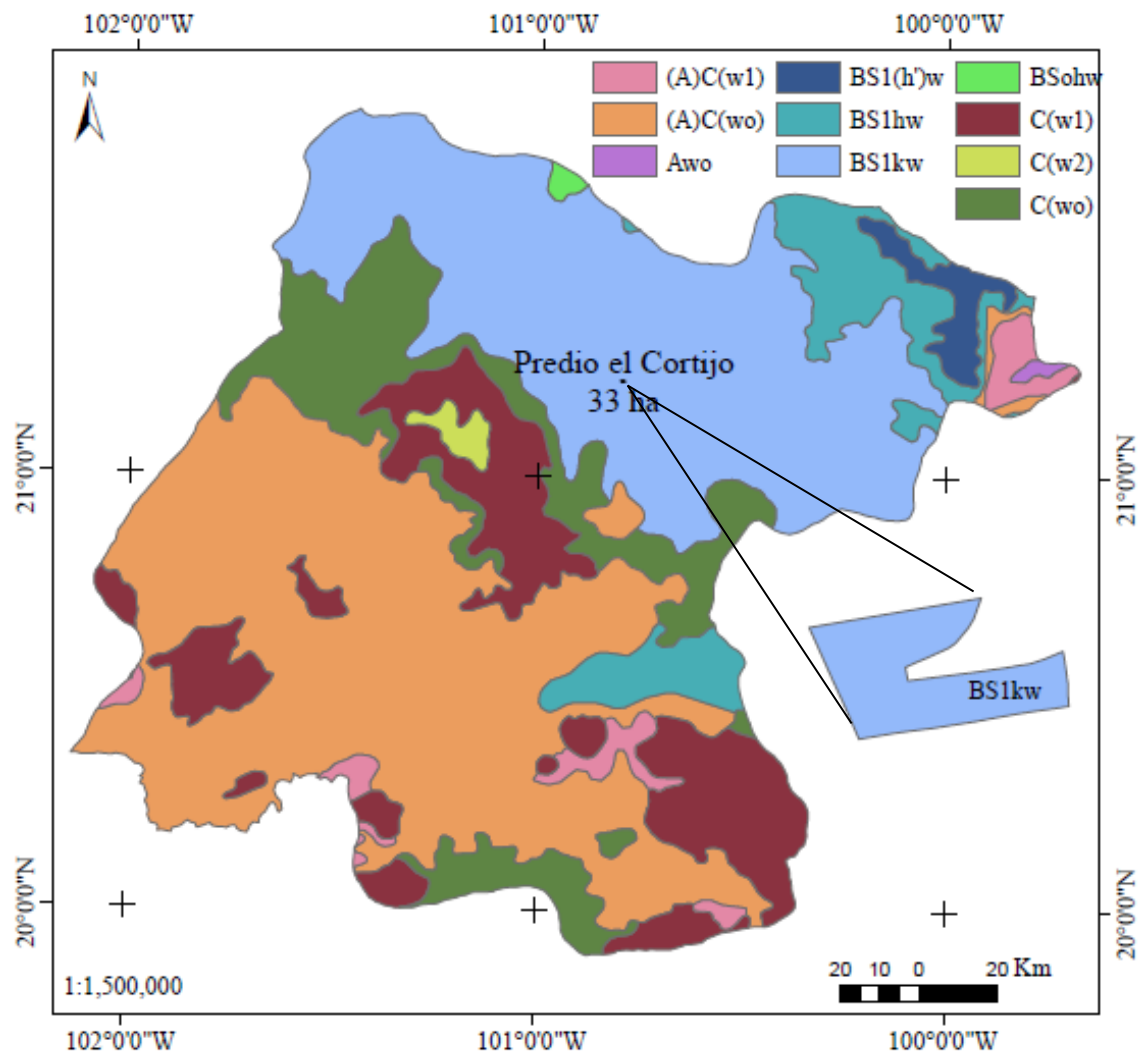
Anexo 3.a. Cuencas del estado de Guanajuato



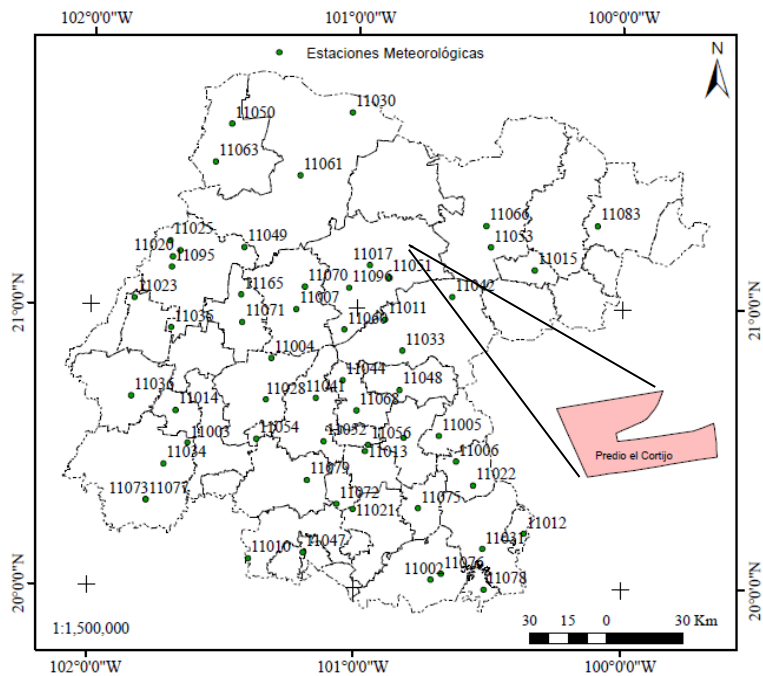
Anexo 3.b. Regiones y ríos del estado de Guanajuato



Anexo 3.c. Subcuencas y cauce natural del estado de Guanajuato

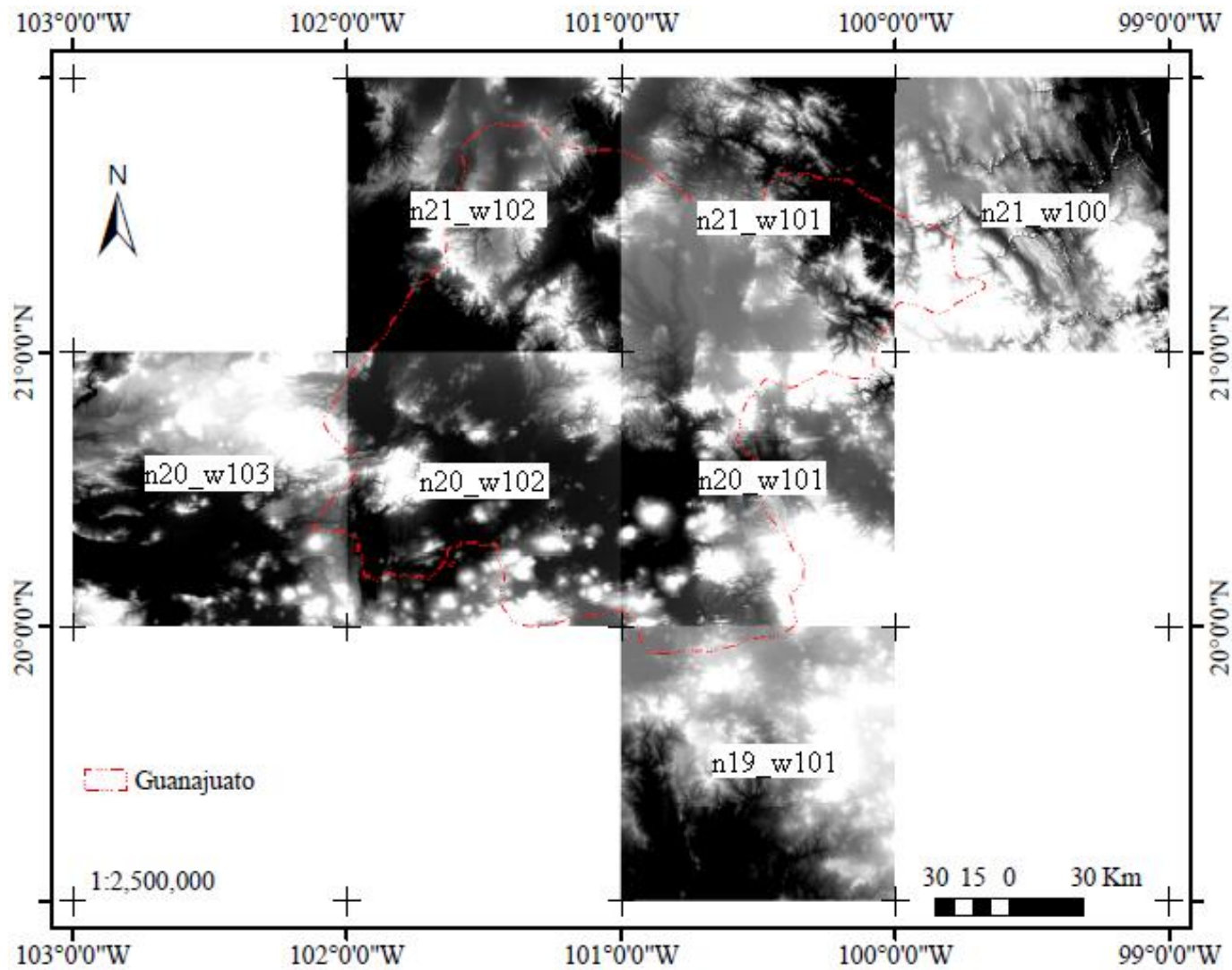


ANEXO 3.d. Climas según Köppen–Geiger del estado de Guanajuato



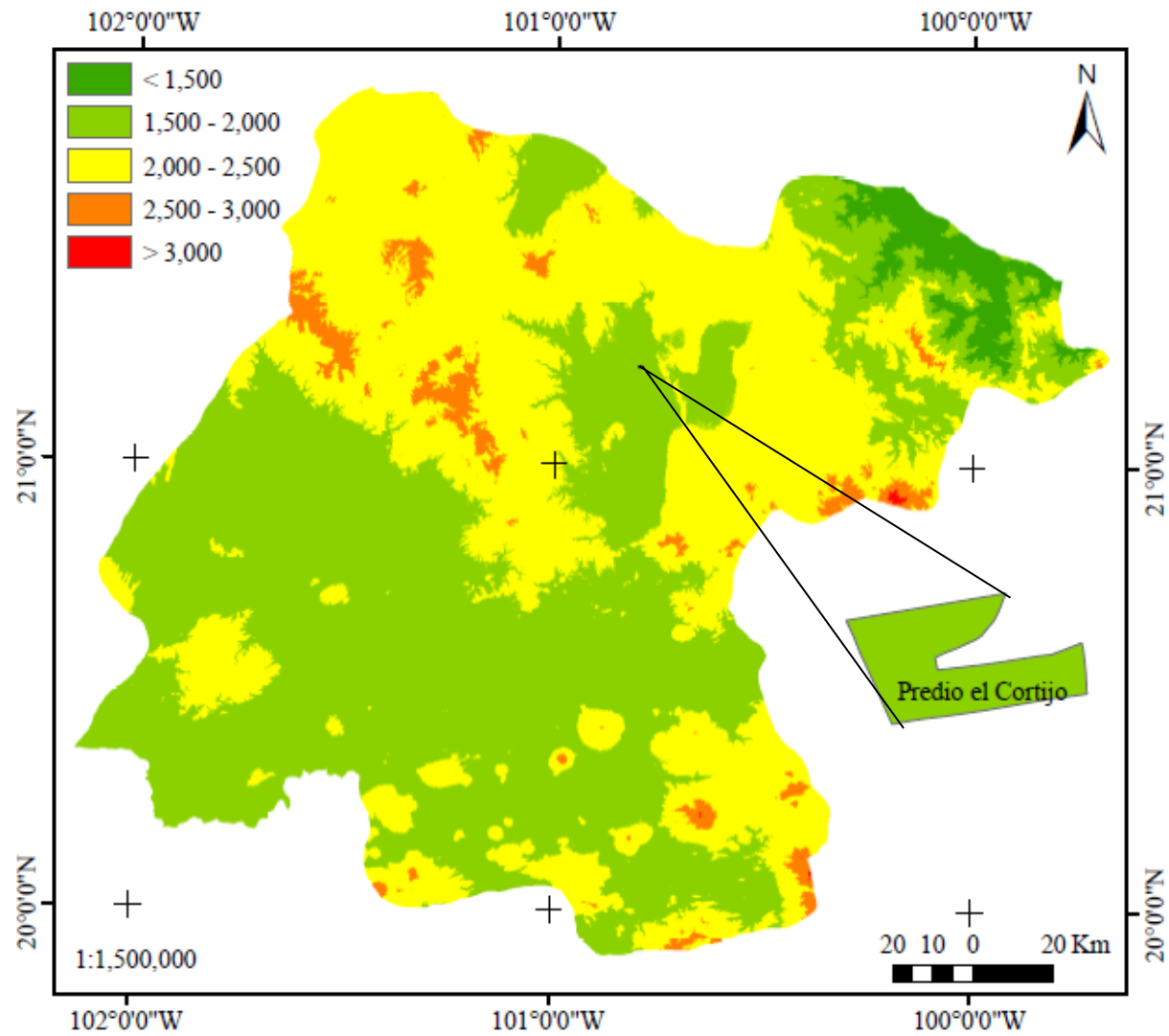
Name	Estación	MeanAnnual	Name	Estación	MeanAnnual
11002	ACAMBARO, ACAMBARO	755.57	11044	MANDUJANO, SANTA CRUZ DE	505.52
11003	AGUA TIBIA, PENJAMO	657.80	11047	MOROLEON, MOROLEON	589.02
11004	ALDAMA, IRAPUATO	437.71	11048	NEUTLA, COMONFORT	579.41
11005	APASEO, APASEO EL GRANDE	627.69	11049	NUEVO VALLE MORENO, LEON	657.84
11006	APASEO EL ALTO, APASEO E	607.05	11050	OCAMPO, OCAMPO	403.30
11007	CALDERONES, GUANAJUATO	749.89	11051	PEQUELITAS, DOLORES HIDA	517.35
11009	CELAYA (SMN), CELAYA	617.23	11052	PERICOS, SALAMANCA	628.30
11010	CERANO, YURIRIA	651.44	11053	POZOS, SAN LUIS DE LA PA	440.33
11011	CINCO SEÑORES, SAN MIGUE	628.63	11054	PUEBLO NUEVO, PUEBLO NUE	469.15
11012	CORONEO, CORONEO	598.93	11056	PLANTA RAMOS MILLAN, COR	536.08
11013	CORTAZAR, CORTAZAR	613.77	11060	SALVATIERRA, SALVATIERRA	669.26
11014	CUERAMARO, CUERAMARO	625.54	11061	SAN ANTON, DOLORES HIDAL	502.03
11015	CHARCAS, DOCTOR MORA	402.67	11063	SAN CRISTOBAL, DOLORES H	474.01
11017	DOLORES HIDALGO (SMN), D	416.34	11066	SAN JOSE ITURBIDE (SMN),	494.92
11020	EL PALOTE, LEON	613.57	11068	SAN LUIS DE LA PAZ, SAN	333.57
11021	EL SABINO, SALVATIERRA	619.50	11070	SANTA JULIA, CORTAZAR	650.56
11022	EL TERRERO, APASEO EL AL	665.78	11071	SANTA MARIA (DGE), YURIR	664.07
11023	GUANAJAL, SAN FRANCISCO	603.96	11072	SANTA RITA, JARAL DEL PR	704.31
11025	HACIENDA DE ARRIBA, LEON	699.19	11073	SANTA ROSA MINERAL, GUAN	612.82
11028	IRAPUATO, IRAPUATO	644.37	11075	SOLEDAD NUEVA, DOLORES H	365.96
11030	JARAL DE BERRIOS, SAN FE	250.86	11076	PRESA SOLIS, ACAMBARO	667.57
11031	JERECUARIO, JERECUARIO	755.50	11077	TARANDACUAO, TARANDACUAO	742.31
11033	LA BEGOÑA, SAN MIGUEL DE	598.87	11078	TARIMORO, TARIMORO	701.60
11034	LA GOLONDRINA, PENJAMO	653.71	11079	VALLE DE SANTIAGO, VALLE	649.69
11035	LA SANDIA, LEON	600.39	11083	XICHU, XICHU	555.67
11036	ADJUNTAS, MANUEL DOBLADO	716.39	11095	LEON (DGE), LEON	692.98
11040	LOS CASTILLOS, LEON	677.85	11096	SALAMANCA, SALAMANCA	674.79
11041	LOS RAZOS, SALAMANCA	619.91	11165	CHICHIMEQUILLAS, SILAO	578.89
11042	LOS RODRIGUEZ, SAN MIGUE	470.32			

ANEXO 3.e. Estaciones meteorológicas CONAGUA del estado de Guanajuato

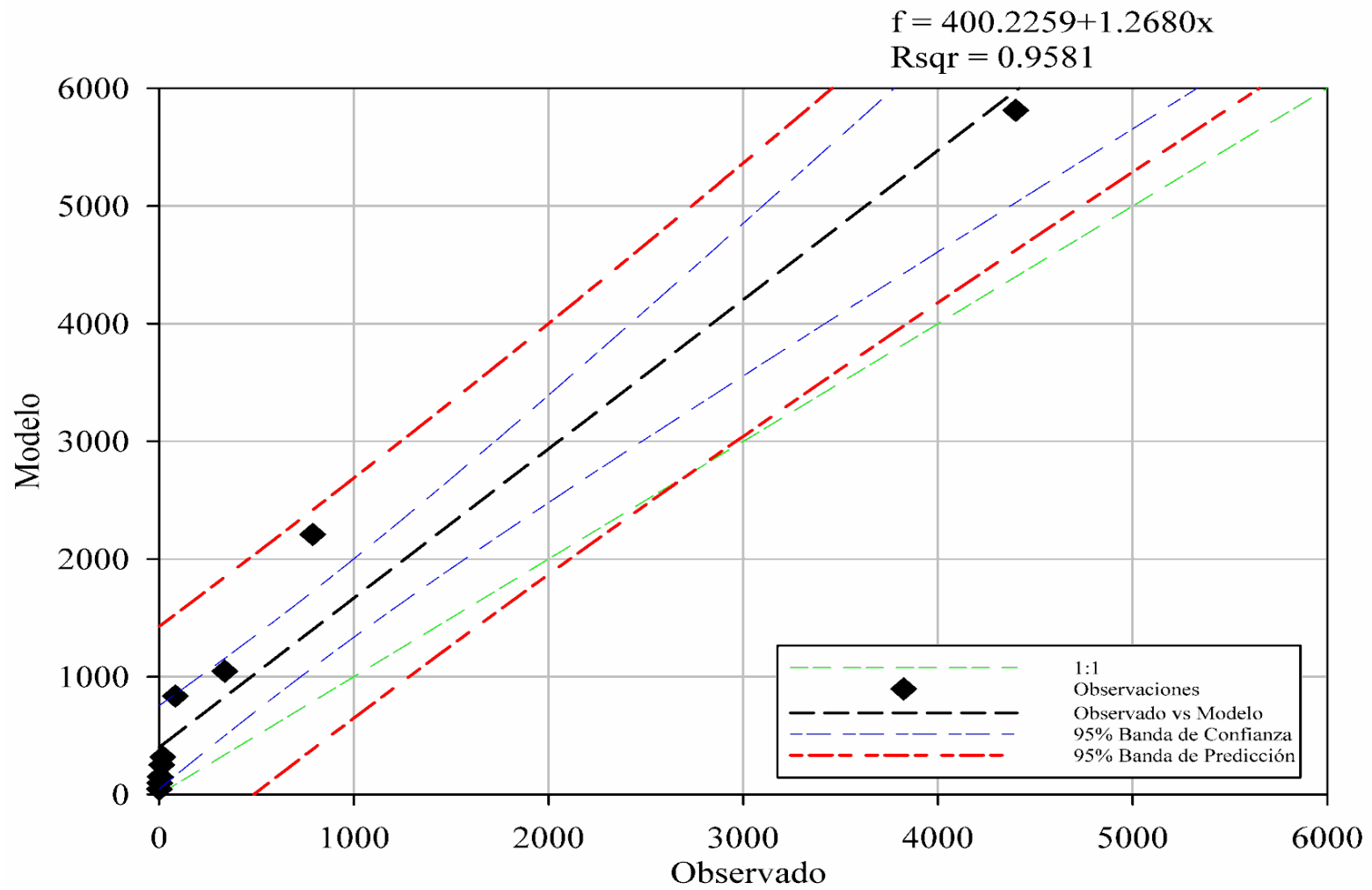


ANEXO 3.f. 7 [DEM] Satélite [SRTM] para el mosaico del estado de Guanajuato





ANEXO 3.g. Mapa de altitud del estado de Guanajuato [msnm]



ANEXO 4. Modelo corregido erosión hídrica observada contra pronosticada