



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SANTIAGO
TULANTEPEC A TRAVÉS DE LA EUPSR INTEGRADA A SIG**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Francisco Daniel Vera Ramírez

Director

Dr. Juan Capulin Grande

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. Mayo de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SANTIAGO
TULANTEPEC A TRAVÉS DE LA EUPSR INTEGRADA A SIG**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Francisco Daniel Vera Ramírez

Director

Dr. Juan Capulin Grande

Asesores

Dr. Ramón Razo Zarate

M. en C. Naum Abraham Fragoso López

Dr. Alfonso Suárez Islas

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. Mayo de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/004/2023

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado al alumno **Francisco Daniel Vera Ramírez**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **243259**, que presenta el manuscrito de tesis titulado "**Estimación de la erosión hídrica de Santiago Tulantepec a través de la EUPSR integrada a SIG**", ha autorizado la impresión del mismo.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

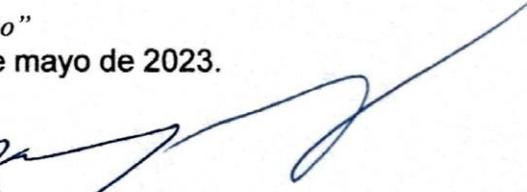
ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. a 05 de mayo de 2023.


Dra. Eliazar Aquino Torres
Coordinadora de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable

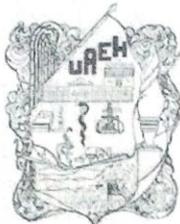



Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: **"Estimación de la erosión hídrica de Santiago Tulantepec a través de la EUPSR integrada a SIG"**, que desarrolla el estudiante **Francisco Daniel Vera Ramírez**

Asistentes:

Dr. Juan Capulin Grande

Dr. Ramón Razo Zarate

M. en C. Naum Abraham Fragoso López

Dr. Alfonso Suárez Islas

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por **Francisco Daniel Vera Ramírez**, comunicando al estudiante, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 05 de mayo de 2023

Dr. Juan Capulin Grande

Dr. Ramón Razo Zarate

M. en C. Naum Abraham Fragoso López

Dr. Alfonso Suárez Islas

“Que se eduque a los hijos del labrador y del barrendero
como a los del más rico hacendado”

~ José María Morelos y Pavón ~

“La paz no es solamente la ausencia de la guerra; mientras haya pobreza,
racismo, discriminación y exclusión difícilmente podremos alcanzar un
mundo de paz”

~ Rigoberta Menchú Tum ~

DEDICATORIA

A mi Dios, por esta vida que me ha regalado, por la oportunidad de seguir adelante y por darme fortaleza para no rendirme ante cada una de las adversidades que he tenido, enseñándome de esta manera el camino correcto de la vida.

A mis padres, Adela y José, por haberme dado la vida, por el apoyo que siempre me han brindado, su confianza, su gran amor incondicional e irremplazable, y sobre todo, por haberme formado y educado para llegar a ser la persona que ahora soy.
LOS AMO DEMASIADO

A mi hermano, Damián, con quien me toca compartir la vida. Y a mi hermano Toño † quien me enseñó a ser ese ejemplo querido de la vida. A los dos, por ser los mejores seres humanos con quienes me tocó compartir la misma sangre y los grandes momentos de una hermandad. PARA TI HERMANO, HASTA EL CIELO †

AGRADECIMIENTOS

*Al **Dr. Juan Capulin Grande**, por darme el honor y la oportunidad de trabajar con él, guiarme en cada paso dado durante mi formación como Maestro en Ciencias, por su paciencia, apoyo y amistad. Además, ser un ejemplo excepcional de profesor, pero sobre todo, de ser humano, y sin dejar atrás cada una de sus palabras sabias y consejos dados en aquellas charlas compartidas. GRACIAS INFINITAS PARA SU GRAN PERSONA*

*Al **Dr. Ramón Razo Zarate**, al **M. en C. Naum Abraham Fragoso López** y al **Dr. Alfonso Suárez Islas**, por formar parte de mi comité tutorial y ser un gran respaldo para la elaboración de este trabajo de tesis, por cada una de sus recomendaciones, revisiones y ayuda para el acceso a información que permitió la mejora de cada aspecto de esta investigación. GRACIAS POR SU APOYO*

*A **Mariflor Ríos Hernández**, una gran persona que llegó a mi vida para alegrar mis días, regalarme grandes momentos, ser esa persona que me alentaba cada día para realizar esta investigación y, sobre todo, por acompañarme en los recorridos para la toma de muestras y por aquellas patoaventuras inolvidables tenidas durante los mismos. GRACIAS ESPECIALES PARA TI*

*Por supuesto, no puedo olvidar a mis compañeros de generación **Ale, Erick y José**, excelentes personas que, a pesar de no convivir con ellos en gran instancia a causa de una pandemia, los logré conocer a través de una pantalla y a tratar ocasionalmente de manera personal. NO DEJEN DE SER MEJORES HUMANOS EN SU DÍA A DÍA*

*A todos y a cada uno de mis **familiares** y **amigos** que me alientan a ser cada día mejor. LOS QUIERO DEMASIADO*

*Finalmente, al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de este trabajo de investigación a través de la beca asignada para la realización de mis estudios de posgrado.*

ÍNDICE

Índice	I
Abreviaturas	IV
Índice de tablas	1
Índice de figuras	2
Resumen	5
Abstract	6
1. Introducción	7
2. Marco teórico	9
2.1 Suelo	9
2.2 Factores de formación del suelo	10
2.3 Funciones del suelo.....	11
2.4 Componentes del suelo.....	13
2.5 Importancia del recurso suelo	13
2.6 Clasificación de los suelos	14
2.7 Degradación de los suelos	15
2.8 Erosión	16
2.9 Modelos de erosión	17
2.9.1 Métodos cuantitativos	18
2.9.2 Métodos cualitativos	23
2.10 Modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada	24
2.11 Los SIG en el aspecto ambiental.....	25
2.12 Obras y prácticas de conservación de suelos	26
3. Antecedentes	31

3.1	Evaluación de la erosión hídrica en el mundo	31
3.2	Evaluación de la erosión hídrica en México	33
4.	Justificación	36
5.	Objetivos	37
5.1	Objetivo general	37
5.2	Objetivos específicos.....	37
6.	Planteamiento del problema	38
7.	Hipótesis	39
8.	Materiales y métodos	40
8.1	Caracterización del área de estudio	40
8.1.1	Localización	40
8.1.2	Fisiografía	41
8.1.3	Hidrografía	41
8.1.4	Clima.....	41
8.1.5	Uso de suelo y vegetación	41
8.1.6	Edafología.....	42
8.2	Metodología para el cálculo de la erosión hídrica actual	44
8.2.1	Factor de erosividad de la lluvia-escorrentía (Factor R)	45
8.2.2	Factor de erodabilidad del suelo (Factor K)	48
8.2.3	Factor de longitud y grado de la pendiente (Factor LS)	52
8.2.4	Factor de cobertura vegetal (Factor C)	54
8.2.5	Factor de prácticas de conservación/manejo (Factor P)	55
8.2.6	Cálculo final de la erosión hídrica actual.....	56
8.3	Metodología para el cálculo de la erosión hídrica potencial	56
8.4	Metodología para proponer obras y prácticas de conservación de suelos ..	59

9. Resultados y Discusión.....	60
9.1 Factor R.....	60
9.2 Factor K.....	62
9.3 Factor LS.....	64
9.4 Factor C.....	69
9.5 Factor P.....	74
9.6 Erosión hídrica actual.....	76
9.7 Propuesta de obras y prácticas para el área de estudio.....	78
9.8 Erosión hídrica potencial.....	81
10. Conclusión.....	83
11. Consideraciones y Recomendaciones.....	84
12. Literatura citada.....	85
Anexos.....	94
Anexo 1.....	94
Anexo 2.....	97
Anexo 3.....	104
Anexo 4.....	110
Anexo 5.....	111
Anexo 6.....	112
Anexo 7.....	112

ABREVIATURAS

AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution (Contaminación Agrícola de Fuentes No Puntuales)
ANSWERS	Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation (Simulación de Respuesta Ambiental de Cuencas Hidrográficas de Fuentes no puntuales de Área)
CAP	Conocimientos, Actitudes y Prácticas
CP	Colegio de Postgraduados
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (Sustancias Químicas, Esguerrimiento y Erosión por Sistemas de Manejo Agrícola)
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator (Calculador de Impacto Erosión-Productividad)
EUPS	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
EUPSR/RUSLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada / Revised Universal Soil Loss Equation
EUROSEM	European Soil Erosion Model (Modelo Europeo de Erosión del Suelo)
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
HSPF	Hydrologic Simulation Program FORTRAN (Programa de Simulación Hidrológica FORTRAN)
IHACRES	Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data (Identificación de Hidrogramas unitarios y flujos de Componentes a partir de datos de Lluvia, Evaporación y Caudal)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IQQM	Integrated Water Quantity and Quality Model (Modelo Integrado de Cantidad y Calidad de agua)

KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model (Modelo Cinemático de Escorrentía y Erosión)
LISEM	Limburg Soil Erosion Model (Modelo de Erosión del Suelo de Limburgo)
Mg	Megagramos
MMF	Modified Morgan Morgan and Finney (Modelo Modificado Morgan Morgan y Finney)
PERFECT	Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques (Funciones de Productividad, Erosión y Escorrentía para Evaluar Técnicas de Conservación)
PESERA	PAN-European Soil Erosion Risk Assessment (Modelo Paneuropeo de Evaluación del Riesgo de Erosión del Suelo)
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMMED	Soil Erosion Model for Mediterranean Regions (Modelo de Erosión del Suelo para Regiones Mediterráneas)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SSSA	Soil Science Society of America (Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool (Herramienta de Evaluación de Suelo y Aguas)
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins (Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales)
USDA	United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)
USPED	Unit Stream Power Based Erosion Deposition (Modelo de Deposición de Erosión Basado en Energía de Flujo Unitario)
WEPP	Water Erosion Prediction Project (Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica)
WRB	World Reference Base for Soil Resources (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de erosión y transporte de sedimentos.	20
Tabla 2. Uso de suelo y vegetación de Santiago Tulantepec.....	42
Tabla 3. Unidades de suelo de Santiago Tulantepec.	43
Tabla 4. Ecuaciones regionales para la República Mexicana (Cortés, 1991).....	45
Tabla 5. Precipitación media anual registrada en las estaciones meteorológicas con influencia en Santiago Tulantepec para el periodo 1951 – 2010.....	47
Tabla 6. Clasificación de la erosividad de la lluvia para el valor de R según Rivera & Gómez (1991).....	48
Tabla 7. Características de clasificación de textura (Castellanos-Ramos, 2000).	49
Tabla 8. Valores del factor K en función de su unidad y subunidad de suelo y su clase textural superficial (FAO,1980).....	49
Tabla 9. Valores del factor P para las diferentes prácticas.....	55
Tabla 10. Clases de riesgo a la erosión hídrica actual según la FAO.	56
Tabla 11. Categorías de clasificación de la erosión hídrica potencial	58
Tabla 12. Tabla de porcentajes de área para cada rango de pendiente en Santiago Tpec.	66
Tabla 13. Tabla de porcentajes de área respecto a rangos del valor de LS.....	67
Tabla 14. Concentrado de usos de suelo y vegetación en Santiago Tulantepec para 2021.	69
Tabla 15. Valores asignados a la vegetación existente para el factor C según diferentes bibliografías.	71
Tabla 16. Valores del factor P para surcado al contorno y su superficie ocupada en el municipio.	74
Tabla 17. Clasificación de la erosión hídrica actual según los niveles de riesgo propuestos por la FAO (1980) y su superficie ocupada dentro del municipio.....	76
Tabla 18. Tabla de clases de erosión hídrica potencial dentro del municipio, expresada en superficie y porcentaje ocupado.	82
Tabla 19. Valores obtenidos durante la aplicación del método de Bouyoucos para cada sitio de muestreo.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Polígono de Santiago Tulantepec.....	40
Figura 2. Mapa de uso de suelo y vegetación de Santiago Tpec.	42
Figura 3. Distribución de las unidades de suelo en Santiago Tulantepec.	43
Figura 4. Regiones de México para el factor R (Cortés, 1991) en Montes-León <i>et al.</i> (2011).....	46
Figura 5. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas con influencia de precipitación en Santiago Tpec.	47
Figura 6. Mapa de distribución del factor R en Santiago Tulantepec	61
Figura 7. Mapa de distribución del Factor K para el municipio de Santiago Tpec. ...	63
Figura 8. Mapa de distribución de altitudes del municipio de Santiago Tpec.	64
Figura 9. Mapa distribución de pendientes en porcentaje del municipio de Santiago Tpec.	65
Figura 10. Mapa de distribución del factor LS para el municipio de Santiago Tpec.	67
Figura 11. Mapa de uso de suelo y vegetación de Santiago Tulantepec actualizado para el año 2021.....	70
Figura 12. Mapa de distribución del factor C en Santiago Tulantepec.	73
Figura 13. Mapa de distribución del factor P en Santiago Tulantepec.....	75
Figura 14. Mapa de distribución de la erosión hídrica actual para Santiago Tulantepec.	77
Figura 15. Mapa de distribución de la erosión hídrica potencial en Santiago Tpec. .	82
Figura 16. Localización de la herramienta <i>Select</i>	94
Figura 17. Configuración de herramienta <i>Select</i>	94
Figura 18. Polígono de Santiago Tulantepec.....	94
Figura 19. Herramienta <i>Display XY Data</i>	95
Figura 20. Configuración de herramienta <i>Display XY Data</i>	95
Figura 21. Puntos localización de las estaciones meteorológicas.	95
Figura 22. Localización de la herramienta <i>Kriging</i>	96
Figura 23. Menú de configuración del <i>Kriging</i>	96
Figura 24. Mapa de interpolación <i>Kriging</i> para la distribución de la precipitación. ...	96
Figura 25. Localización de la herramienta <i>Raster Calculator</i>	96

Figura 26. Menú de configuración de <i>Raster Calculator</i> para el cálculo del factor R.	97
Figura 27. Ráster de distribución del factor R para Santiago Tulantepec.....	97
Figura 28. Localización de la herramienta <i>Clip</i>	97
Figura 29. Menú <i>Clip</i> para unidades de suelo.	97
Figura 30. Mapa de distribución de las unidades de suelo en Santiago Tpec.	98
Figura 31. Localización de la herramienta <i>Create Fishnet</i>	98
Figura 32. Menú <i>Create Fishnet</i> para generar puntos de muestreo.	98
Figura 33. Malla de puntos de referencia para muestreo.	99
Figura 34. Tabla de datos del archivo vectorial del factor K.	104
Figura 35. Localización de la herramienta <i>Feature to Raster</i>	104
Figura 36. Configuraciones de la herramienta <i>Feature to Raster</i>	104
Figura 37. Ráster de distribución del factor K en Santiago Tulantepec.	104
Figura 38. Localización de la herramienta <i>Extract by Mask</i>	105
Figura 39. Configuración de la herramienta <i>Extract by Mask</i>	105
Figura 40. Ráster de elevaciones de Santiago Tulantepec.	105
Figura 41. Localización de la herramienta <i>Fill</i>	105
Figura 42. Configuración de la herramienta <i>Fill</i>	106
Figura 43. Ráster resultante de la herramienta <i>Fill</i>	106
Figura 44. Localización de la herramienta <i>Flow Direction</i>	106
Figura 45. Configuración de la herramienta <i>Flow Direction</i>	106
Figura 46. Ráster de dirección de flujo de Santiago Tulantepec.	106
Figura 47. Localización de la herramienta <i>Flow Accumulation</i>	107
Figura 48. Configuración de la herramienta <i>Flow Accumulation</i>	107
Figura 49. Ráster de distribución de la acumulación de flujo.....	107
Figura 50. Localización de la herramienta <i>Slope</i>	107
Figura 51. Menú de configuración de la herramienta <i>Slope</i>	108
Figura 52. Ráster de distribución de la pendiente en grados para Santiago Tulantepec.	108
Figura 53. Cálculo del valor de β mediante la herramienta <i>Raster Calculator</i>	108
Figura 54. Ráster de distribución de β para Santiago Tulantepec.	108

Figura 55. Aplicación de la fórmula asociada a m .	109
Figura 56. Ráster de distribución de la variable m .	109
Figura 57. Cálculo del factor L mediante la <i>Raster Calculator</i> y su fórmula asociada.	109
Figura 58. Ráster de distribución del factor L en Santiago Tulantepec.	109
Figura 59. Estimación del factor S mediante la <i>Raster Calculator</i> .	109
Figura 60. Ráster de distribución del factor S para Santiago Tulantepec.	110
Figura 61. Cálculo del factor LS para el municipio.	110
Figura 62. Ráster de distribución del factor LS de Santiago Tulantepec.	110
Figura 63. Polígonos de corte para los diferentes usos de suelo y vegetación.	110
Figura 64. Asignación de valores de C a la tabla asociada a los polígonos de usos de suelo y vegetación.	110
Figura 65. Localización de la herramienta <i>Feature to Raster</i> .	111
Figura 66. Configuración de la herramienta <i>Feature to Raster</i> .	111
Figura 67. Distribución del factor C en el municipio.	111
Figura 68. Asignación de valores de P a la tabla asociada.	111
Figura 69. Ruta de localización de <i>Feature to Raster</i> .	111
Figura 70. Pestaña de configuración de la herramienta <i>Feature to Raster</i> .	112
Figura 71. Distribución del factor P en Santiago Tpec.	112
Figura 72. Aplicación de la fórmula de erosión hídrica actual en la <i>Raster Calculator</i> .	112
Figura 73. Distribución de la erosión hídrica actual en Santiago Tulantepec.	112
Figura 74. Cálculo de la erosión hídrica potencial mediante la <i>Raster Calculator</i> .	113
Figura 75. Distribución de la erosión hídrica potencial en el área de estudio.	113

RESUMEN

La degradación por pérdida de suelo ocasionada por diferentes factores atribuidos a la acción humana, la ha hecho un problema medioambiental que no solo aqueja a México sino a todo el mundo, lo que a su vez se ha traducido en la reducción de la productividad de los ecosistemas. En respuesta a ello, a través de los años se han desarrollado una serie de formas de evaluación de la erosión hídrica, que se han mejorado mediante su integración en medios de una era digital que la hacen más fácil de estimar (debido a su gran cantidad de datos), como lo es la aplicación de la EUPSR en softwares como ArcGIS. Ante la situación, el objetivo del presente trabajo fue determinar el riesgo potencial y actual a la erosión hídrica del suelo en el municipio de Santiago Tulantepec, Hgo., a través de la EUPSR integrada a los SIG para identificar las zonas de mayor riesgo a la pérdida de suelo. Las variables evaluadas estuvieron enfocadas a determinar cada uno de los factores que conforman el modelo de la EUPSR, la cual integra datos relacionados a la lluvia, tipo de suelo, topografía del terreno, cobertura del suelo y la presencia de obras de conservación, que a su vez fueron aplicados en el software ArcGIS 10.8. De este modo, los resultados arrojaron datos de “erosividad muy baja” (R) de 1,422.24 a los 1,804.52 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, combinados con erodabilidad del suelo (K) de 0.013 a 0.079 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, en pendientes de 0 a 79% con valores de LS de 0 a más de 50, bajo coberturas vegetales (C) estimadas entre 0.001 y 1 y con la presencia de obras (P) bajo un rango de 0.40 y 1. Con ello, se posibilitó el cálculo de la erosión hídrica actual al integrar todos los factores de la EUPSR, dominada por un 83.11% de la superficie y bajo la categoría “baja” que indicó pérdidas menores a 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹, caso contrario a lo encontrado para la erosión hídrica potencial y según las categorías propuestas para este estudio se presentó en mayor distribución bajo la denominación “extrema” con 32.01% de la superficie total, la cual a su vez tomó los valores superiores en aquellas áreas donde coincidieron los valores más altos de precipitación con topografía accidentada. Se concluyó que la combinación EUPSR-SIG resulta una alternativa viable para tener un panorama general de las condiciones de erosión en el área de estudio.

ABSTRACT

Degradation due to soil loss caused by different factors attributed to human action, has made it an environmental problem that not only affects Mexico but the whole world, which in turn has resulted in the reduction of ecosystem productivity. In response to this, over the years a series of ways of evaluating water erosion have been developed, which have been improved by integrating them into the means of a digital era that make it easier to estimate (due to its large amount of data), such as the application of the RUSLE in software such as ArcGIS. Given this situation, the objective of this study was to determine the potential and current risk to soil water erosion in the municipality of Santiago Tulantepec, Hgo. through the RUSLE integrated to GIS to identify the areas of greatest risk to soil loss. The variables evaluated were focused on determining each of the factors that make up the RUSLE model, which integrates data related to rainfall, soil unit, topography, land cover and the conservation works, which in turn were applied in ArcGIS 10.8 software. Thus, the results yielded "very low erosivity" (R) data from 1,422.24 to 1,804.52 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹, combined with soil erodibility (K) from 0.013 to 0.079 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, on slopes from 0 to 79% with LS values from 0 to more than 50, under vegetation covers (C) estimated between 0.001 and 1 and with the presence of soil conservation works (P) under a range of 0.40 and 1. With this, it was possible to calculate the current water erosion by integrating all the factors of the RUSLE, dominated by 83.11% of the surface and under the category "low" which indicated losses of less than 10 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ contrary to what was found for potential water erosion and according to the categories proposed for this study, it was presented in greater distribution under the denomination "extreme" with 32.01% of the total surface, which in turn took the highest values in those areas where the highest values of precipitation coincided with rugged topography. We concluded that the RUSLE-GIS combination is a viable alternative for obtaining a general overview of erosion conditions in the study area.

1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, los cambios como: el crecimiento poblacional, la urbanización, la desertificación, la pérdida de biodiversidad, la escasez de agua, la degradación de la tierra, etc., han afectado negativamente y de manera rápida el medio ambiente (UN Environment, 2019). De este modo, la pérdida de suelo de las superficies terrestres por erosión está muy extendida en todo el mundo lo que ocasiona de forma adversa afectaciones en la productividad de los ecosistemas naturales, como en la agricultura, los bosques y pastizales, disminuyendo su calidad y dando lugar a que a través de muchos años se den cambios infligidos en los suelos por erosión inducida por el hombre, originando que tierras valiosas que antes eran productivas se vuelvan improductivas y, a menudo, con el tiempo sean abandonadas. Además, a esto se le agrega el daño provocado a la diversidad de plantas, animales y microbios en el suelo (Pimentel, 2006).

La degradación por pérdida de suelo, que supone una pérdida física de las partículas del suelo debido a procesos erosivos como la lluvia o el viento, donde, la primera hace referencia a la pérdida gradual de material por el impacto de las gotas de lluvia sobre un suelo desnudo, provocando la liberación de partículas que son transportadas vertiente abajo (erosión hídrica) y la segunda refiere a la pérdida de partículas de suelo a través del transporte realizado por acción del viento (erosión eólica) y depositadas en otro lugar, por deflación o abrasión (Porta *et al.*, 2014).

“Se calcula que el 95% de los alimentos se produce directa o indirectamente en los suelos” (FAO, 2015), mientras que el resto proviene de los océanos y otros sistemas acuáticos, de ahí la importancia de mantener la productividad y la calidad de los suelos, que básicamente son el pilar mundial para la producción de alimentos (Pimentel, 2006).

Lamentablemente, el suelo ha sido hasta el presente un patrimonio subestimado, un recurso que se ha dilapidado, y cuya pérdida, de continuar a los ritmos actuales, pone en peligro la viabilidad nacional, dándole poca atención y regulación de uso, reflejando altos niveles de degradación con repercusiones sociales, económicas y ambientales graves, pero cabalmente poco valoradas (CONAFOR, 2004).

A través de los años un sin número de investigaciones han estudiado y comprobado que los factores más importantes que influyen en la erosión hídrica del suelo son: el clima, la topografía y las características de los diferentes suelos. Para cuantificar la pérdida de suelo, se han desarrollado con los años diferentes modelos matemáticos que permiten saber de manera directa o indirecta la cantidad de suelo que se pierde bajo diferentes condiciones presentadas en los sitios de estudio, entre ellos destaca la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Dumas-Salazar, 2012).

La aparición de un gran número de modelos de erosión del suelo ha permitido el estudio de este fenómeno, especialmente con fines de conservación con un nivel de precisión efectivo y aceptable. Además de facilitar su estimación, permiten desarrollar planes de manejo óptimos bajo modelos como la EUPS, EUPSR, WEPP, SEMMED, ANSWERS, LISEM, EUROSEM, SWAT, SWRRB, AGNPS, etc., y ser utilizados bajo una escala regional (Ahmad *et al.*, 2017). Como mencionan Barrena-González *et al.* (2020), en la actualidad se pueden incorporar a los SIG una gran variedad de modelos paramétricos que permitan estudiar la pérdida de suelo.

En los últimos años el uso de estas nuevas tecnologías de la información (sistemas de información geográfica y la teledetección), como herramientas en la realización de estudios de cartografía de riesgos de erosión han permitido consolidarse como alternativa a la hora de realizar una planificación sostenible, logrando un análisis territorial y de seguimiento temporal a este fenómeno (Dumas-Salazar, 2012).

Afortunadamente los SIG son una tecnología adecuada para el manejo e integración de información espacial y demás elementos de un componente geográfico que permite tomar decisiones, además de posibilitar realizar gran variedad de modelos cartográficos en lapsos de tiempo cortos y con inversiones económicas menores, así como generar la posibilidad de aplicar diferentes escenarios sin generar mayores complicaciones y/o costos (Cordero-Rebolledo, 2022).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SUELO

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo define al suelo como el material mineral u orgánico no consolidado en la superficie de la tierra que ha sido sometido y muestra los efectos de los factores genéticos y ambientales de: clima (incluyendo los efectos del agua y la temperatura), y los macro y microorganismos, condicionados por el relieve que actúan sobre el material parental durante un periodo de tiempo (SSSA, 2008).

Gardi *et al.* (2014), afirmaron lo siguiente:

El suelo es una formación natural que se halla en la intersección de la litósfera, hidrósfera, biosfera y atmósfera. Resulta de la acción conjunta de procesos físicos, químicos y biológicos (meteorización) sobre el medio original (la roca madre). Dichos procesos transforman el material inicial hasta darle una morfología y propiedades características. El suelo está compuesto por elementos minerales y orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso, los cuales se interrelacionan dando lugar a distintos niveles de organización con variaciones tanto espaciales (verticales y laterales) como temporales (horarias, estacionales, centenarias y hasta milenarias). Es un sistema complejo en el que suceden de manera continua procesos químicos, físicos y biológicos. La ciencia que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea se denomina Edafología, mientras que la Pedología se ocupa del estudio de su formación, clasificación, morfología y taxonomía, además de la interacción con el resto de los factores geográficos.

Desde el punto de vista edafológico, el suelo, es un ente natural organizado e independiente, con constituyentes, propiedades y génesis que son el resultado de la actuación de una serie de factores activos (clima, organismos vivos) que actúan sobre los factores pasivos (la roca madre y el relieve), independientemente del tiempo transcurrido. (p. 12).

2.2 FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO

De acuerdo con Jenny (1941) en su obra *Factores formadores del suelo* (*Factors of Soil Formation*) citado por Gardi *et al.* (2014), las propiedades de los suelos resultan de la interacción de cinco factores importantes, expresada en la siguiente ecuación:

$$\text{suelo} = f(\text{roca madre, clima, organismos vivos, topografía, tiempo})$$

Material parental/Roca madre: Está representado generalmente por la roca madre o por un material transportado y depositado. Se compone de minerales, los cuales pueden estar consolidados o no, que sufren la acción de otros factores a lo largo del tiempo y en parte sometidos a meteorización física, química y/o biológica. Los rasgos más importantes originados por este factor son: composición mineralógica, granulometría y permeabilidad de los suelos. Las rocas de tipo ígnea (granito, basalto), sedimentarias (dolomitas, roca caliza) y metamórficas (gneis, mármol) son las principales en su clasificación.

Relieve: Es uno de los aspectos fundamentales en la formación de suelos. Desde el punto de vista edáfico, los elementos del relieve más importantes son la inclinación y la longitud de las laderas, la posición fisiográfica y la orientación. Conjuntamente con el clima, determina las características de los suelos y la vegetación.

Clima: La acción del clima en la formación del suelo resulta ser decisivo y principalmente tiene que ver con el aporte de agua al suelo y la temperatura. Ambos factores (humedad y temperatura) influyen en los procesos básicos que dan origen a la formación de suelos. Influye también en otros factores como los bióticos y el relieve y en acción conjunta condiciona el contenido de materia orgánica y su grado de evolución en un suelo dado.

Organismos vivos: Desde la microfauna hasta la vegetación se consideran formadores de suelo, al participar como fuente de materia orgánica y agentes directos de procesos edafogénicos (transforman física, química y biológicamente el suelo). Estos procesos están relacionados directamente con la cantidad y características de los organismos vivos.

Tiempo: El periodo necesario para que el material parental evolucione es muy largo, ya que el ritmo de los procesos edafogenéticos es extraordinariamente lento (entre 0.001 y 1 mm/año), aunque en climas cálidos y húmedos es más rápido en comparación con otros climas. La velocidad de formación de los suelos disminuye con el tiempo hasta su estabilización.

2.3 FUNCIONES DEL SUELO

El suelo ha sido un ente que a pesar de su aporte a la vida en la tierra pocas veces se aprecia como tal, por tal motivo es importante resaltar algunas de las funciones ecosistémicas y relacionadas con la actividad humana. De acuerdo con Burbano-Orjuela (2016), algunas de las funciones y servicios más importantes de los suelos son:

Producción de alimentos y biomasa. Sirve como soporte y suministro de nutrientes para las plantas a fin de producir alimentos y biomasa en general. Teniendo como dato que, del suelo depende en forma directa o indirecta más del 95% de la producción mundial de alimentos.

Ciclos biogeoquímicos. Por su ocurrencia en la naturaleza y bajo una posición central e insustituible en el suelo al dar paso continuo de los sistemas vivos del planeta a otros que no lo son, se convierten en mecanismos indispensables para que haya condiciones estables en el planeta y para que se dé la vida, al involucrar elementos vitales como carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros.

Almacenamiento o fijación de carbono. El suelo es el mayor sumidero de carbono en la naturaleza (el carbono almacenado como materia orgánica en el primer metro de suelo, es una y media veces superior al acumulado en la vegetación). La fijación del carbono en el suelo, comúnmente mal acuñado este proceso como “secuestro de carbono” o “captura de carbono”, impide que el CO₂ vaya a la atmósfera, al ser este es uno de los gases de efecto invernadero que contribuyen con el cambio climático global.

Almacenamiento y filtración de agua. El suelo es el medio de captación, infiltración y almacenamiento del agua en el ámbito del ciclo hidrológico y permite así la recarga

tan importante de los acuíferos, además influye en su calidad, al amortiguar y atrapar ciertos contaminantes e impide que estos lleguen a las reservas de agua.

Soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas. Sobre el suelo se realizan una gran cantidad de actividades industriales, permite el habilitamiento de zonas residenciales y de infraestructura turística, se construyen carreteras y otras obras de tipo civil. También, suele ser un suministro importante de materias primas de amplio uso como: turba, grava, arena, arcilla o rocas, utilizadas en diferentes procesos productivos de relevancia económica.

Reserva de biodiversidad. El suelo es una de las reservas más importantes de biodiversidad, no solo por el enorme número de organismos que viven en su superficie sino también, al interior del mismo; la abundancia encontrada es tal, que se cree, supera la establecida por encima de este cuerpo natural. Aunque es de importancia mencionar que, los servicios ecosistémicos que presta el suelo, dependen de las complejas comunidades de organismos presentes en este medio.

Depósito del patrimonio geológico y arqueológico. El suelo resulta ser el soporte más importante de gran parte de los restos que dan cuenta de la herencia humana y de la historia ambiental reciente de la Tierra. La preservación del patrimonio geológico y arqueológico va a depender principalmente de los procesos de formación y degradación del suelo y va a estar estrechamente relacionada con los efectos de: la actividad biológica que se desarrolle en él, así como de la circulación del agua que ocurren dentro y fuera de él, además de las acciones humanas de intervención en el suelo, por mencionar algunos.

Entorno físico y cultural para la humanidad. El suelo, además de servir de base a las actividades humanas es, asimismo, un elemento del paisaje y del patrimonio cultural. El suelo permite que los seres humanos tengan a su disposición alimentos, abrigo, espacio y hábitat para desarrollarse como personas en ascenso, y de muchos otros elementos para su existencia.

2.4 COMPONENTES DEL SUELO

FAO (1996), señala que el suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua.

- Los **minerales** provienen principalmente de la roca madre.
- La **materia orgánica** es el producto de la descomposición de vegetales y animales muertos y puede almacenar gran cantidad de agua y es rica en minerales.
- Los **microorganismos** son de dos tipos: los que desplazan la materia orgánica (insectos y lombrices) y los que la descomponen liberando los nutrientes (hongos, bacterias).
- El **agua y aire** ocupan poros, espacios entre las partículas de suelo que se producen por las irregularidades de su forma y tamaño.

Las proporciones ocupadas por los componentes del suelo son: minerales (45%), materia orgánica (0.5-5%), agua (20-30%) y aire (20-30%) (INECC, 2007a).

2.5 IMPORTANCIA DEL RECURSO SUELO

La FAO (2015) menciona que:

Los suelos son un recurso clave para mantener el bienestar humano, además de ser fundamental en la creación de una serie de productos y servicios ecosistémicos esenciales como:

- Producción de alimentos, fibras, combustibles y medicamentos, al ser la base de estos.
- Los suelos son el medio de absorción, almacenamiento, alteración, purificación y liberación de agua, que permiten el crecimiento de las plantas y el abastecimiento hídrico.
- Interactúan con la atmósfera a través de la absorción y emisión de gases (dióxido de carbono, metano, vapor de agua, por mencionar algunos) y polvo.
- Constituyen la mayor reserva de C orgánico terrestre (resultan poseer más del doble del C orgánico almacenado en la vegetación que los suelos soportan).

- Regulan los ciclos del C, oxígeno y los nutrientes de las plantas (N, P, K, Ca, Mg, entre otros.).
- Hábitat importante de diversos animales y organismos (como bacterias y hongos) y consecuentemente mantiene la actividad biológica, la diversidad y la productividad.
- Hábitat y medio importante para la dispersión de semillas y la diseminación del patrimonio genético.
- Medio que amortigua, filtra y modera el ciclo del agua.
- Plataforma que permite los asentamientos urbanos, y uso como material de construcción.

2.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Exceptuando los glaciares, los cuerpos de agua y las zonas urbanas, el suelo cubre de manera continua la superficie terrestre en una variada gama de tipos, a pesar de esta gran variación, no se posee de un sistema de clasificación universal y los que son utilizados por la mayoría de los países dependen, en gran medida, de la inversión que se aplica en el levantamiento de los suelos para su determinación. Esta situación complica una comparación internacional, sin embargo, existen un par de intentos para armonizar la forma de clasificar y caracterizar los suelos: la taxonomía de los suelos de la USDA y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la FAO (SEMARNAT, 2016).

La WRB retoma las características mínimas indispensables de los suelos y es menos costosa, además su objetivo no es sustituir, sino facilitar la comunicación internacional a través de un lenguaje que incorpore términos edáficos comunes. Es por ello que, de acuerdo a la clasificación más actualizada se incluyen 32 unidades de suelo, basadas en las diferencias que existen en sus características diagnósticas (horizontes, propiedades físicas, químicas y biológicas) y la relación con sus factores formadores (roca madre, clima, topografía, biota y tiempo) (WRB, 2015).

El sistema de clasificación edáfica utilizado en México de manera oficial por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía es el de la WRB, el cual fue adaptado a las

condiciones ambientales del país y reportado desde la primera versión de las cartas edafológicas del INEGI (SEMARNAT, 2016).

Según datos del INEGI, en México existen 25 de las 32 unidades de suelo de la WRB y a pesar de que seis grupos cubren en su conjunto más del 80% de la superficie nacional, la diversidad edáfica está determinada por los 19 grupos restantes encontrados en diferentes microrelieves, microclimas y diferentes tipos de vegetación (Cruz *et al.*, 2007). Las unidades de suelo dominantes son: Leptosoles (52.5 millones de ha), Regosoles (27 millones de ha), Feozems (22.5 millones de ha), Calcisoles (19.6 millones de ha), Luvisoles (17.7 millones de ha) y Vertisoles (16.5 millones de ha) y el resto de los suelos (19 unidades) en total cubren alrededor de 36 millones de hectáreas (INEGI, 2007).

2.7 DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS

La FAO (2015) define a la degradación del suelo como:

“La reducción de su capacidad para proporcionar bienes y servicios ecosistémicos y garantizar sus funciones durante un período de tiempo para los beneficiarios de los mismos. La degradación del suelo se manifiesta de diversas formas: erosión del suelo, salinización, agotamiento de los nutrientes, pérdida de la biodiversidad del suelo, contaminación, compactación, pérdida de materia orgánica, o sellado del suelo, entre otras”.

Actualmente, la degradación ambiental es reconocida como una de las principales amenazas que no solo afectan al planeta, sino que también comprometen la existencia de miles de especies, incluyendo la humana y que de acuerdo a las tendencias hacia el deterioro ambiental es necesario el monitoreo de los recursos naturales para identificar las áreas con condiciones críticas de deterioro (Pérez-Vega *et al.*, 2020).

La degradación de los suelos ocurre en respuesta a múltiples factores ambientales como: clima (precipitación, evapotranspiración, temperatura, humedad), paisaje (suelos, geomorfología, vegetación, geología, hidrología) usos de suelo (sistemas de producción, deforestación, sobrepastoreo) y socioeconómicos (densidad de población, sistemas de tenencia de la tierra, políticas públicas, mercado), es

importante indicar que rara vez es un solo factor el que desencadena el problema de degradación, y además en prácticamente todos, el factor preponderante recae en las actividades humanas.

Las actividades humanas más destacadas que inducen la degradación de suelos se encuentran: las actividades agropecuarias, la deforestación, el manejo inadecuado de los recursos forestales, el sobrepastoreo y los sistemas de producción agrícola (INECC, 2007b).

“La degradación de los suelos puede conducir a una situación irreversible, la desertificación. Esta consiste en la reducción o destrucción del potencial biológico de la tierra que puede llevar a la creación de condiciones análogas a las de un desierto natural” (INECC, 2007c).

2.8 EROSIÓN

Kirkby & Morgan (1984) citados por Loredo-Osti (2005), definen la erosión como “un proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas del suelo por los agentes erosivos”.

Si este proceso se lleva a cabo en condiciones naturales se denomina erosión geológica, pudiendo ser considerada en tal caso como una forma más de conformación del relieve, pero si la tasa de erosión se incrementa por las actividades humanas (modificación de la superficie terrestre, manipulación de la capa arable y cobertura vegetal en los terrenos agrícolas o deforestación), se manifiesta como erosión acelerada o inducida (Loredo-Osti, 2005).

La **erosión potencial** es aquella generada en un suelo que se encuentra totalmente desprotegido de una cubierta vegetal y alterado en su máximo nivel por medio de implementos mecánicos, de este modo se considera como el nivel máximo de erosión que se puede esperar en un área determinada (Wischmeier & Smith, 1978).

La **erosión actual** es aquella que se está generando en el momento de la evaluación, originada por efectos del sistema de producción que se esté ejecutando en el área evaluada, o con la cobertura vegetal presente actual (en el caso de no ser sitio cultivado) (Wischmeier & Smith, 1978).

De acuerdo al agente causante de la erosión que puede ser agua o viento, se diferencian dos tipos de erosión: hídrica y eólica. La erosión hídrica se presenta cuando el agua de lluvia desprende las partículas de los agregados en la superficie del suelo y estos son arrastrados a través de un escurrimiento superficial (Loredo-Osti *et al.*, 2007).

Según Suárez de Castro (1980) citado por Rodríguez-Cristaldo (2012), la erosión hídrica se puede presentar de las siguientes formas:

Laminar: “Se debe especialmente al desprendimiento más o menos uniforme de partículas en toda un área, ocasionado por el impacto de las gotas de lluvia sobre un suelo mal protegido y al arrastre posterior de dichas partículas por la escorrentía”.

En surcos: “Ocurre cuando por irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se encuentra en algunos sitios del paisaje hasta adquirir volumen y velocidad suficiente para hacer otros cortes y formar canalículos que se destacan en el terreno”.

En cárcavas: “Se presenta cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno y que ocasiona año tras año la ampliación de los surcos formados por la acción de esas corrientes de gran volumen y velocidad”.

2.9 MODELOS DE EROSIÓN

Las investigaciones aplicadas sobre el proceso de erosión han tenido grandes avances importantes, esto gracias a la incorporación de modelos de simulación numérica por computador. Los modelos de erosión permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de los procesos que dan origen a la erosión, analizar su evolución a través del tiempo, así como simular aquellos efectos de cambios en las variables del clima y paisaje. Los distintos modelos existentes se diferencian en aspectos importantes de cara a su aplicación como: la naturaleza de los procesos que incluyen, su formalización matemática, la representación espacial y temporal, los requerimientos de información y de tiempo de procesamiento a través de la computación, entre otros. Y algo muy importante, difieren en el tipo de público al que van orientados, es decir,

va a depender del nivel de conocimientos técnicos que requieren del usuario (Alatorre & Beguería, 2009).

Los modelos de erosión atienden las leyes físicas y químicas que controlan los procesos erosivos (arranque y transporte de partículas de suelo y rocas lábiles). Actualmente existe un gran número de modelos de erosión, en los cuales existen diferencias como: complejidad, escala y resolución espacial del análisis, procesos que consideran, representación del medio físico y cantidad y tipo de datos que se requieren para su calibración (Alatorre & Beguería, 2009).

2.9.1 MÉTODOS CUANTITATIVOS

Permiten la estimación numérica de la erosión, con el propósito de establecer diferentes grados de la misma; estos modelos pueden emplearse para el desarrollo de modelos cualitativos (Flores-Islas, 2016).

De evaluación directa

Estos métodos permiten determinar la magnitud de la erosión mediante mediciones directas sobre el terreno, de parámetros asociados al suelo, de los sedimentos producidos y además de estimaciones a partir de ensayos. Algunos de los métodos existentes y más utilizados son:

- Agujas de erosión (Sancho *et al.*, 1991)
- Estaciones de aforo y colectores (Gallart, 1992) citado en (Flores-Islas, 2016)
- Lotes de escurrimiento (García & López, 2009) citado en (Flores-Islas, 2016)
- Perfiladores microtopográficos (Sancho *et al.*, 1991)
- Simuladores de lluvia (Bubenzer & Jones, 1971)

De evaluación indirecta

Permiten la simulación de escenarios y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Este tipo de evaluación consiste en el empleo de modelos para representar la realidad (Flores-Islas, 2016).

Los modelos erosivos de manera general se dividen de tres maneras dadas en función de los procesos físicos simulados, los algoritmos del modelo que describen esos procesos y la dependencia de los datos del modelo:

- Empíricos o estadísticos/métricos

Son generalmente los más sencillos, basándose en el análisis estadístico de un conjunto de observaciones (Alatorre & Beguería, 2009). El modelo más destacado es:

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Wischmeier & Smith, 1978)

- Conceptuales

Están basados en la representación del sistema que implica la erosión como una serie interna de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas de tipo simplificado.

- De base física

Se basan en los métodos de las leyes físicas que controlan las estrechas relaciones entre los diferentes parámetros contenidos y los procesos observados.

La Tabla 1, muestra algunos modelos de evaluación indirecta (empíricos, conceptuales y de base física) según Alatorre & Beguería (2009).

Tabla 1. Modelos de erosión y transporte de sedimentos.

Modelo	Tipo	Escala espacial	Escala temporal	Base de datos	Resultados	Referencia (año)
USLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Wischmeier & Smith, 1978
ANSWERS	Físico	Peq. Cuencas	Evento/ Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, sedimentos, producción de sedimentos	Beasley <i>et al.</i> , 1980
HSPF	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, tasa de escorrentía, carga de sedimentos	Johanson <i>et al.</i> , 1980
CREAMS	Físico	Parcela	Evento/ Continuo	Alta	Erosión, depositación	Knisel, 1980; Knisel, 1995
KINEROS/ KINEROS2	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Evento	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Smith, 1981; Smith <i>et al.</i> , 1995a y 1995b; Woolhiser <i>et al.</i> , 1990
EPIC	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Erosión	Williams <i>et al.</i> , 1983
MMF	Empírico/ Conceptual	Ladera/ Cuenca	Peq. Anual	Moderada	Escorrentía, erosión	Morgan <i>et al.</i> , 1984; Morgan, 2001
PESERA	Físico	Ladera/ Regional	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Kirkby <i>et al.</i> , 2000
AGNPS	Conceptual	Peq. Cuencas	Evento/ Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Young <i>et al.</i> , 1989
IHACRES-WQ	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escorrentía, carga de sedimentos	Jakeman <i>et al.</i> , 1990; Jakeman & Hornberger, 1993
THORNES	Conceptual/ Empírico	Ladera/ Cuenca	Peq. Anual	Moderada	Escorrentía, erosión	Thornes, 1990
TOPOG	Físico	Ladera	Continuo	Alta	Riesgo de erosión, escorrentía, pico máximo,	CSIRO Land and Water, TOPOG Homepage

					solutos, producción de sedimentos	
WEPP	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Escorrentía, producción de sedimentos, pérdida de suelo	Nearing <i>et al.</i> , 1989; Laflen <i>et al.</i> , 1991
RUSLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Renard <i>et al.</i> , 1991 y 1994
PERFECT SWAT	Físico Conceptual	Parcela Cuenca	Continuo Continuo	Alta Alta	Escorrentía, erosión Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Littjeboy <i>et al.</i> , 1992 Arnold <i>et al.</i> , 1995
IQQM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Moderada	Escorrentía, sedimentos, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno	DLWC, 1995
EROSIÓN 3D	2D-Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	von Werner, 2000; Schmidt <i>et al.</i> , 1997
LISEM	Físico	Peq. Cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, sedimentos	de Roo <i>et al.</i> , 1996; de Roo & Jatten, 1999
RUSLE-3D	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión	Mitasova <i>et al.</i> , 1996; Mitas & Mitasova, 1998
USPED	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Evento/ Anual	Moderada	Erosión, depositación	Mitasova <i>et al.</i> , 1996; Mitas & Mitasova, 1998
SHETRAN	Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, pico máximo, sedimentos, producción de sedimentos	Wicks & Bathurst, 1996
GUEST	Físico	Parcela	Continuo	Alta	Escorrentía, concentración de sedimentos	Rose <i>et al.</i> , 1997
MIKE-11	Físico	Cuenca	Continuo	Alta	Producción de sedimentos, escorrentía	Hanley <i>et al.</i> , 1998

EUROSEM	Físico	Peq. Cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Morgan <i>et al.</i> , 1998
SPL	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Añual	Moderada	Erosión fluvial, incisión en ríos	Stock & Montgomery, 1999
LASCAM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, sedimentos	Viney y Sivapalan, 1999
WATEM	Conceptual	Cuenca	Añual	Moderada	Erosión	Van Oost <i>et al.</i> , 2000; Van Rompae <i>et al.</i> , 2001
SEDNET	Conceptual/ Empírico	Cuenca	Añual/ Continuo	Alta	Sedimentos en suspensión, contribución del flujo superficial, procesos de rills y gullies	Wilkinson <i>et al.</i> , 2004
EMSS	Conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escorrentía, carga de sedimentos	Vertessey <i>et al.</i> , 2001
STREAM	Conceptual	Cuenca	Evento	Moderada	Escorrentía y erosión	Cerdan <i>et al.</i> , 2002
CASC2D-SED	Físico	Peq. Cuencas	Evento/ Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión y sedimentación separando las partículas por tamaños	Rojas, 2002
SEAGIS	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Añual	Alta	Erosión, producción de sedimentos	DHI, 2003
AGWA	Conceptual/ Físico	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Burns <i>et al.</i> , 2004

2.9.2 MÉTODOS CUALITATIVOS

Este tipo de metodologías están basadas en la observación de la erosión con apoyo de material cartográfico de percepción remota y observación en campo (Flores-Islas, 2016).

- Teledetección

Consiste en un conjunto de técnicas de observación de la superficie terrestre a partir de sensores aerotransportados o instalados en satélites capaces de ofrecer información en diferentes longitudes de onda (visible, infrarrojo, térmico, microondas, etc.) y comúnmente se obtienen datos de: cobertura de suelo, relieve, suelos, rocas y biomasa (Alatorre & Beguería, 2009).

- Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG es un sistema de tipo informático diseñado para almacenar, analizar y procesar información referenciada geográficamente mediante una proyección y su sistema de coordenadas contenido, y relacionarla con bases de datos no espaciales. En la aplicación de modelos de erosión en un SIG puede resultar de ayuda como herramienta auxiliar para el análisis espacial de datos cuantitativos (elevación, hidrometeorología) y temáticos (litología, tipo de suelo, cobertura) (Alatorre & Beguería, 2009).

Según ESRI (s.f.), creador del software ArcGIS, éste es definido como “Un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica”. Mismo que se utiliza por personas de todo el mundo, con la finalidad de poner el conocimiento geográfico de manera accesible para cualquier usuario y al servicio de los diferentes sectores (gubernamental, empresario, de ciencia, de educación y los medios). Además de ser un sistema que puede estar disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles (smartphones) y equipos de escritorio.

De manera general, las personas utilizan ArcGIS porque les permite realizar diferentes tareas enfocadas a (ESRI, s.f.):

- Resolver problemas
- Tomar mejores decisiones
- Planificar adecuadamente
- Utilizar los recursos más eficientemente
- Anticipar y administrar los cambios
- Administrar y ejecutar las operaciones de forma más eficaz
- Promocionar la colaboración entre equipos, disciplinas e instituciones
- Aumentar la comprensión y los conocimientos
- Comunicar de forma más efectiva
- Educar y motivar a otros

2.10 MODELO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO REVISADA

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada de Renard *et al.* (1997) es una versión actualizada de la ecuación original desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978). Expresada bajo la ecuación siguiente:

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

Donde:

A = Pérdida de suelo potencial media anual (Mg ha⁻¹ año⁻¹)

R = Factor de erosión por precipitación y escorrentía (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹)

K = Factor de erodabilidad del suelo (Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹)

LS = Factor de longitud y de gradiente de la pendiente (adimensional)

C = Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P = Factor de práctica de conservación/soporte (adimensional)

A la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de Wischmeier & Smith (1978), Renard *et al.* (1991) le realizaron algunas modificaciones, las cuales muestran las siguientes características:

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Nuevos valores de erosividad de lluvias y escurrimientos en condiciones áridas.
- Desarrollo de una variable estacional en términos de erodabilidad del suelo (K).
- Un enfoque de subfactores para calcular el término de manejo de cobertura (C), donde los subfactores representan consideraciones de uso previo de la tierra, dosel de cultivo, cobertura de superficie y rugosidad de la superficie.
- Nuevos algoritmos de longitud y pendiente de talud (LS) que reflejan las relaciones de erosión en surcos e intersurcos.
- Capacidad de calcular los productos LS para pendientes de diferentes formas.
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para pastizales, rotaciones de cultivos en franjas, valores de factores de contorno y drenaje subterráneo.

Algunos cambios con respecto a los parámetros son:

- Estimación del factor K en función del diámetro de partículas.
- Modificación a la erosionabilidad del suelo según las variaciones estacionales, además de una metodología alterna cuando el nomograma no es aplicable.
- El parámetro LS refleja las relaciones de erosión en surcos, así como la forma de la pendiente.
- Modificaciones al factor C para poder ser estimado según su uso de tierra, copa del cultivo, cobertura superficial y rugosidad del suelo.

2.11 LOS SIG EN EL ASPECTO AMBIENTAL

Ante los desafíos que hay que enfrentar en el futuro para la conservación de los recursos naturales, los Sistemas de Información Geográfica se convierten en esa herramienta de relevancia para el análisis, diseño modelización e implementación de planes de manejo encaminados a conservar dichos recursos del ambiente. Por su carácter multidisciplinar de estas aplicaciones se permite elaborar modelos que no

solo representen situaciones actuales, sino también de aquellas posibles a suceder en un futuro, permitiendo así enriquecer su mejor gestión y toma de importantes decisiones determinantes para una conservación (Ramírez *et al.*, 2017).

El desafío principal al que se enfrenta el sector agropecuario reside de manera importante en compatibilizar la producción con la conservación del ambiente y los recursos naturales, debido a que la sociedad pone su confianza en los productores agropecuarios de doble manera: el uso de la tierra y la protección de los bienes y servicios que de esta se desprenden. Y para lograr mantener estas grandes responsabilidades será necesario instrumentar políticas de índole público que permitan a los productores ser los protagonistas de ese cambio y la sociedad que los rodea, contribuir en la premiación a aquellos que mantengan las prácticas en el tiempo a corto y largo plazo (Ramírez *et al.*, 2017).

Estudios como el realizado por Kushwaha & Yousuf (2017) indican que las tecnologías de teledetección se desarrollan bajo un papel importante en el ámbito del mapeo para la evaluación del riesgo a la erosión del suelo en la agricultura, los bosques y tierras degradadas. Su aplicación induce nuevas oportunidades que permiten la planificación y gestión de la conservación, aumentando su capacidad si se combina con modelos empíricos de predicción de la erosión como la RUSLE. Los modelos de predicción de erosión integrados a teledetección y SIG no solo estiman la pérdida de suelo, sino que también proporcionan las distribuciones espaciales de la erosión.

2.12 OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

Para la conservación y restauración de suelos es necesaria la ejecución de obras o prácticas para controlar los procesos de degradación en sus diferentes niveles, rehabilitar los suelos, así como mantener la productividad potencial, estas obras y prácticas se implementan a corto, mediano y largo plazo (CONAFOR, 2018a).

La CONAFOR (2018a), recomienda una serie de consideraciones para seleccionar las obras o prácticas más acordes a las necesidades de terreno degradado:

- Consultar información del área: Información bibliográfica y cartográfica de la región para poder interpretar condiciones de suelo, vegetación, clima, relieve, etc.
- Verificación en campo del predio: Recorrer el predio a trabajar, observar nivel y tipo de degradación, delimitar las zonas y pendientes, determinar algunas propiedades del suelo y aspectos de cobertura.
- Selección de obras: Definir la propiedad principal de los trabajos (ladera o en cárcavas) y elegir la obra adecuada.
- Realización de cálculos: Para obras a aplicar en laderas se calcula principalmente la distancia existente entre curvas a nivel.
- Capacitación y ejecución de obras: Capacitación técnica para dueños y poseedores, así como a asesores técnicos, para la realización de obras y prácticas.

Existe un gran número de **obras y prácticas para el control de la erosión laminar** o en cárcavas, las primeras consisten en tratamientos mecánicos o manuales en terrenos con laderas degradadas. Los objetivos y beneficios que estas presentan son:

- Retener suelo y sedimentos
- Disminuir el grado y longitud de la pendiente
- Impedir la formación de cárcavas
- Reducir el contenido de sedimentos en el agua de esorrentía
- Captar agua de lluvia, propiciando la infiltración de agua
- Interceptar escurrimientos y disminuir su velocidad
- Incrementar el contenido de humedad en el suelo, lo que coadyuva al establecimiento de la vegetación de tipo forestal
- Mejorar la calidad del agua

Algunas obras que se realizan con materiales vegetales, ya sean vivos o muertos, aportan una cantidad importante de materia orgánica al suelo, mejoran el paisaje y los sistemas de producción desarrollados en laderas (aprovechamientos productivos) y se pueden generar productos adicionales como leña y forraje.

Existen una gran variedad de obras y prácticas para controlar la erosión laminar, que a continuación se enlistan:

- Zanja bordo
- Zanja trinchera
- Terrazas de formación sucesiva
- Terrazas individuales
- Bordos en curvas a nivel
- Roturación
- Barreras de piedra acomodada en curvas a nivel
- Acomodo de material vegetal muerto
- Prácticas vegetativas
- Terrazas de muro vivo
- Barreras vivas
- Cortinas rompevientos
- Enriquecimiento de acahuales
- Sistemas agroforestales con especies de cobertura
- Prácticas alternativas para la mitigación de la sequía
- Sistema Nigarim
- Bordos en “V”

De igual manera existen **obras para el control de la erosión en cárcavas**, quienes representan la degradación extrema de un terreno, modifican el relieve y lo vuelven prácticamente improductivo para cualquier uso. Los objetivos que persigue el control de cárcavas son:

- Control de los escurrimientos superficiales
- Corrección de la pendiente del cauce
- Disminuir la producción y arrastre de sedimentos
- Mejorar la calidad del agua escurrida
- Estabilización de taludes
- Propiciar el desarrollo de la vegetación, principalmente natural
- Aumentar la infiltración y recarga de acuíferos
- Captación del agua
- Mejorar el acondicionamiento hidráulico de los causes (ríos)

Los trabajos a nivel de cárcava se realizan siempre y cuando las prácticas a nivel ladera no sean suficientes para controlar el escurrimiento. De acuerdo a los tipos de crecimiento de una cárcava, los trabajos para su control se dividen en:

Control de longitud

- Cabeceo de cárcavas con piedra
- Cabeceo de cárcavas mediante zanjas interceptoras de escorrentía

Control de amplitud

- Estabilización de taludes

Control de profundidad

- Presas para el control de azolves
- Presa de malla de alambre electrosoldada

- Presa de morillos
- Presa de ramas
- Presa de piedra acomodada
- Presa de llantas
- Presa de mampostería
- Presa de gaviones
- Presa de geocostales

3. ANTECEDENTES

3.1 EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN EL MUNDO

A nivel mundial se han realizado una gran cantidad de estudios de erosión a través del modelo de la EUPS, ya sea en su forma original o en sus formas modificadas, que además han tenido mejoras y propuestas para la evaluación de cada uno de los factores que la componen, por ello, se mencionan a continuación algunos de los más actuales realizados a nivel mundial:

- Chadli (2016) realizó un estudio enfocado a estimar la erosión hídrica en la cuenca de Sebou (Marruecos), donde menciona que debido a que se requiere gran cantidad de información para su cálculo se utilizó un SIG (ArcGIS 10.2) que le permitió ahorrar tiempo para optimizar y procesar la información. De este modo pudo determinar que la erosión en el área está influenciada por la combinación de cada uno de los factores que comprenden el modelo, arrojando que el 78.83% del área de estudio presenta bajo riesgo a la erosión y el 17.36% un riesgo medio.
- Boakye *et al.* (2020) mencionan en su trabajo que la aplicación de los modelos RUSLE y SEDD a los SIG permiten estimar de manera fácil, rentable y rápida la distribución de la erosión del suelo en la cuenca del río Pra, así como el rendimiento de los sedimentos fluviales, tomando en cuenta cada uno de los factores que integran los modelos. Esto mostró que la erosión del suelo varía de acuerdo con los tipos de usos de la tierra, señalando que el 21.3% de la cuenca presenta erosión que va de severa a muy severa. Concluyendo que sus resultados obtenidos permitirán servir como base para la planificación y gestión de los recursos naturales para garantizar el desarrollo sostenible de la cuenca.
- Martínez-Murillo *et al.* (2020) realizaron la validación del factor K a través del modelo de la RUSLE aplicado a paisajes ecogeomorfológicos mediterráneos contrastados (sur de España) mencionando que la degradación del suelo es más dinámica en aquellas zonas donde la geomorfología y uso del suelo es más promovente, por ello existen diferentes maneras de determinar la erosión.

La dinámica del suelo es influenciada por el uso del suelo que a su vez es incrementada por la cobertura vegetal. El parámetro del factor K puede ser mejorado analizando facciones de los agregados.

- Barrena-González *et al.* (2020) realizaron un estudio en la segunda región más productora de vinos en España encontrada en la parte suroeste del país, en el cual no se han hecho ningún estudio de erosión. Por ello se aplicaron los modelos del ISUM y la RUSLE para evaluar la erosión a largo plazo siendo evaluadas parcelas experimentales en un viñedo de 20 años bajo el sistema de labranza y otro bajo suelo desnudo. Para estos 2 métodos se encontraron diferencias significativas de al menos 5 veces, teniendo en cuenta que las mayores pérdidas se dieron en las partes altas siguiendo la dirección de la ladera. Concluyendo que debido a las grandes diferencias entre modelos es importante realizar evaluaciones en otros viñedos para determinar la idoneidad de la evaluación.
- Behera *et al.* (2020) utilizaron el modelo de la RUSLE integrado a SIG para la cuantificación del potencial de erosión del suelo en escenarios futuros de cambio climático, mencionado que las actividades realizadas por el hombre tienen gran impacto en la pérdida de suelo, por ello es importante evaluar la erosión actual y bajo condiciones futuras con la finalidad de permitir realizar actividades que garanticen su permanencia. Si se presentan mapas a mayor detalle (resoluciones pequeñas) se tendrá una mayor certeza del grado de afectación generada por aquellos factores que incluye la RUSLE.
- Bai & Cui (2021) hacen hincapié en su investigación que la pérdida de suelo y la escorrentía en áreas de cultivo actualmente tienen la atención en todo el mundo, por ello la propuesta de una mejora a la RUSLE (un modelo que no puede predecir la pérdida de suelo en aquellos años donde la distribución de la lluvia es significativamente atípica a la ley de distribución anual) puede lograr un resultado de simulación más efectivo en la predicción de la pérdida de suelo.

3.2 EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN MÉXICO

En México existen varios trabajos relacionados con la aplicación de la EUPS en su forma original o revisada, combinadas con SIG para la evaluación de la erosión hídrica bajo diferentes condiciones, de entre los que destacan los siguientes:

- SEMARNAT-CP (2003) indican que en el proyecto denominado “Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000”, se realizó una valoración directa en campo bajo la metodología de Evaluación de la Degradación del Suelos causada por el Hombre (conocida como ASSOD) en la cual se establece el tipo de degradación actual de los suelos, sus niveles de afectación, extensiones (superficie) que ocupan, tasas actuales que presentan y las causas que la originan, utilizando como mapa base la delimitación de sistemas terrestres, sobre los espaciomapas del INEGI. Bajo esta evaluación se encontró que para el estado de Hidalgo el 44.39% de su territorio presenta algún tipo de proceso de degradación los cuales se representaron de la siguiente manera: erosión eólica (5.42%), erosión hídrica (5.94%), degradación física (3.95%) y degradación química (29.08%).
- Loredo-Osti *et al.* (2007) en su trabajo denominado “*Predicción de riesgo a la erosión hídrica a nivel microcuenca*” evaluaron la erosión hídrica a través de la EUPS y los SIG en una microcuenca (Portezuelo) de San Luis Potosí, donde se determinaron cada uno de los factores asociados a la fórmula y una vez obtenidos los resultados se procedieron a evaluar los niveles de erosión que se presentaron, bajo esos valores obtenidos se dieron una serie de recomendaciones de manejo con la finalidad de determinar las acciones necesarias para mantener el recurso suelo.
- Montes-León *et al.* (2011) realizaron una investigación donde plasmaron un Mapa Nacional de Erosión Potencial, el cual fue construido utilizando la información más reciente disponible en el que pudieran evaluar los factores de la USLE que implica la erosión potencial, lo cual les permitiera identificar aquellas zonas del país más susceptibles a sufrir erosión, y de esta manera

implementar planes de manejo u algún otro tipo de medidas que mitiguen su efecto en los sitios donde la pérdida de suelo sea alta o extrema.

- Sánchez–Hernández *et al.* (2013) mencionan que su investigación tuvo como objetivo generar mapas temáticos de los factores que provocan la erosión en la cuenca Grijalva-Usumacinta, mediante la aplicación de le EUPS y la interpolación de los datos en un SIG en el cual se establecieron tres niveles de erosión (alto, medio y bajo) obteniendo como resultado que más del 50% de la cuenca tiene geoformas onduladas y escarpadas, suelos predominantemente someros, los cuales son fácilmente erosionables cuando se asocian a precipitaciones intensas. El mapa generado de erosión potencial de la cuenca indicó que más de 7 millones de hectáreas (83%) presentan riesgo de erosión de medio a alto, acentuándose en la parte Centro y Suroeste.
- Vargas-Lomelín (2015) en su tesis de licenciatura estimó la erosión actual y potencial de la subcuenca de Sayula en el estado de Jalisco. Los valores de erosión actual que encontró fueron de un rango de 0 a 46.21 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y los correspondientes a erosión potencial estuvieron entre las 9.17 a 96.47 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con distribuciones variadas dentro del área. Bajo los resultados obtenidos menciona que algunas áreas requieren acción inmediata para la realización de obras y prácticas de conservación de suelos, y debido a que la mejor manera de evitar la degradación de los suelos por erosión hídrica es la conservación de la cobertura vegetal, recomienda el acompañamiento con reforestaciones de planta nativa y propia del tipo de vegetación de la zona, además de un análisis de la erosión eólica para tener una idea más clara de la degradación de los suelos.
- González-Morales *et al.* (2018) bajo el modelo de la RUSLE, estimaron la tasa de erosión promedio en seis comunidades rurales en la Sierra Madre del Sur, Chiapas, donde sus resultados arrojaron tasas que van de las 28 a 717 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y de acuerdo a esto mencionan que los valores tan altos están asociados a una alta erosividad pluvial y pendientes pronunciadas, además de que muchas de las tasas más altas de erosión se encuentran en comunidades que

están dominadas por bosques pero de donde se ha eliminado la mayor parte de la cubierta arbórea. Y según datos de una encuesta CAP aplicada, más de la mitad de los encuestados cree que la reforestación es una opción viable para reducir la erosión del suelo, aunque también indicaron que los esfuerzos gubernamentales de reforestación se han visto obstaculizados.

- López-García *et al.* (2020) estimaron la erosión del suelo utilizando la EUPS y SIG en la localidad de Tzicatlacoyan, Puebla, donde sus resultados arrojaron que la localidad enfrenta riesgo de erosión del suelo con una tasa promedio anual de $117.18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, debido a factores naturales y actividades antropogénicas. Los resultados además indicaron que el 13.33% del territorio de Tzicatlacoyan presentan valores de pérdida de suelo superiores a los tolerables y de acuerdo a lo analizados mencionan que el modelo EUPS y los SIG podrían permitir a los usuarios de la tierra tomar mejores decisiones sobre el uso y conservación del suelo y ecosistema, agregando criterios científicos a sus conocimientos tradicionales.

4. JUSTIFICACIÓN

Hasta el momento no existen trabajos específicos en el estado de Hidalgo, incluyendo Santiago Tulantepec, que cuantifiquen la pérdida de suelo potencial y actual causada por erosión hídrica, de esta manera, en la presente investigación se efectuará un estudio en el área para calcular la cantidad de suelo que se pierde anualmente a causa de las lluvias, considerando cada uno de los factores integrantes de la EUPSR. Además, con los valores obtenidos para la superficie que comprende el municipio de Santiago Tulantepec, se propondrán una serie de obras y prácticas de conservación y restauración de suelo con la finalidad de controlar las pérdidas de suelo, y así evitar su degradación a corto, mediano y largo plazo.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es determinar el riesgo potencial y actual a la erosión hídrica del suelo en el municipio de Santiago Tulantepec, Hgo., a través de la EUPSR integrada a los SIG para identificar las zonas de mayor riesgo a la pérdida de suelo.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cada uno de los factores que comprenden el modelo de la EUPSR con ayuda de los SIG.
- Estimar la pérdida de suelo por efecto de la erosión hídrica en Santiago Tulantepec.
- Generar la cartografía de erosión hídrica potencial y actual de Santiago Tulantepec.
- Proponer obras y prácticas de conservación y restauración de suelos basadas en los niveles de erosión hídrica actual en el área de estudio.

6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pérdida de suelo por erosión es generalizada y reduce ampliamente la productividad de los ecosistemas naturales, agrícolas, forestales y de pastos, y al mismo tiempo con el crecimiento de la población humana, la erosión del suelo, la baja disponibilidad del agua, un cambio climático por consumo de combustibles fósiles y la pérdida de biodiversidad, se convierten en los principales problemas ambientales en todo el mundo (Pimentel & Burgess, 2013).

Según un estudio publicado por la FAO (2008) la degradación del suelo está aumentando con severidad y extensión en muchas partes del mundo, con más del 20% de las tierras agrícolas afectadas, 30% de los bosques y el 10% de los pastizales. La importancia de tomar a consideración estos datos, se debe a que cerca de 1,500 millones de personas (un cuarto de la población mundial) dependen directamente de suelos sujetos a degradación. (FAO, 2008)

Desafortunadamente, en México no existen los trabajos suficientes para la estimación de la erosión hídrica a corto y largo plazo y los existentes como el de la SEMARNAT-CP (2003) pueden generalizar los datos de erosión a nivel nacional, ya que se pueden presentar grandes subestimaciones o sobreestimaciones, a esto se le agrega el uso de metodologías donde solo se toman en cuenta algunas propiedades de los suelos ocasionando que se dejen fuera otras propiedades que también influyen en el fenómeno de erosión. Además, la información actualizada es muy limitada, por lo que la consideración de trabajos muy antiguos hace más difícil la correcta gestión del territorio y el aseguramiento de la productividad del suelo.

7. HIPÓTESIS

Los factores que componen la EUPSR pueden integrarse adecuadamente al software ArcGIS 10.8 para su determinación correcta y eficiente, de igual manera este permite la generación de mapas de distribución de la erosión, obteniendo como resultado que un alto porcentaje de la superficie del municipio de Santiago Tulantepec se encuentra bajo el régimen de riesgo medio y alto por erosión hídrica y con base en las estimaciones obtenidas permitirá hacer las propuestas de obras y prácticas de conservación y restauración de suelos.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para la caracterización de este estudio, se tomó como referencia el polígono que comprende el municipio de Santiago Tulantepec (Figura 1).

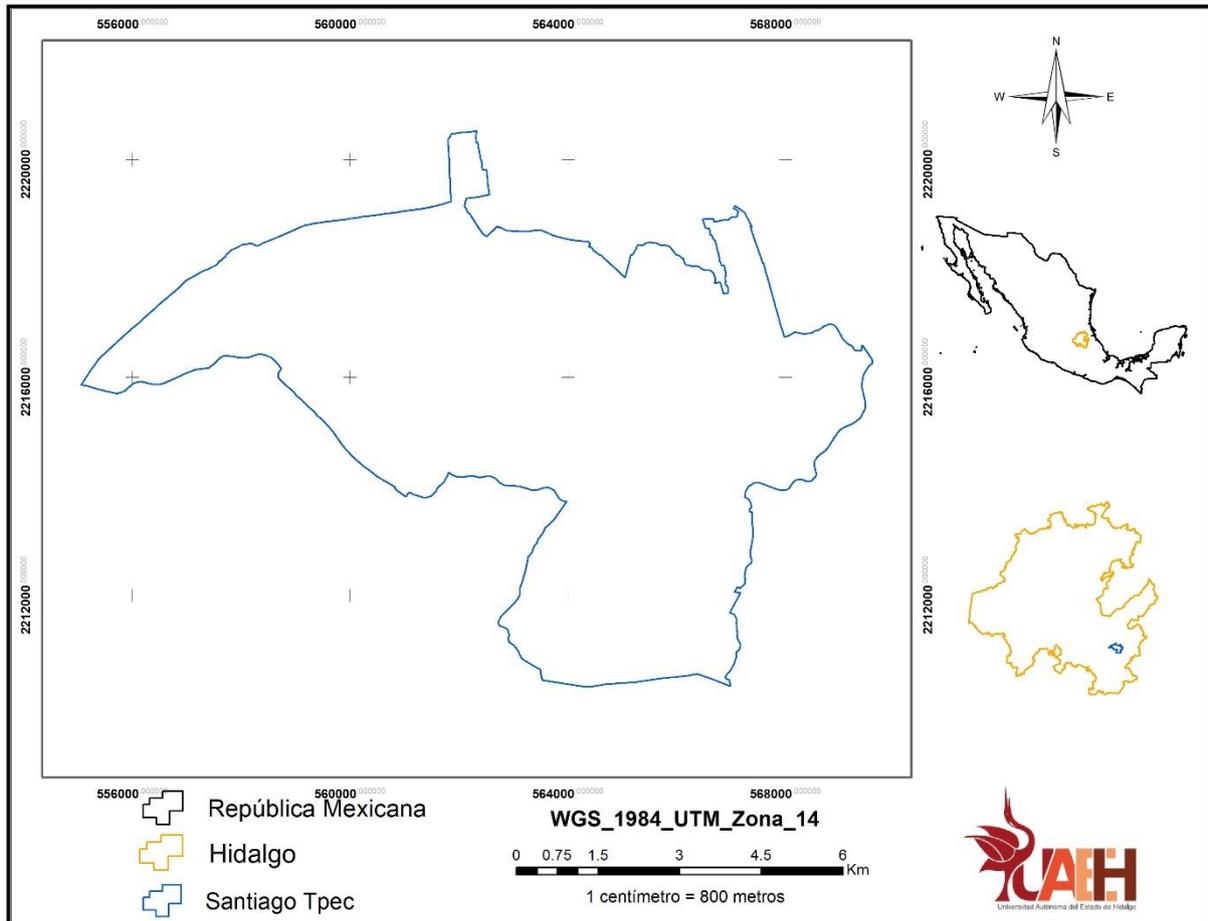


Figura 1. Polígono de Santiago Tulantepec.
Elaboración propia a partir del INEGI (2021a).

8.1.1 LOCALIZACIÓN

El municipio de Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero se localiza en la porción suroriental del estado de Hidalgo, entre los paralelos $19^{\circ} 59'$ y $20^{\circ} 05'$ de latitud norte y entre los meridianos $98^{\circ} 20'$ y $98^{\circ} 29'$ de longitud oeste (INEGI, 2009), cubriendo una superficie total de 64.25 km^2 , lo que representa solo el 0.31 % de la superficie total del estado de Hidalgo (INEGI, 2021a). Colinda al norte con el municipio de Tulancingo de Bravo, al este con el municipio de Cuautepéc de Hinojosa, al sur con los municipios

de Cuautepec de Hinojosa y Singuilucan y al oeste con los municipios de Singuilucan y Tulancingo de Bravo (INEGI, 2009).

8.1.2 FISIOGRAFÍA

La superficie que cubre el municipio de Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero se localiza en su totalidad dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. En esta región existen un sistema de lomerío (90%) combinado con una zona de valle (10%) (INEGI, 2009).

8.1.3 HIDROGRAFÍA

Santiago Tulantepec se ubica dentro de la región hidrológica RH 26 río Pánuco, subregión hidrológica alto Pánuco del río Moctezuma y la cuenca alta del río Metztlán. Presenta una corriente principal, representada por el río San Lorenzo (INEGI, 2009).

8.1.4 CLIMA

Con base en la clasificación climática de W. Köppen, adaptada a las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que un poco más del 99% del territorio del municipio presenta un clima de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y poco menos del 1% es de tipo semiárido templado con lluvias en verano (García & CONABIO, 1998). Además, presenta un rango de temperatura que va de los 12 a los 16 °C y precipitaciones que van de los 500 a los 900 mm (INEGI, 2009).

8.1.5 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

De acuerdo con los datos del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250,000, Serie VII del (INEGI, 2021b), en la Tabla 2 se muestran los tipos de uso de suelo y vegetación presentes en Santiago Tulantepec, así como su mapa de distribución dentro del municipio (Figura 2), de los cuales se puede destacar con mayor proporción zonas destinadas a uso agrícola (71.27%).

Tabla 2. Uso de suelo y vegetación de Santiago Tulantepec.

Uso de suelo y vegetación	Superficie (ha)	%
Agricultura	4,578.62	71.27
Bosque	758.86	11.81
Pastizal	21.89	0.34
Urbano	760.60	11.84
Vegetación secundaria	304.64	4.74
Total	6,424.61	100

Elaboración propia a partir del INEGI (2021b).

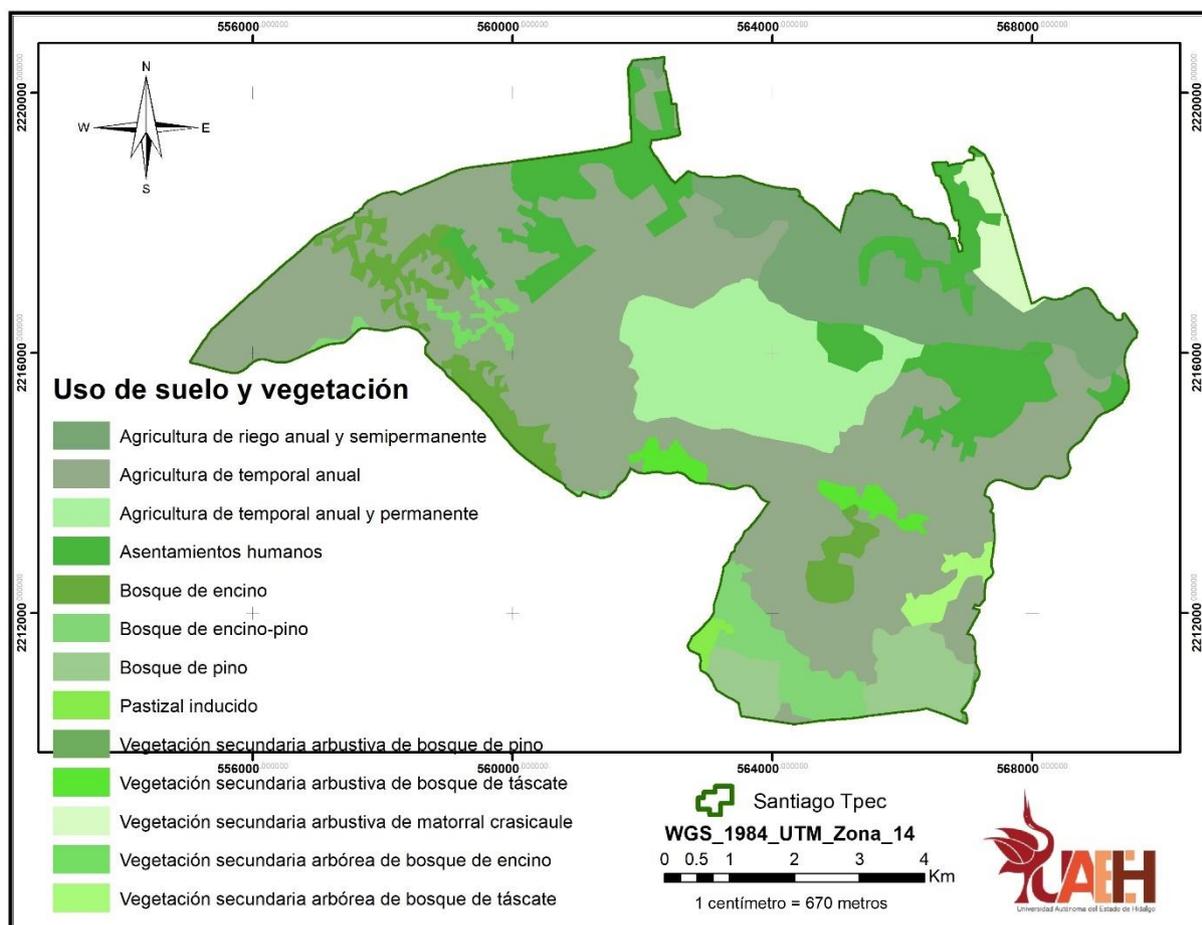


Figura 2. Mapa de uso de suelo y vegetación de Santiago Tpec.
Elaboración propia a partir del INEGI (2021b).

8.1.6 EDAFOLOGÍA

De acuerdo con información del Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1.250,000, Serie II (Continuo Nacional) del INEGI (2014), en la Tabla 3 se enlistan las

unidades de suelo que se encuentran en Santiago Tulantepec y distribuidas según lo que se puede observar en la Figura 3:

Tabla 3. Unidades de suelo de Santiago Tulantepec.

Unidad de suelo	Superficie (ha)	%
Cambisol	764.48	11.90
Feozem	570.34	8.88
Litosol	113.46	1.77
Luvisol	4,132.93	64.33
Vertisol	843.41	13.13
Total	6,424.61	100

Elaboración propia a partir del INEGI (2014).

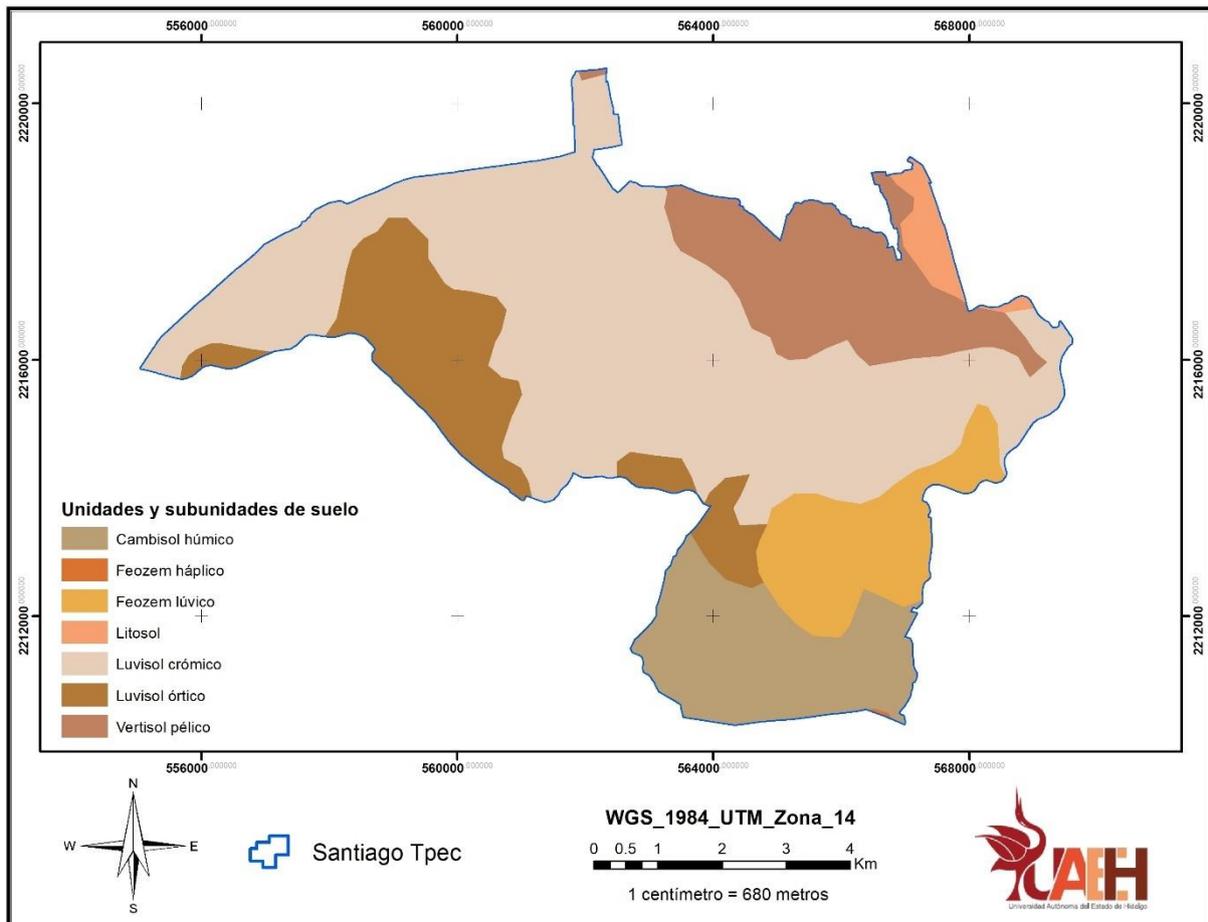


Figura 3. Distribución de las unidades de suelo en Santiago Tulantepec. Elaboración propia a partir del INEGI (2014).

8.2 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL

Para el cálculo de la erosión hídrica actual de Santiago Tulantepec, fue necesaria la aplicación de la estructura del modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (EUPSR/RUSLE) de Renard *et al.* (1997). La forma básica para el cálculo de la EUPSR se define de la siguiente manera:

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

Donde:

A = Pérdida de suelo media anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia-escorrentía ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

K = Factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

LS = Factor de longitud y de grado de la pendiente (adimensional)

C = Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P = Factor de prácticas de conservación/manejo (adimensional)

Para poder determinar el valor de la erosión hídrica actual se describen a continuación a detalle cada uno de los factores que integran el modelo de la EUPSR, proporcionando detalles sobre la información necesaria de entrada, así como las ecuaciones necesarias para obtener cada valor. Todos los datos requeridos para determinar el valor de los factores y las tasas de erosión actual del suelo se procesaron a través de sistemas de información geográfica (para este estudio se utilizó el software ArcGIS en su versión 10.8 (ESRI, 2019)) con la finalidad de obtener de manera factible la distribución espacial de la erosión hídrica de Santiago Tulantepec.

La delimitación del polígono referencial que corresponde al municipio de Santiago Tulantepec se generó a partir del área comprendida por el mismo municipio según datos del INEGI (2021a), el cual fue procesado en el software ArcGIS 10.8.

8.2.1 FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA-ESCORRENTÍA (FACTOR R)

El factor R (factor de tipo climático) representa para un área específica, la energía potencial que tiene la lluvia, así como su escurrimiento asociado para causar erosión (Montes-León *et al.*, 2011).

Desafortunadamente, para México y otras partes del mundo la información meteorológica sobre la intensidad de las lluvias se encuentra limitada, por ello se han desarrollado modelos empíricos alternativos para estimar los valores del factor R en función de otros parámetros de la lluvia (Santacruz-De León, 2011).

Existen variados métodos para estimar el factor R, entre ellos se encuentra la metodología propuesta por Cortés en 1991, la cual ha sido trabajada por autores como: Loredó-Osti *et al.* (2007), Montes-León *et al.* (2011) y Ordóñez-Rodríguez (2017). Cortés, a partir de modelos de regresión creó 14 regiones (Tabla 4) estadísticamente homogéneas para toda la República Mexicana (Figura 4), permitiéndole así calcular el factor R de un área estudiada (Loredó-Osti *et al.*, 2007).

Tabla 4. Ecuaciones regionales para la República Mexicana (Cortés, 1991).

Región	Ecuación	R2
I	$1.20785 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
II	$3.45552 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
III	$3.67516 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
IV	$2.89594 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
V	$3.48801 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
VI	$6.68471 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
VII	$(-0.03338) * P + 0.006661 * P^2$	0.98
VIII	$1.99671 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
IX	$7.04579 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
X	$6.89375 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
XI	$3.77448 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
XII	$2.46190 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
XIII	$10.74273 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
XIV	$1.500046 * P + 0.002640 * P^2$	0.95

Elaboración propia. Fuente: Loredó-Osti *et al.* (2007).

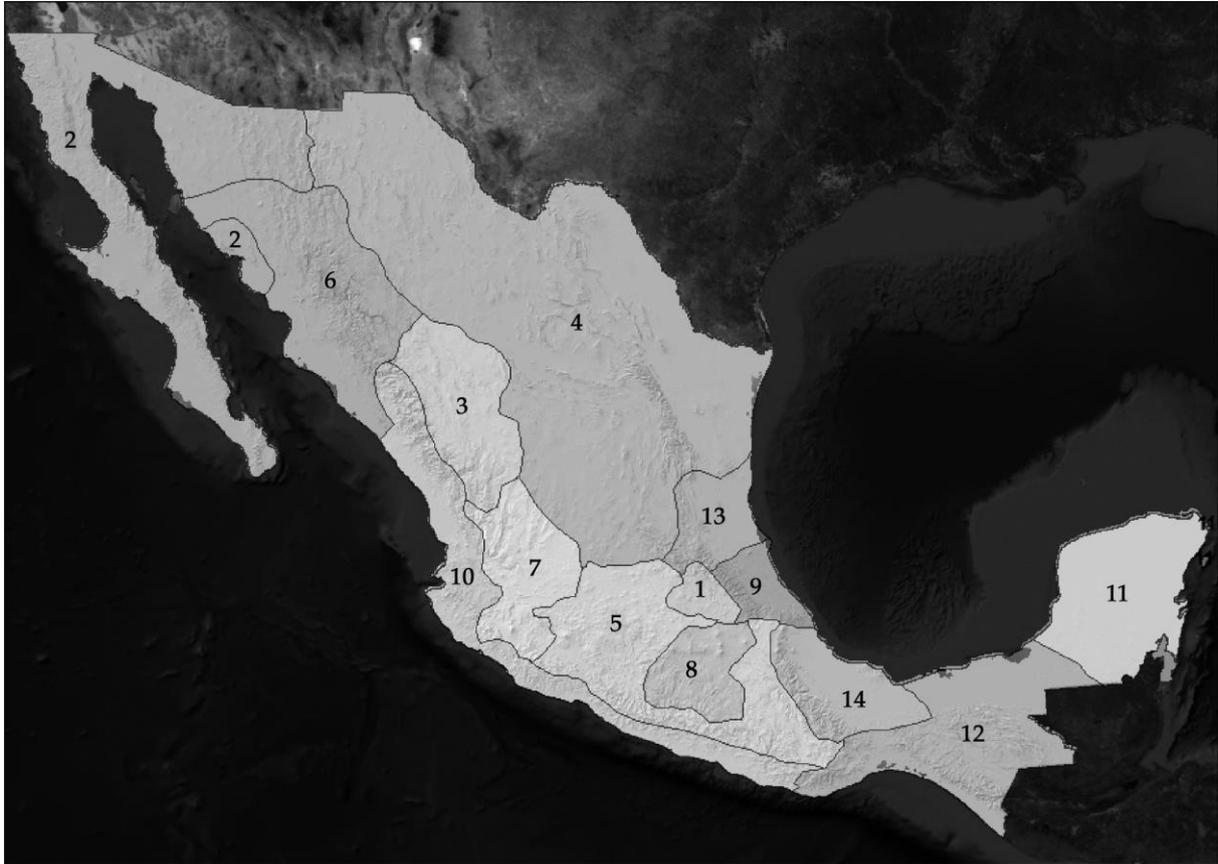


Figura 4. Regiones de México para el factor R (Cortés, 1991) en Montes-León *et al.* (2011).

El factor R para Santiago Tulantepec se determinó aplicando la ecuación perteneciente a la Región I de la metodología de Cortés (1991), esto se logró saber utilizando el mapa asociado a la misma, con la finalidad de lograr identificar la región de erosividad a la cual pertenece el área de estudio:

Región I:

$$R = 1.20785 * P + 0.002276 * P^2$$

Donde:

R= Factor de erosividad de la lluvia en MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹

P= Normal de precipitación media anual en mm

Posteriormente, se obtuvieron los datos pluviográficos de las estaciones meteorológicas (Tabla 5) ofrecidas por el Servicio Meteorológico Nacional, las cuales

contienen registros de precipitación de por lo menos 30 años (periodo 1951 – 2010), además se consideraron aquellas que presentaban un área de influencia sobre la distribución de la precipitación dentro y fuera del polígono de estudio (Figura 5).

Tabla 5. Precipitación media anual registrada en las estaciones meteorológicas con influencia en Santiago Tulantepec para el periodo 1951 – 2010.

Estación	Localización	X	Y	Altitud	Ppt
1	Santiago Tpec	566058	2216524	2179	588
2	La Esperanza	569597	2217829	2218	554.1
3	El Aserradero	570543	2206520	2610	755.2
4	Singuilucan	550948	2207651	2650	587.7
5	El Zembo	546328	2229187	2310	856.2

Elaboración propia a partir de la CONAGUA (s.f).

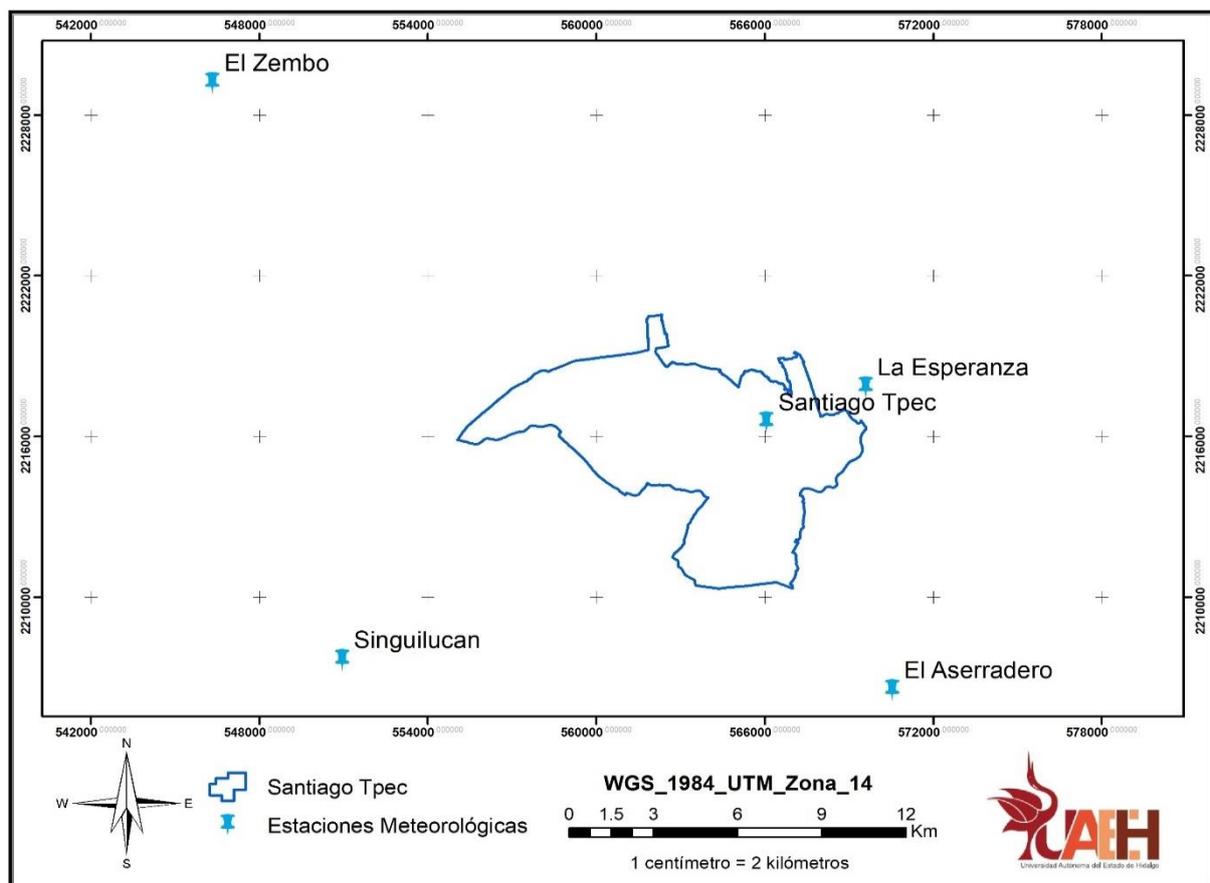


Figura 5. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas con influencia de precipitación en Santiago Tpec.

Una vez obtenidos los datos de las estaciones meteorológicas y según lo realizado por Pastrana-Ortiz, 2014, fue necesario realizar la interpolación bajo el método de interpolación *Kriging* a través del módulo *Geostatistical Analyst* de ArcGIS 10.8.

A continuación, mediante la ecuación asociada y el uso de la función *Map Algebra* de ArcGIS, se procedió a generar un mapa tipo *ráster* del factor R. Finalmente, mediante la herramienta *Reclassify* del software, se procedió a clasificar la erosividad de la lluvia de acuerdo a los valores recomendados por Rivera & Gómez (1991) (Tabla 6) citados por Castelán-Vega *et al.* (2014).

El procedimiento que se siguió se describe en el apartado “Anexo 1”.

Tabla 6. Clasificación de la erosividad de la lluvia para el valor de R según Rivera & Gómez (1991).

Clase	Erosividad R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹)	Clasificación
1	< 1,000	Natural
2	1,000 a 2,500	Muy baja
3	2,500 a 5,000	Baja
4	5,000 a 7,500	Moderada
5	7,500 a 10,000	Alta
6	10,000 a 15,000	Muy alta
7	15,000 a 20,000	Severa
8	> 20,000	Extremadamente severa

Elaboración propia a partir de Castelán-Vega *et al.* (2014).

8.2.2 FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K)

El factor K indica el grado de susceptibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión. La erodabilidad representa un valor promedio integral anual de la pérdida de suelo en respuesta a procesos de erosión e hidrológicos (Montes-León *et al.*, 2011).

Para el estudio de este factor se utilizó la metodología de la FAO (1980) citada en Salazar-Arrieta (2016), por lo que fue necesaria la información referente a los suelos, siendo así la misma que lleva por nombre Conjunto de datos vectoriales edafológicos,

escala 1:250,000, Serie II (Continuo Nacional) del INEGI (2014), de donde se obtuvo la información referente a las unidades y/o subunidades de suelo y su textura.

Con la finalidad de actualizar la textura presente a lo largo del área de estudio, se realizó un muestreo de suelos en cuadrantes de 1,000 m que permitieron obtener muestras representativas que incluyeran todos los tipos de uso de suelo y vegetación y sus diferentes inclinaciones a través del municipio. Las muestras de suelo tuvieron un peso de aproximadamente 150 g, las cuales fueron extraídas con ayuda de una barrena hueca, para posteriormente procesarlas a través del método de Bouyoucos (1962). Ya calculados los valores para cada cuadrante, se procedió a determinar su valor integrado en cada unidad y subunidad de suelo presentes en el municipio, teniendo en cuenta que más de la mitad de la superficie del cuadrante debió estar integrada para poder ser considerado y de este modo promediar los valores calculados anteriormente. Una vez obtenidos los promedios para los tipos de suelo, se clasificó la textura superficial en: gruesa, media o fina, de acuerdo a las recomendaciones de Castellanos-Ramos (2000) (Tabla 7), lo cual permitió determinar el valor del factor K según los valores asignados por la FAO (1980) (Tabla 8).

Tabla 7. Características de clasificación de textura (Castellanos-Ramos, 2000).

Textura	Contenido
Gruesa	> 50% arena y < 20% arcilla
Media	< 35-40% arcilla y < 50% arena
Fina	> 40% arcilla y > 60% limo

Elaboración propia a partir de Castellanos-Ramos (2000).

Tabla 8. Valores del factor K en función de su unidad y subunidad de suelo y su clase textural superficial (FAO, 1980).

Unidades y subunidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la FAO		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
Ap	Acrisol plíntico	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
B (v,x)	Cambisol (vértico, xérico)	0.053	0.079	0.026
C (h,k,l)	Chernozem (háplico, cálcico, lúvico)	0.013	0.020	0.007
D (d,g,e)	Podzoluvisol (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, plíntico, ócrico)	0.013	0.020	0.007
G	Gleysol	0.026	0.040	0.013
G (c,h,m)	Gleysol (calcárico, húmico, mólico)	0.013	0.020	0.007
G (d,e)	Gleysol (dístrico, éutrico)	0.026	0.040	0.013
G (p,x,v)	Gleysol (plíntico, gélico, vértico)	0.053	0.079	0.026
H (c,g,h,l)	Feozem (calcárico, gléyico, háplico, 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
J (d,e)	Fluvisol (dístrico, éutrico)	0.026	0.040	0.013
J (t,p)	Fluvisol (tiónico, plíntico)	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
La	Luvisol albico	0.053	0.079	0.026
Lc	Luvisol crómico	0.026	0.040	0.013
Lf	Luvisol férrico	0.013	0.020	0.007
L (g,k,o)	Luvisol (gléyico, cálcico, órtico)	0.026	0.040	0.013
L (p,v)	Luvisol (plíntico, vértico)	0.053	0.079	0.026
M (a,g)	Greysem (ácrico, gléyico)	0.026	0.040	0.013

N (d,e,h)	Nitosol (dístrico, éutrico, húmico)	0.013	0.020	0.007
O (d,e,x)	Histosol (dístrico, éutrico, gélico)	0.013	0.020	0.007
P	Podzol	0.053	0.079	0.026
P (f,g)	Podzol (férrico,gléyico)	0.053	0.079	0.026
Ph	Podzol húmico	0.026	0.040	0.013
P (o,p)	Podzol (órtico, plácico)	0.053	0.079	0.026
Q (a,c,f,l)	Arenosol (álbico, cámbico, ferrálico, lúvico)	0.013	0.020	0.007
R	Regosol	0.026	0.040	0.013
Re	Regosol éutrico	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
T (h,m)	Andosol (húmico, mólico)	0.013	0.020	0.007
T (o,v)	Andosol (ócrico, 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
W (d,e)	Planosol (dístrico, éutrico)	0.053	0.079	0.079
W (h,m)	Planosol (húmico, 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	Yermosol (háplico, cálcico, lúvico, gípsico,			
(h,k,l,g,t)	takírico)	0.053	0.079	0.026
Z	Solonchak	0.053	0.040	0.013
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 takírico	0.053	0.079	0.026

Elaboración propia a partir de Loredo-Osti *et al.* (2007).

Finalmente, obtenidos los valores de cada unidad de suelo con base en su clase textural, se procedió a crear el *ráster* correspondiente al factor K con ayuda del software ArcGIS.

En el apartado “Anexo 2” se indica el procedimiento aplicado.

8.2.3 FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE LA PENDIENTE (FACTOR LS)

Según Foster *et al.* (1977) citado en Melchor-Marroquín & Chagoya-Fuentes (2016, pág. 28) “la longitud (*L*) se define como la distancia horizontal entre los puntos donde inicia el escurrimiento hasta aquel donde decrece la pendiente y ocurre la sedimentación. El factor (*S*) representa el efecto de la inclinación en la erosión”.

Para determinar el factor LS fue necesario contar con el mapa topográfico de elevaciones tipo *ráster*, conocido como “Conjunto de Elevaciones Mexicano 3.0” (CEM 3.0) con un tamaño de pixeles de 15 x 15 m, en su versión más actual y sin errores de elevación, el cual se obtuvo a partir de datos del INEGI (2012). Para el cálculo del factor L y de acuerdo a las recomendaciones de Chadli (2016), de manera inicial fue necesario aplicar un relleno (conocido como *Fill* en ArcGIS) al modelo digital de elevación con la finalidad de evitar los posibles espacios vacíos en el mismo, posteriormente al *ráster* resultante y corregido se le determinó la dirección de flujo (herramienta *Flow direction* en ArcGIS) y al *ráster* originado se le calculó la acumulación de flujo (herramienta *Flow accumulation* en ArcGIS). Consecutivamente, se procedió a determinar el factor L, S y LS aplicando la metodología de Renard *et al.* (1997), bajo las diferentes adaptaciones para su correcto procesamiento en ArcGIS. (INEGI, 2012):

Factor L: Longitud de la pendiente

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{\beta}{\beta+1} \quad \beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{(3+\sin \theta)^{0.8}+0.56}$$

Donde:

λ = Longitud de la pendiente (m)

m = Exponente de la longitud de la pendiente (Foster *et al.*, 1977)

β = Pendiente a nivel de pixel (McCool *et al.*, 1989)

θ = Ángulo de la pendiente en radianes (multiplicar por 0.01745)

Con la finalidad de una correcta integración a través de los SIG y bajo la metodología de Desmet & Govers (1996), Velásquez (2008) propuso la siguiente fórmula y la cual fue aplicada para el cálculo del factor L:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde:

$A_{(i,j)}$ = Área aportadora unitaria a nivel de pixel

D = Tamaño del lado del pixel

m = Exponente de la longitud de la pendiente

x^m = Factor de corrección de forma (en sistemas pixelados es igual a 1)

Factor S: Grado de la pendiente:

Mediante la ecuación de (McCool *et al.*, 1987) se determinó el valor del factor:

$$S_{(i,j)} = \left\{ \begin{array}{ll} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{array} \right\}$$

Donde:

$B_{(i,j)}$ = Pendiente en grados (multiplicar por 0.01745)

Velásquez (2008) en Castro-Quintero *et al.* (2017) mencionó que cuando se aplican las fórmulas antes mencionadas en la función *Raster calculator* del software ArcGIS, se debe considerar que el ángulo de la pendiente deberá ser expresado en radianes dentro de éste, por lo que se debe aplicar su equivalencia matemática 1 grado sexagesimal = 0.01745 radianes, con la finalidad de que los valores de L y S puedan ser multiplicados por los componentes restantes de la EUPSR.

Finalmente, obtenidos los valores de L y S se aplicó la fórmula de dicho factor de acuerdo a las recomendaciones de Renard *et al.* (1997) para así obtener el resultado final de la distribución de LS:

$$LS = L * S$$

Donde:

L = Factor de longitud de la pendiente

S = Factor de grado de la pendiente

El procedimiento que se siguió se describe en el apartado “Anexo 3”.

8.2.4 FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (FACTOR C)

El factor C hace referencia a la capacidad que tiene la vegetación para amortiguar el efecto del desprendimiento de partículas de suelo por las gotas de lluvia e impedir el arrastre de sedimentos a causa del escurrimiento superficial (Melchor-Marroquín & Chagoya-Fuentes, 2016). El valor que toma C es la unidad, a medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor que toma C es cada vez menor, es decir, 0 para terrenos totalmente protegidos y 1 para terrenos sin ninguna protección (Montes-León *et al.*, 2011).

Para el cálculo de este factor fue necesario el mapa de Uso de suelo y vegetación serie VII del INEGI (2021b), al cual se le realizó una actualización de distribución y superficies a través del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 del año 2021, procesadas en el software ArcGIS. Una vez obtenidos los datos de cobertura y uso de suelo, se determinaron los valores asociados al valor de C con base a información generada por diversas bibliografías (Figuroa *et al.*, 1991; Becerra, 1999; Renard *et*

al., 1997; Montes-León *et al.*, 2011; Pastrana-Ortiz, 2014; Flores-Islas, 2016; Ordóñez-Rodríguez, 2017; Cordero-Rebolledo, 2022), y con la mayor similitud a las condiciones actuales resultantes. De igual manera y debido a que el estudio del factor C en el área evaluada es nula, se adaptó a los sistemas y condiciones similares de la vegetación existente.

Las nuevas áreas y valores asignados se procesaron en el software ArcGIS para obtener el mapa *ráster* del factor C, según su clasificación, distribución y los datos correspondientes al uso de suelo y vegetación.

En el apartado de “Anexo 4” se podrá verificar el procedimiento aplicado.

8.2.5 FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN/MANEJO (FACTOR P)

Éste último factor que integra la EUPSR representa la relación existente entre la pérdida de suelo y una práctica de apoyo específica en la que la erosión se ve afectada al modificar el patrón de flujo o al reducir la cantidad y tasa de escorrentía. El valor toma rangos que van de 0 a 1, donde 1 representa la inexistencia de una práctica de apoyo (Peri, 2017).

Algunas prácticas de soporte que se consideraron en la evaluación del factor P para áreas cultivadas son: surcado al contorno (comprende laboreo, siembra y plantación siguiendo las curvas de contorno o nivel), cultivos en faja, terraceo y establecimiento de obras de drenaje subsuperficial. Además, para la asignación de valores se tomó como referencia lo expuesto por Wischmeier & Smith (1978) (Tabla 9).

Tabla 9. Valores del factor P para las diferentes prácticas.

Pendiente (%)	Surcado al contorno	Franjas al contorno	Terraceo
1 a 2	0.40*	0.20*	0.08*
3 a 8	0.50	0.25	0.10
9 a 12	0.60	0.30	0.12
13 a 16	0.70	0.35	0.14
17 a 20	0.80	0.40	0.16
21 a 25	0.90	0.45	0.18

*Los valores fueron modificados, al considerar un error de expresión.

Para obtener los valores asociados al factor, fue necesario contar con información acerca de las obras o prácticas de conservación de suelo aplicadas en el área de estudio, y de manera enfocada solo a zonas de cultivo (según las áreas actualizadas en el factor C), debido a que no se obtuvo información referente a obras aplicadas en otras áreas. Una vez obtenida la información, se procedió a asignar el valor correspondiente, para posteriormente generar el mapa de distribución del factor P a través del software ArcGIS. Cabe mencionar, que en las superficies donde no existió obra o práctica alguna, se tomó el valor de prácticas igual a 1.

En el apartado “Anexo 5” se desarrollan los pasos seguidos para el cálculo del factor.

8.2.6 CÁLCULO FINAL DE LA EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL

Con la obtención de la información en mapas tipo *ráster* de cada factor que comprende la EUPSR, se multiplicaron los valores mediante la función *Map algebra* del software ArcGIS, de acuerdo a lo recomendado por Vargas-Lomelín (2015), aplicando la fórmula asociada a la erosión hídrica actual según Renard *et al.* (1997) y finalmente se procedió a la clasificación de las áreas en función de las clases de erosión propuestas por la FAO (1979) (Tabla 10).

Tabla 10. Clases de riesgo a la erosión hídrica actual según la FAO.

Riesgo	Erosión hídrica actual (Mg ha⁻¹ año⁻¹)
Bajo	< 10
Moderado	10 -5 0
Alto	50 – 200
Muy alto	> 200

Elaboración propia a partir de Chadli (2016).

El “Anexo 6” contiene los detalles del proceso aplicado.

8.3 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL

Para el cálculo de la erosión hídrica potencial de Santiago Tulantepec fue necesaria la aplicación de la estructura del modelo de la EUPS, al utilizar únicamente los factores R, K, L y S según Wischmeier y Smith (1978), expresada como:

$$A = R * K * L * S$$

Donde:

A = Pérdida de suelo potencial media anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia-escorrentía ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

K = Factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

L = Factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S = Factor de grado de la pendiente (adimensional)

De esta manera, una vez calculados los valores conforme a lo establecido para cada uno de los factores de la EUPSR, se utilizó solo la información de los factores que implican la erosión hídrica potencial (R, K y LS) para posteriormente generar el mapa de distribución acorde a lo mencionado en el apartado del cálculo de la erosión hídrica potencial.

Y finalmente, se procedió a categorizar la erosión hídrica potencial de acuerdo a los rangos propuestos para este trabajo (Tabla 11), debido a que no existe una clasificación específica para las características de suelo que se presentan en México se tomaron las siguientes consideraciones que llevaron a determinar las categorías de clasificación para la erosión hídrica potencial:

1. Según lo mencionado por Porta-Casanellas *et al.* (2003), la tasa de formación del suelo varía para los distintos ambientes y conocerla puede resultar de interés, con la finalidad de determinar los niveles máximos de pérdida de suelo por erosión, sin que el recurso desaparezca progresivamente. Teniendo en cuenta que, en casi todos los casos, la tasa de formación en años supera notablemente el número de años de vida del hombre, considerándose así, como un recurso no renovable a corto plazo.

De acuerdo con los autores, la tasa de formación para aquella formación considerada como “Muy rápida (sobre cenizas volcánicas y clima húmedo)” y “Muy lenta (sobre calizas duras y clima templado-frío)” toma un aproximado de <100 y <5,000 años/cm respectivamente.

2. La SEMARNAT (2016), indica que 3 de los 6 grupos de suelo dominantes que en conjunto representan el 51.7% de la superficie de suelos en México han aumentado su uso destinado a la agricultura a pesar de sus características desfavorables para la misma. Ante ello, hace referencia a que los Leptosoles presentan severas limitaciones para permitir enraizar a las plantas, debido a su poca profundidad, los Regosoles son suelos considerados jóvenes, por lo que tienen poco o nulo desarrollo del perfil, mientras que los Calcisoles contienen altos niveles de concentración de carbonato de calcio.
3. De acuerdo con los datos obtenidos a partir del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2015-2020 y los rangos de profundidades del suelo de la CONAFOR, la profundidad promedio del suelo para selvas oscila de los 24.4 a 27.2 cm (suelos considerados como someros), para los bosques de 21.6 a 45.1 cm (suelos someros y medianos), mientras que en las zonas áridas va de 18.3 – 21.5 cm (suelos someros) y los manglares presentan un valor de 63.4 cm (suelos profundos) (CONAFOR, 2018b; CONAFOR, 2020).
4. Se puede considerar que 1 mm de espesor de suelo es equivalente a 10 Mg ha⁻¹ de suelo (CONAFOR, 2012). Siempre y cuando la densidad aparente para el suelo presente de referencia tenga un valor igual a 1.
5. La erosión del suelo en tierras agrícolas actualmente es estimada de 10 a 20 veces (sin labranza) a más de 100 veces (labranza convencional), superior a la tasa de formación del suelo (IPCC, 2019).

Tabla 11. Categorías de clasificación de la erosión hídrica potencial

Pérdida de suelo (Mg ha⁻¹ año⁻¹)	Riesgo
< 2	Nulo
2 – 10	Bajo
10 – 25	Moderado
25 – 50	Severo
> 50	Extremo

Elaboración y fuente propia.

Las categorías propuestas consideran las aseveraciones de los autores listados anteriormente, las cuales permiten considerar una pérdida tolerable de suelo sin la

presencia de vegetación u obras/prácticas de conservación de suelos, pero que a corto plazo aseguran el mantenimiento de su productividad, aún posterior a su eliminación de aporte de nutrimentos (por aporte constante de materia orgánica) o la ejecución de obras/prácticas de conservación de suelos.

En el “Anexo 7” se describen los pasos seguidos para el cálculo de la erosión hídrica potencial.

8.4 METODOLOGÍA PARA PROPONER OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

El poder contar con un mapa de erosión hídrica en el ámbito local ayudará a identificar las zonas donde es necesaria la implementación de un plan de manejo en el cambio de uso de suelo, así como ubicar las zonas donde se requiera un estudio más detallado, entre otras (Montes-León *et al.*, 2011).

De acuerdo con Kirkby & Morgan (1984) citados en Loredó-Ostí *et al.* (2007) las medidas de conservación del suelo deben incluir cuatro acciones básicas:

1. Proteger el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia.
2. Incrementar la capacidad de infiltración con la finalidad de reducir el escurrimiento superficial.
3. Mejorar la estabilidad de los agregados del suelo para hacerlo más resistente a la erosión por salpicamiento.
4. Aumentar la rugosidad de la superficie para reducir la velocidad del escurrimiento.

Bajo estas medidas, las recomendaciones de manejo girarán en torno a las prácticas de manejo, conservación y restauración, dependiendo de la clase de suelo, su uso actual y potencial y el riesgo a la erosión. También será importante considerar cuales son las prácticas para el manejo eficiente del suelo de acuerdo a su capacidad de uso y riesgo a la erosión (Loredó-Ostí *et al.*, 2007), tomando en cuenta las características y funciones de cada obra y práctica presentadas en el Manual de obras y prácticas de la CONAFOR (2018a).

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 FACTOR R

De acuerdo a los procesos aplicados y la fórmula asociada a la Región I de la metodología de Cortés (1991), en Santiago Tulantepec los valores relacionados al factor de erosividad de la lluvia toman un rango que oscila entre los 1,422.24 y los 1,804.52 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (Figura 6), el cual y de acuerdo con la clasificación de Rivera & Gómez (1991) en Castelán-Vega *et al.* (2014) se encuentra en el rango de “erosividad muy baja”.

Esta erosividad presentó una tendencia ascendente comenzando por la parte noreste del municipio, en aquellos lugares donde los datos de las estaciones meteorológicas indicaron valores de precipitación menor (La Esperanza y Santiago Tpec.), dirigiéndose hacia dos zonas principales, donde se tienen los registros de lluvia más altos, una de ellas en la posición oeste con valores de R mayores a las antes mencionadas (Singuilucan y El Zembo), y la otra con valores aún más altos en la parte sureste, colindante con la estación meteorológica de El Aserradero.

Los valores obtenidos y la tendencia de erosividad de las lluvias es comparable con los resultados de otras investigaciones realizadas bajo la metodología de Cortés (1991) y con las condiciones de clima y/o precipitaciones similares. Para dar pauta a estas, se puede hacer referencia a autores como: Flores-López *et al.* (2003), quienes encontraron un valor de 4,475 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ en la región VII y precipitación de 822.1 mm; Prado-Hernández *et al.* (2017) calcularon dentro de la microcuenca El Malacate en la región V un valor de R de 2,163.2 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ en 769.6 mm de precipitación; mientras que López-García *et al.* (2020) en la región II para la Mixteca Poblana encontraron valores de 1,065 a 1,348 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹.

Es notable que la distribución de la erosividad en el área de estudio está estrechamente relacionada con la topografía del terreno y la vegetación existente, es decir, las partes bajas con distribución de pastizales, asentamientos humanos y áreas agrícolas presentan menor susceptibilidad a la erosividad, comparadas con las partes altas de un bosque templado de pino y/o encino, donde la vegetación permite la reducción de los efectos erosivos de las precipitaciones, que según los datos

encontrados, estas se distribuyen en mayor cantidad en las áreas boscosas o cercanas a las mismas.

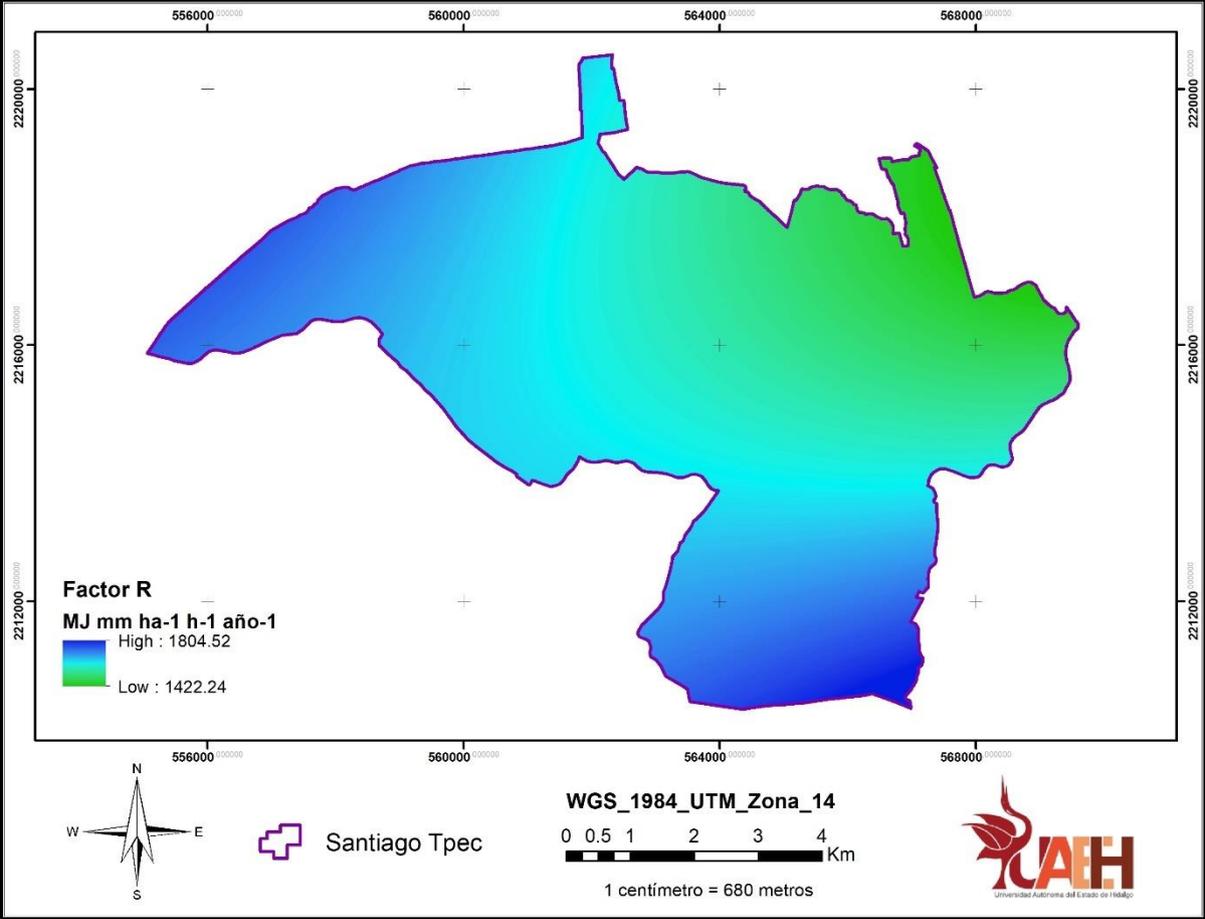


Figura 6. Mapa de distribución del factor R en Santiago Tlaxiaco.

9.2 FACTOR K

Según la metodología de la FAO aplicada para este factor, la clase textural resultante durante su actualización, las unidades/subunidades de suelo presentes en el área muestreada y lo representado en su mapa de distribución (Figura 7), los valores de K van de los 0.013 a 0.079 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, esto debido a que, según los promedios obtenidos para los sitios considerados dentro de cada unidad/subunidad determinantes de la textura para los suelos, arrojaron que, 6 de las 7 subunidades presentaron textura media con sus valores más altos y solo la unidad Litosol presentó textura gruesa y con el valor más cercano a 0 (0.013 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹) el cual solo representa el 1.77% de la superficie total.

Existen una gran variedad de trabajos que utilizan la metodología de la FAO y al no tenerse la información detallada, como alternativa para obtener datos más cercanos a la realidad, una gran variedad de autores tales como: Santacruz-De León (2011); Montes-León *et al.* (2011); Pastrana-Ortiz (2014); Pedraza-Villafaña (2015); Melchor-Marroquín & Chagoya-Fuentes (2016); Flores-Islas (2016); López-García *et al.* (2020), tomaron como referencia la metodología antes mencionada, ya que de manera original, la de mayor aplicación es la realizada por Wischmeier & Smith (1978), donde tomaron en cuenta propiedades como: contenido de materia orgánica, contenido de arenas, limos, estructura, permeabilidad, etc.

De acuerdo con los valores de K obtenidos según su unidad de suelo y clase textural, se puede decir que aquellos suelos de tipo luvisol y por su uso de suelo actual (agrícola) presentan mayor susceptibilidad a la erosión, ya que de acuerdo con Zamudio & Méndez (2011) los suelos agrícolas tienden a degradarse a causa de las precipitaciones y que además si estos se presentan compartiendo pastizal inducido. Aunque de manera general y comparado con lo encontrado por López-García *et al.* (2020) en su trabajo, la erodabilidad del suelo sugiere altos niveles de erosión.

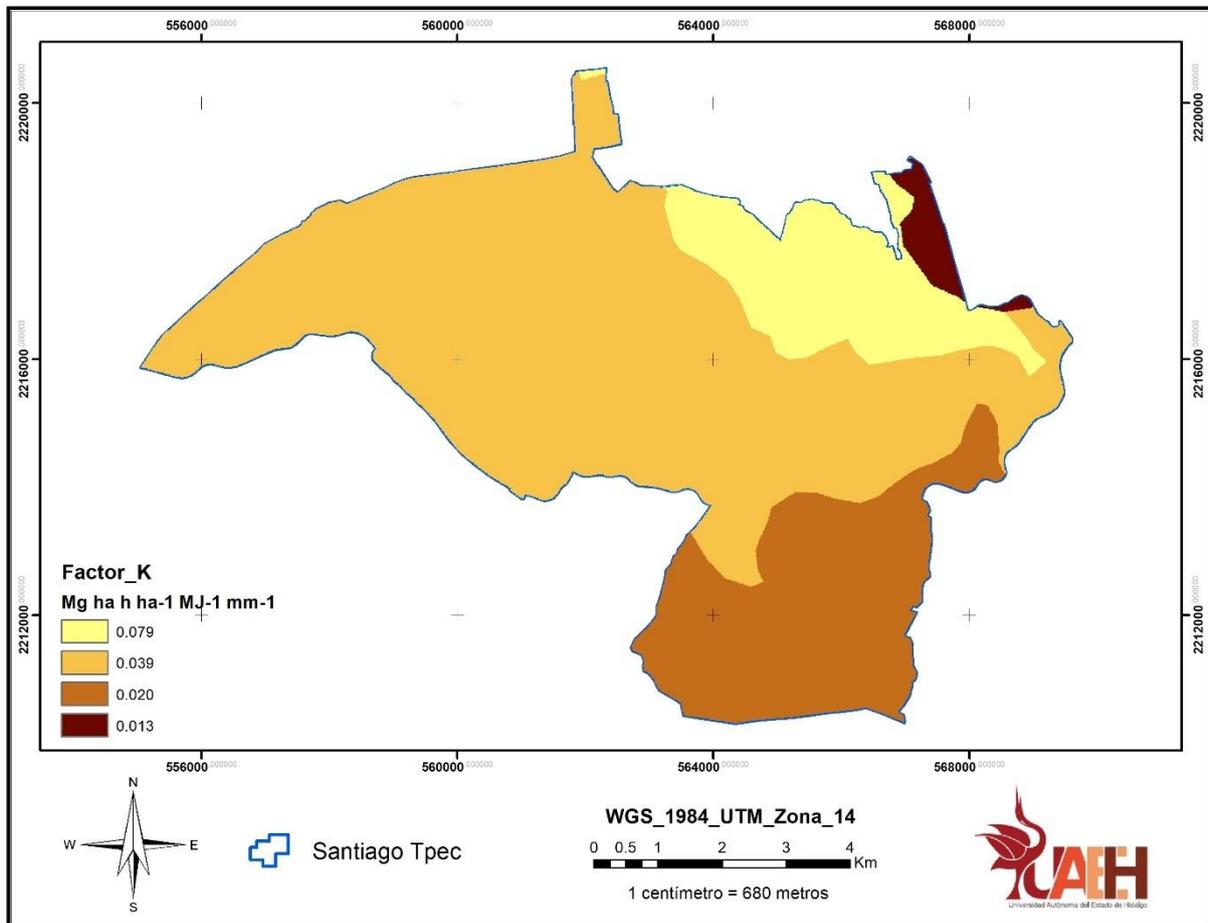


Figura 7. Mapa de distribución del Factor K para el municipio de Santiago Tpec.

9.3 FACTOR LS

De acuerdo a los procesos aplicados al Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 con una resolución de 15 m por pixel, se pudo determinar la altitud que presenta el municipio de Santiago Tulantepec, la cual indica que esta se encuentra dentro del rango de los 2,152 a 2,731 m y de acuerdo a su mapa de distribución (Figura 8) se puede denotar que la parte norte, centro y sureste del municipio presenta los valores más bajos, la cual colinda en su mayor proporción con el municipio de Tulancingo de Bravo, de igual manera se observa que la altitud aumenta conforme se dirige hacia la parte oeste colindante con el municipio de Singuilucan, presentando sus valores máximos en la zona sur (también colindante con Singuilucan y además, con Cuauhtepc de Hinojosa).

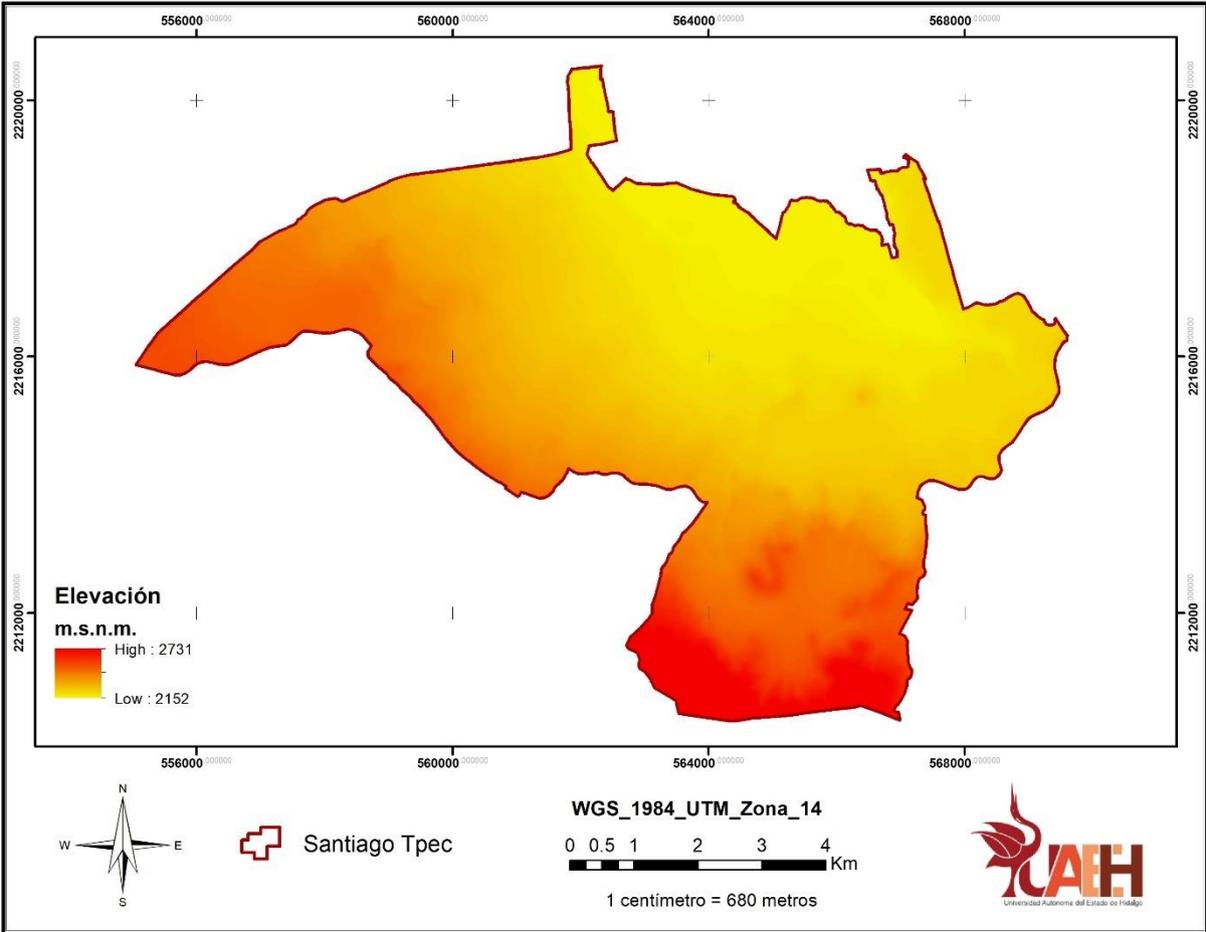


Figura 8. Mapa de distribución de altitudes del municipio de Santiago Tpec.

Como se observa en el mapa de distribución de las pendientes del terreno (Figura 9) que se localizan en el municipio, estas toman valores en un rango de 0 a 79%, las cuales en su mayor porcentaje se concentran en la zona sur del municipio y donde se encuentran las áreas con mayor altitud. De acuerdo con la Tabla 12 y la clasificación de Ramalho-Filho & Beek (1995), en el área de estudio, las pendientes se concentran entre el 0 y 8% (terreno plano y suavemente ondulado), lo que representa el 71.19% de la superficie total, esto a través de todas las direcciones, aunque se destaca de igual manera, la presencia de pendientes fuertes en la parte sur-sureste del municipio, que además revelan aquellas áreas de mayor susceptibilidad a la erosión debido al alto nivel de inclinación del terreno.

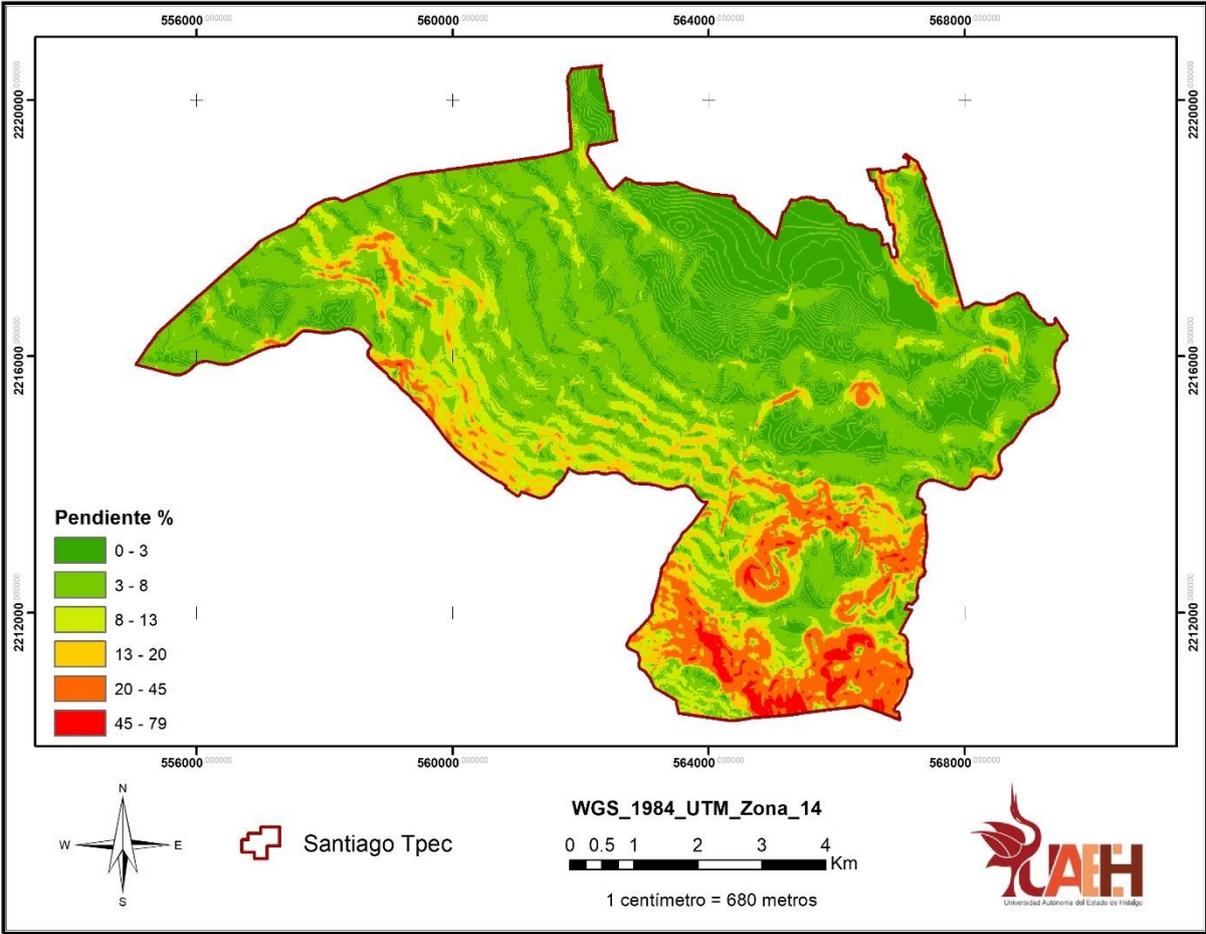


Figura 9. Mapa distribución de pendientes en porcentaje del municipio de Santiago Tpec.

Tabla 12. Tabla de porcentajes de área para cada rango de pendiente en Santiago Tpec.

Pendiente (%)	Clasificación	Superficie (ha)	%
0 – 3	Plano	2,605.36	40.55
3 – 8	Suavemente ondulado	1,968.63	30.64
8 – 13	Moderadamente ondulado	835.43	13
13 – 20	Ondulado	444.51	6.92
20 – 45	Fuertemente ondulado	492.90	7.67
45 – 100	Montañoso	77.78	1.21
	Total	6,424.61	100

Elaboración propia a partir de Ramalho-Filho & Beek (1995).

Aplicada la metodología de Renard *et al.* (1997) que describe el cálculo del factor LS y las adaptaciones realizadas para su aplicación en el software ArcGIS, se encontró que el rango del factor está dentro de los valores que van de 0 a 7, colocando a la categoría de 0 a 2 como dominante, al concentrarse en un 92% (Tabla 13) de la superficie total y consecuentemente distribuido por todo el municipio (Figura 10). Además, el mapa de distribución expresa que los valores de LS más altos se localizan en aquellas áreas donde se desarrollan las corrientes de agua, que de acuerdo con el CEM 3.0 son las partes encontradas como depresiones dentro del terreno. Es de importancia mencionar que los valores > 50 se localizan en puntos específicos de la superficie, lo que nos indica que existen áreas escarpadas, que además solo representan el 0.02% de la superficie estudiada.

Tabla 13. Tabla de porcentajes de área respecto a rangos del valor de LS para el municipio de Santiago Tpec.

Rango de LS	Superficie (ha)	%
0 – 2	5,915.09	92.07
2 – 4	359.93	5.60
4 – 7	115.63	1.80
7 – 10	12.37	0.19
10 – 50	20.41	0.32
> 50	1.17	0.02
Total	6,424.61	100

Elaboración propia.

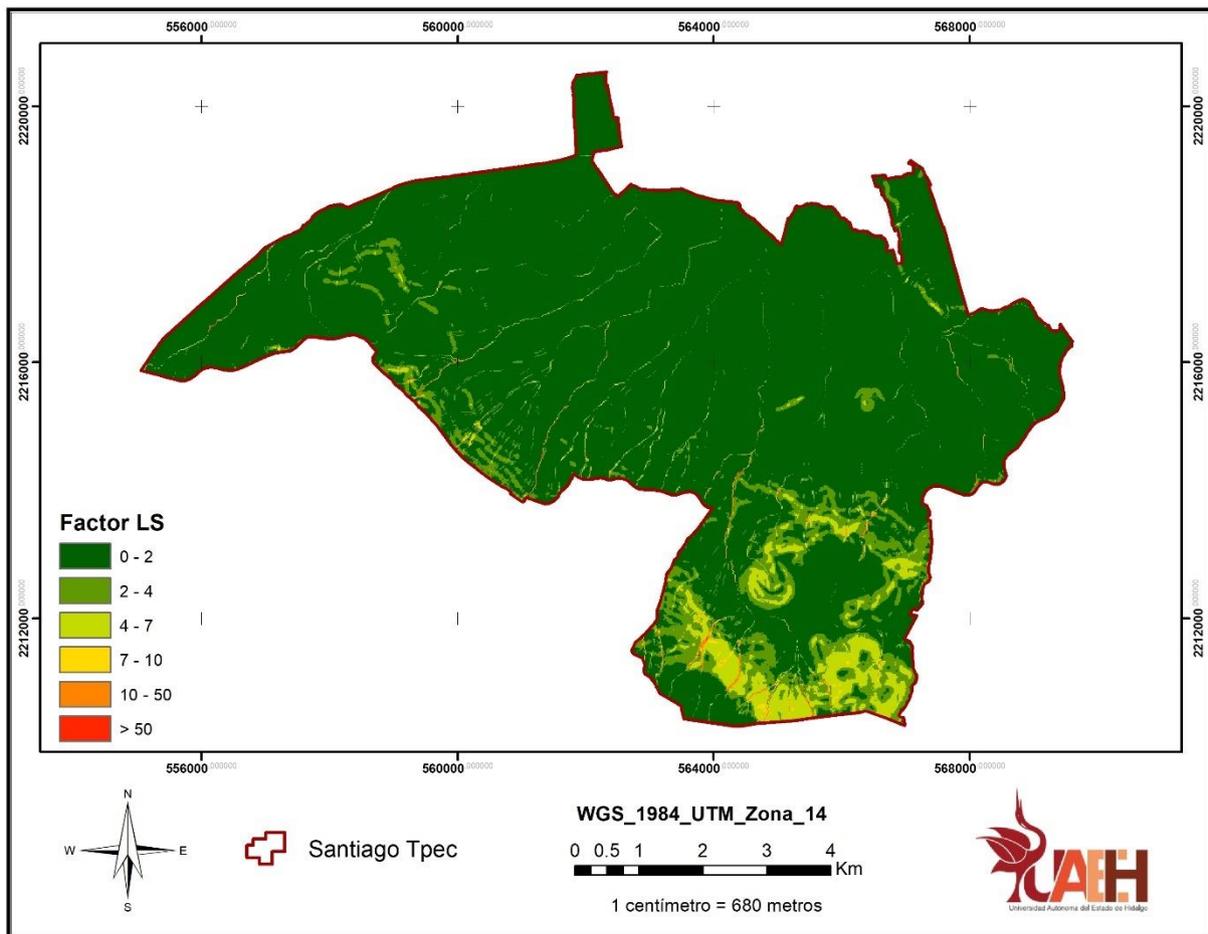


Figura 10. Mapa de distribución del factor LS para el municipio de Santiago Tpec.

Al comparar nuestros resultados con trabajos realizados bajo la misma metodología o metodologías similares como el de Montes-León *et al.* (2011,) en donde encontraron para la RH12 de la República Mexicana valores de LS de 0.029-19.365, mencionando que los valores más altos están asociados para aquellas zonas con mayor pendiente y los valores bajos se consideran como superficies planas. Mismo lo sucedido con el trabajo de López-García *et al.* (2020) en una localidad de Puebla, México obteniendo en sus cálculos valores de 0.03 en áreas planas y de 185 para regiones de montaña, que además representan zonas de gran potencial a la erosión. Un caso de igual metodología, realizado por Gomes *et al.* (2017) en el Cerrado Brasileño, indicó que alrededor del 93% del área total evaluada presenta valores de LS de 0-5 referidos como de moderada vulnerabilidad, mientras que el 2.69% presenta valores superiores a 10, catalogados como de alta vulnerabilidad a la erosión. Por ello, se puede considerar que, en aquellas áreas con mayor diferencia de elevación en longitudes cortas, gradientes de pendiente altos y terrenos abruptos (montañas y lomeríos), se presentó un mayor valor del factor LS, que consecuentemente expresa consigo una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica, debido principalmente a su alta facilidad de escorrentía.

9.4 FACTOR C

La actualización del mapa de uso de suelo y vegetación para el municipio, permitió observar y determinar los cambios para el uso de suelo (Figura 11), que, de manera inicial, están generalizados y agrupados bajo categorías diferentes a las reales dentro del uso de suelo y vegetación serie VII del INEGI, de este modo, se pueden observar grandes cambios según lo expresado en la Tabla 14, de entre los que resaltan una disminución de la superficie ocupada por agricultura (45%), el aumento sustancial de pastizales (9.61%) y una consideración importante de suelo destinado para caminos/carreteras (4.03%).

Tabla 14. Concentrado de usos de suelo y vegetación en Santiago Tulantepec para 2021.

Uso de suelo y vegetación 2021	Superficie (ha)	%
Agricultura	2,890.87	45.00
Asentamientos humanos	1,031.34	16.05
Bosque	1,143.60	17.80
Caminos/Carretera	258.89	4.03
Cuerpos de agua	35.04	0.55
Pastizal	617.31	9.61
Suelo desnudo/degradado	69.44	1.08
Vegetación secundaria	307.97	4.79
Otros usos	70.15	1.09
Total	6,424.61	100

Elaboración propia.

Con base en los datos obtenidos para el factor y de acuerdo con las referencias utilizadas para la asignación de valores según C y que mejor se adaptaron a las condiciones actuales (Tabla 15), se puede mencionar que este toma valores que van de 0.001 a 1, siendo los valores cercanos a 0 aquellos asignados a áreas boscosas (encontradas principalmente en la parte sur, así como en dirección este, aunque estas últimas, de menor cobertura) que permiten una alta protección al suelo debido a su cobertura vegetativa presente, así como de las áreas que de manera definitiva o casi definitiva cubren el suelo (asentamientos humanos urbanos y carreteras con 0.005 y

0.001 respectivamente), que a su vez ocupan poco más del 20% de la superficie municipal. Aunque sin dejar de mencionar las superficies ocupadas por asentamientos humanos de tipo rural con un valor asignado de 0.45, expresando un riesgo medio según la protección brindada al suelo (repartidos en las zonas sur, sureste y este, cercanas a las áreas boscosas de mayor pendiente) y para finalmente tener valores de 1 en los usos de suelo ocupados por caminos de índole rural, derechos de vía (oleoductos), suelos desnudos y áreas con degradación aparente, que en conjunto representan poco más del 5% de la superficie total del municipio (Figuras 11 y 12).

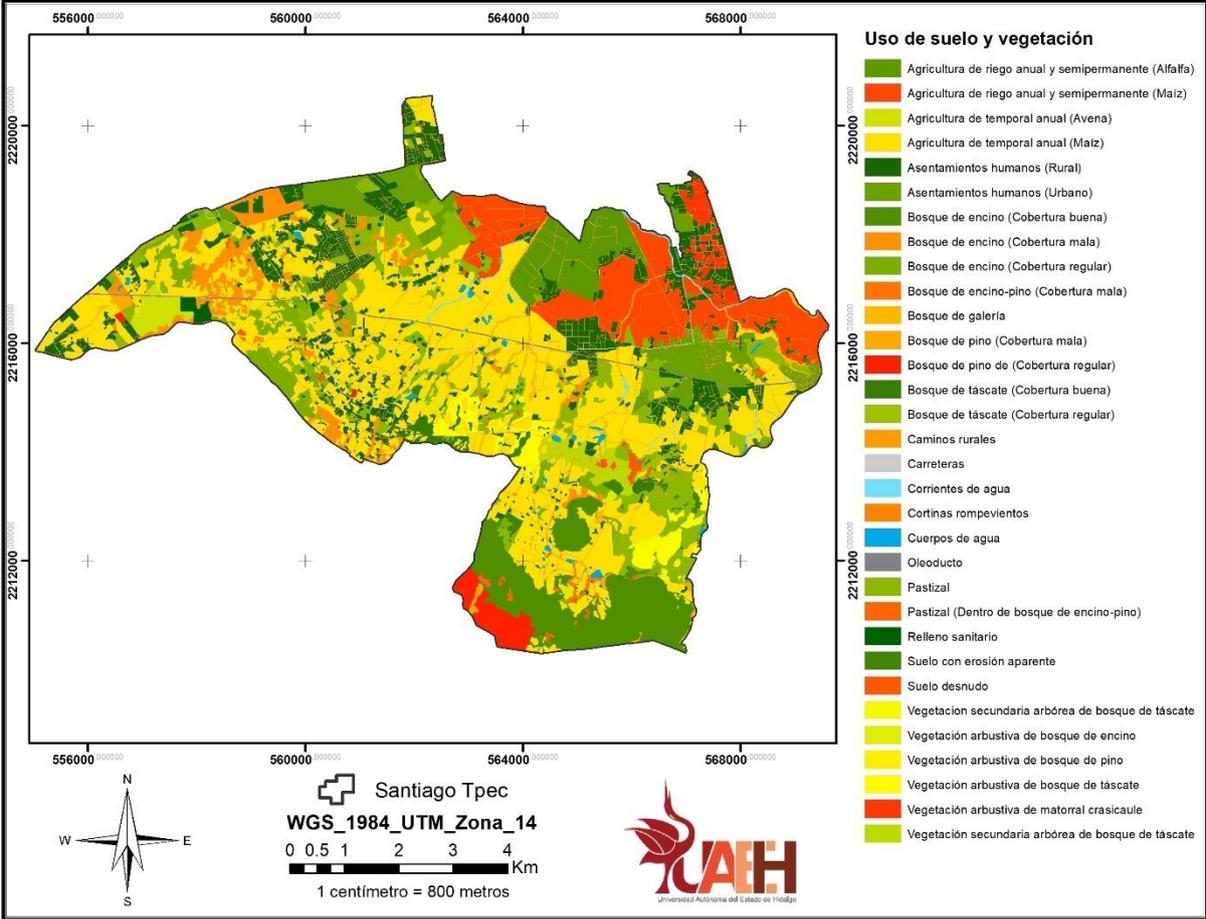


Figura 11. Mapa de uso de suelo y vegetación de Santiago Tulantepec actualizado para el año 2021.

Tabla 15. Valores asignados a la vegetación existente para el factor C según diferentes bibliografías.

Uso de suelo y vegetación 2021	Superficie (ha)	%	Valor C
Agricultura de riego anual y semipermanente (Alfalfa)	217.69	3.39	0.01
Agricultura de riego anual y semipermanente (Maíz)	550.77	8.57	0.03
Agricultura de temporal anual (Avena)	52.97	0.82	0.27
Agricultura de temporal anual (Maíz)	2,069.44	32.21	0.25
Asentamientos humanos (Rural)	711.96	11.08	0.45
Asentamientos humanos (Urbano)	319.37	4.97	0.005
Bosque de encino (Cobertura buena)	457.72	7.12	0.001
Bosque de encino (Cobertura mala)	255.02	3.97	0.006
Bosque de encino (Cobertura regular)	184.91	2.88	0.004
Bosque de encino-pino (Cobertura mala)	11.59	0.18	0.01
Bosque de galería	70.43	1.10	0.1
Bosque de pino (Cobertura mala)	19.23	0.30	0.005
Bosque de pino (Cobertura regular)	86.57	1.35	0.004
Bosque de táscate (Cobertura buena)	36.79	0.57	0.010
Bosque de táscate (Cobertura regular)	21.32	0.33	0.03
Caminos rurales	240.48	3.74	1
Carreteras	18.41	0.29	0.001
Corrientes de agua	22.32	0.35	0.08
Cortinas rompevientos	3.89	0.06	0.009
Cuerpos de agua	35.04	0.55	0.001
Oleoducto	27.26	0.42	1
Pastizal natural	607.90	9.46	0.13
Pastizal (Dentro de bosque de encino-pino)	9.41	0.15	0.08
Relleno sanitario regional	16.68	0.26	0.45
Suelo con erosión aparente	45.68	0.71	1
Suelo desnudo	23.77	0.37	1
Vegetación arbustiva de bosque de encino	15.95	0.25	0.08
Vegetación arbustiva de bosque de pino	3.54	0.06	0.08

Vegetación arbustiva de bosque de táscate	136.18	2.12	0.08
Vegetación arbustiva de matorral crasicaule	69.00	1.07	0.65
Vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate	83.30	1.30	0.03
Total	6,424.61	100	

En este sentido, se resalta la distribución de las áreas destinadas a la agricultura, las cuales, junto con las zonas de pastizales van ganando terreno frente a los bosques y su vegetación asociada, lo que indica un cambio de uso de suelo, acompañado de la extensión de los asentamientos humanos, que de forma agrupada representan casi tres cuartas partes de la superficie total del municipio.

Coincidiendo con lo mencionado por López-García *et al.* (2020), los valores de C confirman que el área de estudio ha sido fuertemente impactada por las actividades humanas (principalmente enfocadas a usos agrícolas y asentamientos humanos), que a su vez han ocasionado la degradación de los bosques. Aunado a ello, según lo señalado por Zamudio & Méndez (2011) la vulnerabilidad a la degradación del suelo según el tipo de cultivo se presenta en: hortalizas, frijol, maíz, mango y sorgo y comparado con lo obtenido en el estudio, las áreas agrícolas están destinadas principalmente al cultivo de maíz, indicando de este modo, una alta fragilidad al agente erosivo.

Finalmente, destacar la aplicación y combinación de los SIG y las imágenes satelitales, permite generar una clasificación supervisada y aplicada a un modelo elegido, como lo trabajado por Ghosal & Das Bhattacharya, (2020) y Kishore *et al.* (2019).

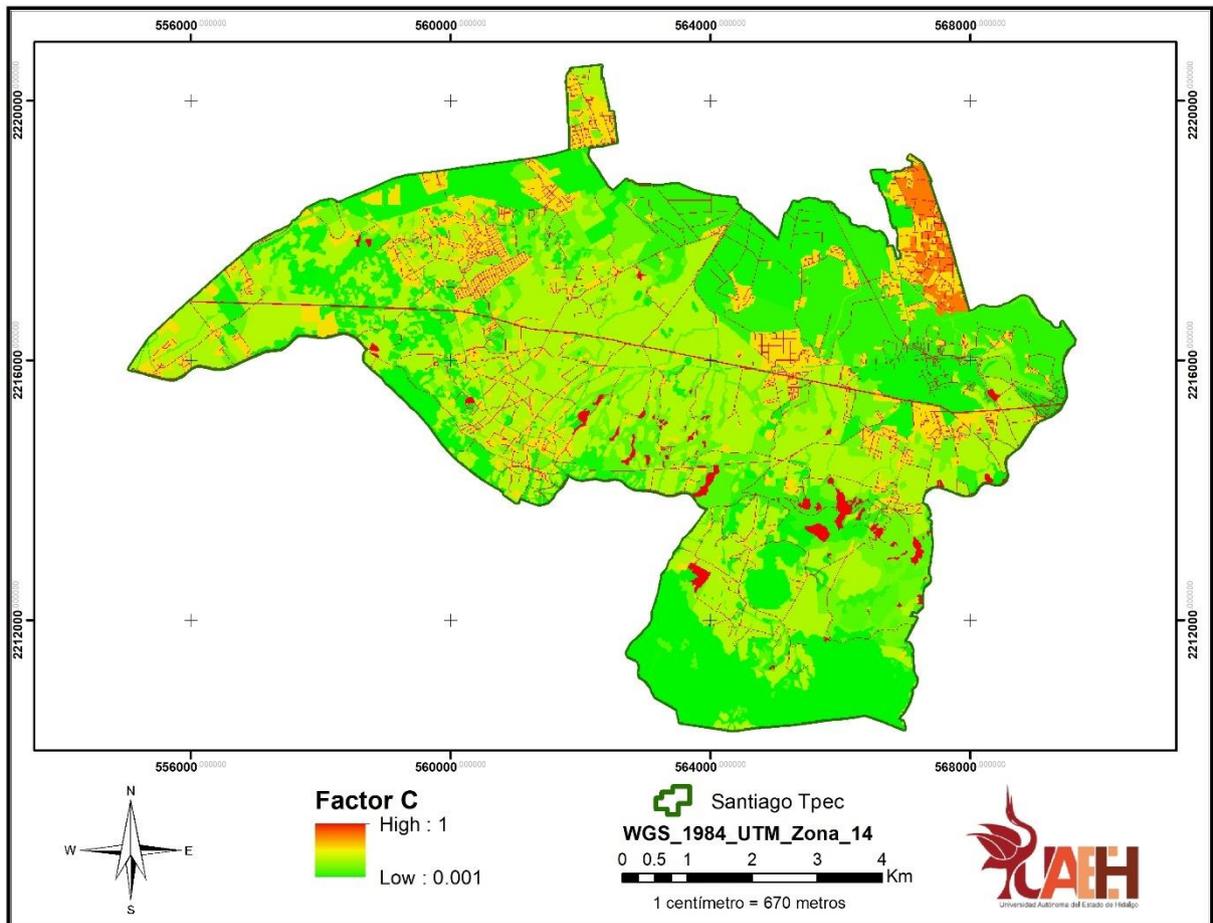


Figura 12. Mapa de distribución del factor C en Santiago Tlaxiaco.

9.5 FACTOR P

El cálculo de los valores para las obras/prácticas de conservación de suelo, solo tomaron relevancia en las áreas agrícolas destinadas a la producción de maíz, debido a que en cualquiera de los otros usos no se encontraron obras que permitieran su consideración dentro del estudio, por ello y de acuerdo con los valores para el surcado al contorno del terreno (práctica principal para el cultivo de maíz) en combinación con la pendiente presente y según lo expresado en la Tabla 16, se asignó un rango que va de 0.40 a 0.90 para las áreas dedicadas a la agricultura (maíz), de entre las que destaca el valor de P de 0.50 con el 31.67% del área de estudio y al resto de la superficie se le asignó un valor igual a la unidad con una ocupación superficial total del 59.22%.

Tabla 16. Valores del factor P para surcado al contorno y su superficie ocupada en el municipio.

Factor P	Superficie (ha)	%
0.40	182.88	2.85
0.50	2,034.91	31.67
0.60	289.71	4.51
0.70	70.97	1.10
0.80	7.72	0.12
0.90	34.02	0.53
1	3,804.40	59.22
Total	6,424.61	100

Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 13, de los valores que destacan en cuanto a su superficie ocupada e iniciando con el de 0.50, su distribución está prácticamente a través de todo el municipio con una concentración mayor en la parte central y en direcciones este y oeste. Continuamente, para el caso del valor asignado a 1, del mismo modo se presenta a través de todo Santiago Tulantepec, en el que la ausencia de obras/prácticas lo indican.

Desafortunadamente, son pocos los trabajos en los que se trabaja el factor P, debido a la ausencia de obras/prácticas de conservación que puedan ser consideradas para

su evaluación, esto lleva a asumir que la aplicación de alguna medida preventiva y/o correctiva para la conservación del suelo está limitada en la mayor parte de las áreas. Sin embargo, en trabajos como el realizado por Barrena-González *et al.* (2020) en España, se utilizó un valor de 0.92 para un área destinada a viñedo, con pendiente del 7.1%, una distancia entre surcos de 2.8 m y 1.5 m entre plantas adaptadas en valor a las condiciones dadas. Mismo procedimiento el realizado por Mukano *et al.* (2019), quienes utilizaron los valores propuestos por Wischmeier & Smith (1978) para su aplicación en la cuenca del río Ishim, Kazajistán en un área con mayor presencia agrícola (38.01%) y que de igual forma contempló el uso de valores para P de 0.50 a 1.

Ante la limitante en México, relacionada a la ejecución de obras/prácticas, Cordero-Rebolledo (2022) menciona que cuando estas son correctamente utilizadas se convierten en una opción viable para mitigar los efectos causados por la erosión.

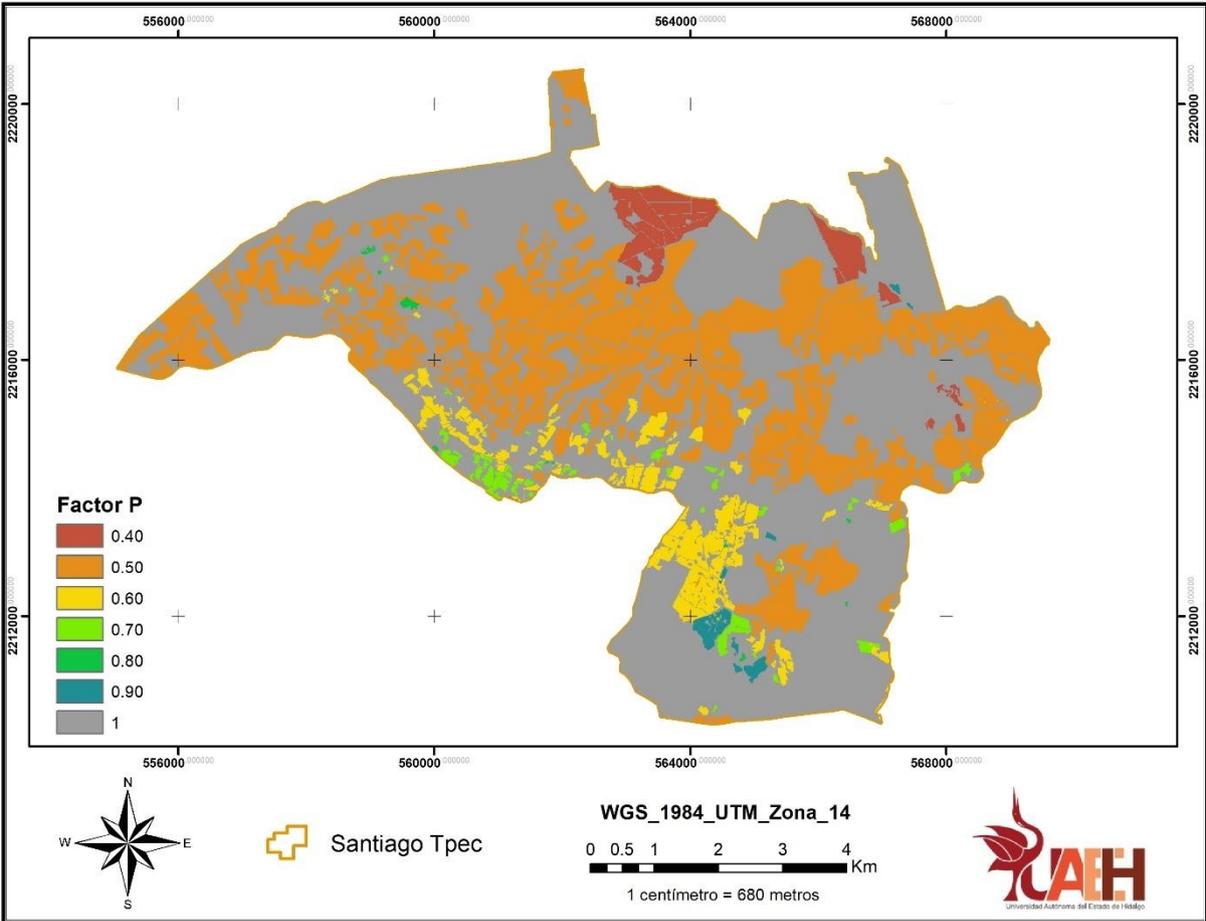


Figura 13. Mapa de distribución del factor P en Santiago Tulantepec.

9.6 EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL

De acuerdo con la metodología de Renard *et al.* (1997) para el cálculo de la erosión hídrica actual en el que se toman en cuenta cada uno de los factores desarrollados anteriormente (R, K, LS, C y P), como se observa en la Tabla 17, la erosión toma valores que van desde menos de 10 hasta más de los 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹. El riesgo clasificado como bajo que incluye pérdidas de suelo menores a 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹ representan la mayor expresión de la erosión en 83.11% de la superficie total, seguido por un riesgo moderado que ocupa 902.52 ha (apenas un 14.05%) para continuar con los riesgos alto y muy alto y de menor presencia al representar el 2.66 y 0.18% de la superficie respectivamente.

Ahora bien, según lo expresado en el mapa de distribución actual (Figura 14), el riesgo “bajo” se distribuye por todo el polígono que comprende el sitio de estudio, caso comparado con el de tipo “moderado”, el cual se encuentra principalmente en la zona este y sureste, combinando suelos con erosión aparente, desnudos y áreas de uso agrícola, valores de P de 0.50 a 1, pendientes de al menos 20% pero que en algunos casos pueden alcanzar el 45% de inclinación, además de ubicarse en áreas con precipitaciones mayores a las distribuidas en la parte baja del municipio.

Para valores de riesgo “alto” y “muy alto”, estos se localizan de manera puntual y contigua al riesgo moderado, pero bajo condiciones de pendiente mayores, que en combinación con la vegetación limitada le otorgan una mayor susceptibilidad a la erosión.

Tabla 17. Clasificación de la erosión hídrica actual según los niveles de riesgo propuestos por la FAO (1980) y su superficie ocupada dentro del municipio.

Riesgo	Erosión hídrica actual (Mg ha⁻¹ año⁻¹)	Superficie (ha)	%
Bajo	< 10	5,339.57	83.11
Moderado	10 – 50	902.52	14.05
Alto	50 – 200	170.70	2.66
Muy alto	> 200	11.82	0.18
	Total	6,424.61	100

Elaboración propia.

Los valores resultantes y comparados con los obtenidos en una localidad de Puebla por López-García *et al.* (2020) bajo condiciones comparables, se concuerda que los valores están relacionados con la actividad humana (eliminación de la cubierta vegetal, combinada con la sensibilidad de las áreas a la erosión-mayor pendiente). Lo mismo sucedido en el trabajo de González-Morales *et al.* (2018), quienes atribuyen los valores más altos a aquellas que sufrieron reducción en su cubierta vegetal, cambiando con los altos índices de precipitación y pendientes.

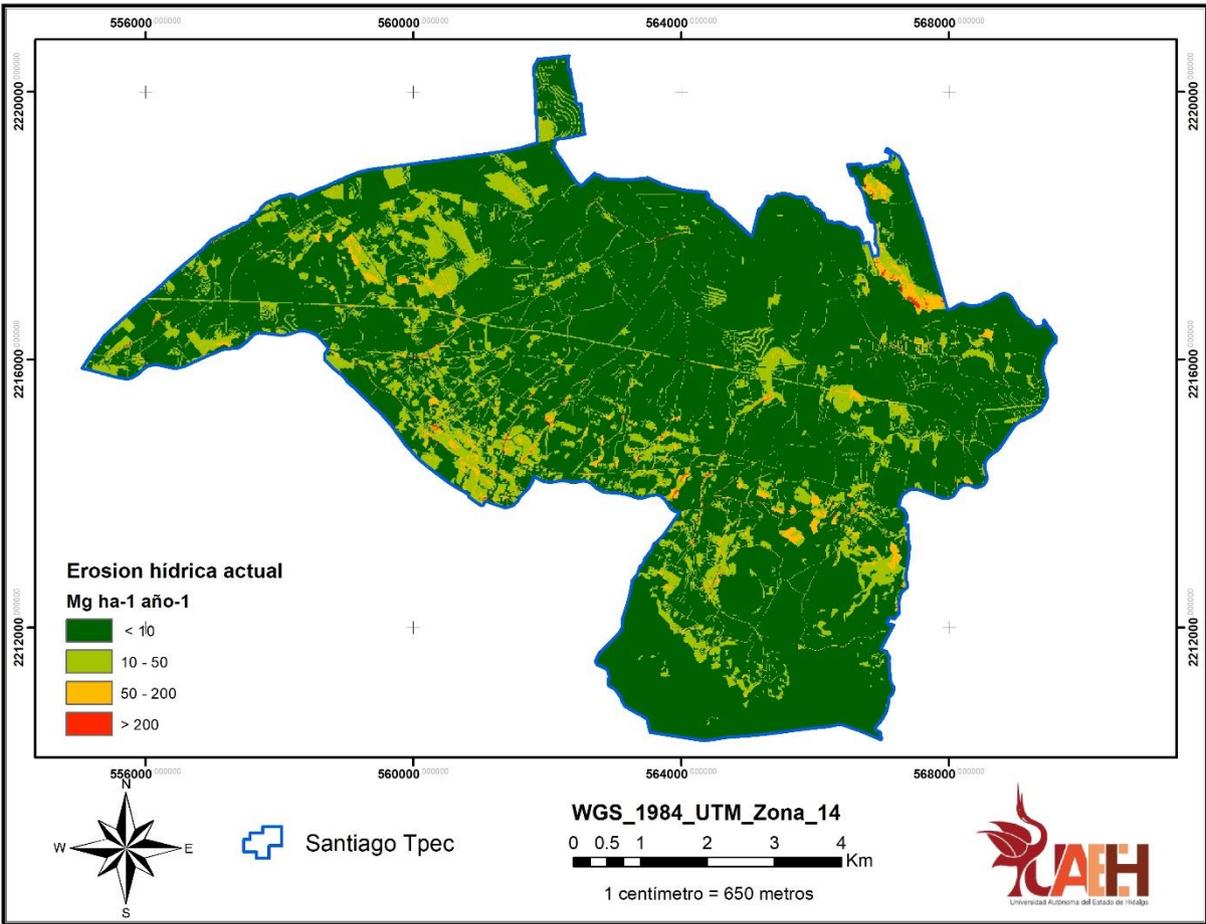


Figura 14. Mapa de distribución de la erosión hídrica actual para Santiago Tulantepec.

9.7 PROPUESTA DE OBRAS Y PRÁCTICAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Los valores de erosión hídrica obtenidos en el estudio a pesar de parecer de poca relevancia, requieren una atención precisa que permita atenuar el proceso erosivo a corto, mediano y largo plazo, lo cual será posible a través de la planeación y ejecución de obras/prácticas de conservación.

De este modo, las acciones benéficas ocurridas por la presencia de vegetación para el control de la erosión se deben a dos factores principales: el follaje, que funciona como medio de amortiguamiento de las gotas de lluvia al reducir su velocidad de impacto y, por otro lado, el sistema radicular, tallos herbáceos y sus residuos, que impiden el arrastre de suelo en el terreno, además de verse limitado por arrastre superficial o viento (Becerra-Moreno, 1999).

Autores como Rashid *et al.* (2016) mediante su trabajo realizado, demuestran que la ejecución de acciones de terraceo en terrenos de índole agrícola bajo condiciones de un clima semiárido, se aumenta la disponibilidad de humedad en un 16%, acompañado de la disminución de producción de sedimentos y la pérdida de nutrientes, que además no solo se detiene sino aumenta en un 20% durante la producción de trigo.

Y el uso de sistemas agroforestales bajo la integración de especies de cobertera (árboles o arbustos) asociados a herbáceas, que permiten la mitigación de la erosión, pérdida de fertilidad y los escurrimientos superficiales, que además de proteger y generar estabilidad ecológica, permiten obtener productos de autoconsumo (CONAFOR, 2018a).

Ante lo mencionado con anterioridad y según los valores arrojados para cada uno de los cálculos realizados para la erosión hídrica actual, a continuación, se enlistan las propuestas de obras/prácticas de conservación de suelo y agua para Santiago Tulantepec:

Riesgo bajo:

- ✓ Para áreas destinadas a la agricultura y con posibilidad de la integración de riego, se recomienda reconvertir las tierras a un uso pecuario, esto a través del establecimiento y manejo de forrajes de corte, lo que permite la presencia de cobertura vegetal por un mayor tiempo
- ✓ Zonas boscosas que no presentan riesgo alguno, deben de conservar su cobertura vegetal, evitando de este modo la exposición del suelo durante posibles aprovechamientos, que lo hacen susceptible a su degradación.
- ✓ Las áreas de agricultura de riego con aprovechamiento de alfalfa para forraje, deben seguir conservando su forma de manejo, sin la necesidad de sobreexplotar o cambiar su uso actual.

Riesgo medio

- ✓ En áreas de pastizal, donde existe una extensa cantidad de cabezas de ganado, es necesario establecer programas de manejo de pastizales, a fin de distribuir correctamente la carga animal, sin necesidad de sobreexplotar las áreas de aprovechamiento.
- ✓ Se recomienda una revegetación de causas naturales, cuando estos presentan problemas de cobertura, y que mejor realizarlas mediante la integración de especies nativas de la zona de atención.
- ✓ La rotación de cultivos combinado con la incorporación de materia orgánica permite la mejora de las condiciones de suelo, además trae consigo una mejora en la productividad, que se traduce en el aumento de los ingresos económicos para el poseedor.
- ✓ Cuando existen riesgos en parcelas dentro de pendientes no aptas para la agricultura, es recomendable que se aplique agricultura de conservación, permitiendo así, dejar sobre la superficie del terreno al menos un 20% de los residuos de cosecha.
- ✓ Disminuir el grado de fragmentación de las tierras, se traduce en una permanencia de mayor cantidad de vegetación sin la necesidad de cambiar su uso de suelo original.

Riesgo alto y muy alto:

- ✓ El implemento de barreras vivas (de nopal, maguey, etc.), además de retener los azolves, permiten la filtración de agua, que a su vez ofrece materas primas que se pueden aprovechar con fines comerciales.
- ✓ Se recomienda la integración de pastizales y/o cualquier tipo de acción que incluya la revegetación de las zonas con pérdidas considerables.
- ✓ En zonas de agricultura, pastizal o boscosas, acciones como el establecimiento de barreras de piedra acomodada en zonas de alta pendiente permiten no solo la reducción de la velocidad de los escurrimientos, sino también la retención del suelo.
- ✓ Acciones de cabeceo de cárcavas o el establecimiento de presas de control de azolve (geocostales, morillos, piedra acomodada, etc.), resultan ser la mejor alternativa cuando la erosión se manifiesta en gran medida, que además resulta ser difícil de controlar con obras/prácticas menores.

De acuerdo con la CONAFOR (2018a), la asignación y ejecución de las obras/prácticas de conservación para los diferentes usos de suelo y condiciones topográficas y climáticas no solo implican las bases teóricas, sino también deben de estar respaldadas por evaluaciones en campo directo, con la finalidad de determinar su tamaño, forma y objetivo.

Cada una de las recomendaciones antes enlistadas no solo se pueden establecer por si solas, sino también pueden ser combinadas unas con otras, a fin de garantizar la permanencia y/o recuperación del suelo.

9.8 EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL

Teniendo en cuenta la metodología de Wischmeier & Smith (1978) para el cálculo de la erosión hídrica potencial, en la que para su estimación solo se toman en cuenta los factores R, K y LS, se logró obtener el mapa de distribución (Figura 11) de la misma. La Tabla 18 muestra a la clase “nula” con una ocupación de 391.16 ha de la superficie total (6.09%), la cual se encuentra distribuida principalmente en la parte noreste del municipio, expresando los menores índices de R y áreas de topografía plana aunque los mayores valores de K. Caso similar con la distribución de la clase “baja”, la cual se localiza en la zona norte con una ocupación de 9.70% (623.27 ha), diferente a lo expresado por las clases “moderada”, “severa” y “extrema”, que en conjunto ocupan más de $\frac{3}{4}$ partes de la superficie total (5,410.18 ha), distribuidas a través de todo el municipio pero con concentraciones principales en la zona sur, suroeste e inclusive este y en las zonas de mayor pendiente (mayor rango del factor LS) e índices de R (mayores precipitaciones). También se denotan los valores de erosión hídrica potencial superiores a $50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se expresan en pequeñas líneas curvas, las cuales son indicadoras de la presencia de corrientes de agua, que además de acuerdo al CEM, es donde convergen depresiones topográficas que dan origen a los escurrimientos naturales.

De acuerdo con lo arrojado en este trabajo y datos comparables como los obtenidos por Gaitán *et al.* (2017) en la República Argentina para erosión hídrica potencial, demostraron que a nivel nacional la tasa de pérdida ronda las $166 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (equivalente a 1.2 cm de suelo por año), y de acuerdo a la clasificación en su grado “leve” ($<10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) casi un 40% de la superficie se presenta en zonas planas y con precipitaciones medias a bajas, mientras que alrededor del 10% presenta tasas de erosión potencial “muy altas” ($> 200 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en zonas con fuertes pendientes y altas precipitaciones. Esto concuerda con cada uno de los datos encontrados en la distribución de la erosión hídrica potencial para Santiago Tulantepec.

Aunque, diferente a lo realizado en 2007 por Loredo-Osti *et al.*, donde obtuvieron para una microcuenca de San Luis Potosí los cuatro rangos de erosión de la FAO, teniendo los valores más altos en la parte centro y norte de ésta, a pesar de ser una cuenca catalogada con clima seco estepario templado y precipitación media nula de 304.5

mm, se calcularon valores de R de $1,158.398 \text{ Mj mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$, en suelos de tipo litosol con textura media, pendientes que rondan de 8 a 20% y una mayor predominancia de erosión hídrica potencial “ligera” y “moderada”.

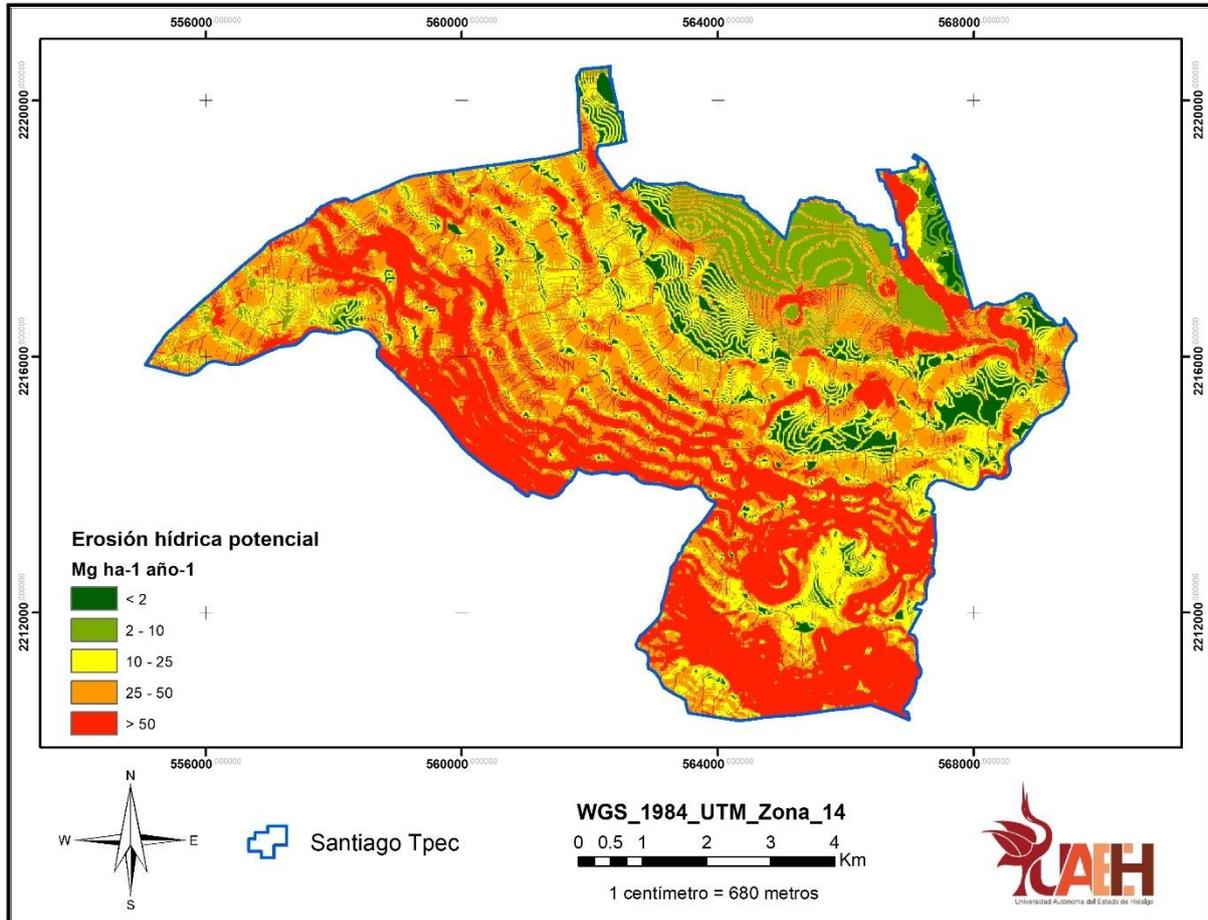


Figura 15. Mapa de distribución de la erosión hídrica potencial en Santiago Tpec.

Tabla 18. Tabla de clases de erosión hídrica potencial dentro del municipio, expresada en superficie y porcentaje ocupado.

Clases	Erosión hídrica potencial (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficie (ha)	Área (%)
Nula	<2	391.16	6.09
Baja	2 a 10	623.27	9.70
Moderada	10 a 25	1370.92	21.34
Severa	25 a 50	1982.68	30.86
Extrema	> 50	2056.59	32.01
	Total	6424.61	100.00

10. CONCLUSIÓN

El uso de los Sistemas de Información Geográfica permite integrar y calcular de manera eficiente cada uno de los factores que comprende la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, lo que conlleva a poder utilizar una gran cantidad de información sin la necesidad de demandar otros aspectos que podrían retrasar los tiempos de cálculo y/o procesamiento, considerando que cada uno de los procesos deben ser ejecutados correctamente y sin influir en ellos. Además, es posible la evaluación de la erosión hídrica actual y potencial de un área de trabajo relativamente grande como lo es Santiago Tulantepec, comparada con parcelas de un tamaño pequeño, fácil de recorrer, analizar y evaluar.

La combinación EUPSR-SIG, no solo ayuda al procesamiento de grandes cantidades de datos en un solo medio, contrastado con las herramientas tradicionales de trabajo utilizadas para cuantificar los fenómenos que le aquejan a la sociedad, sino también permite la expresión a través de mapas interactivos de distribución del fenómeno erosivo y cada uno de los factores que lo componen, que a su vez expresan de manera más sencilla los detalles y/o cambios sufridos para un área específica de interés. Es decir, permite la expresión global de datos que resultan ser el inicio de una infinidad de posibles situaciones y aplicaciones las cuales son definidas con base en los objetivos e intereses de cada usuario.

Consecuentemente, además de expresar la información de manera visual, genera el acceso a los datos estadísticos de interés, como lo es la erosión hídrica actual y potencial enunciada en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el sitio de evaluación, aunque los valores obtenidos no son precisamente los sucedidos en la realidad, estos permiten generar ciertas consideraciones y acciones para la toma de decisiones. En adición a los datos, su distribución espacial y el panorama generado tras su análisis e interpretación y con el objetivo de dar certeza, es necesario la aplicación y acompañamiento a través de algún método de estudio directo, que permita tener las bases con respecto a la erosión hídrica que puede estar sucediendo realmente, así como de esas variaciones originadas a través del tiempo.

11. CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES

Lo expresado por los valores obtenidos no deben suponer que estos no representan un riesgo alto, la decisión final debe ser acompañada de datos obtenidos de la realidad más actual.

Por ello, es importante tomar en cuenta cada una de las consideraciones incluidas para el estudio y de este modo, adelantarse a lo que posiblemente podría suceder si no se toman en cuenta las propuestas emitidas. Mejorando así, el uso y aplicación de cartografía e imágenes de escala limitada, además de los procesos y sus calibraciones al momento de configurar la información a manejar.

De igual manera, se considera que, si existe un correcto estudio, seguido de un análisis completo, se logrará realizar una planeación eficiente que nos llevará a una asertiva toma de decisiones para la conservación de los suelos y el medio que directa o indirectamente soporta. Aunque parezca un asunto de limitada importancia y de poca valoración, la conservación de un recurso natural como lo es el suelo, debe ser tomada en cuenta, llevando a cabo prácticas sustentables para su cuidado, debido a que es la base fundamental en el desarrollo de nuestra economía y de la permanencia en la calidad y productividad de las áreas vitales para la humanidad.

Finalmente, no solo se trata de establecer acciones de mitigación o recuperación de áreas con problemas de erosión, sino también, del desarrollo y aplicación de políticas públicas en las que se vele por los intereses generales, permitiendo la inclusión de cada uno de los sectores afectados sin beneficiar o afectar a ciertas áreas, todas encaminadas a garantizar un único objetivo, el desarrollo sustentable y sostenible de la región y el país.

12. LITERATURA CITADA

- Ahmad Bhat, S., Hamid, I., U Din Dar, M., Rasool, D., Ahmad Pandit, B., & Khan, S. (2017). Soil erosion modeling using RUSLE & GIS on micro watershed of J&K. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(5), 838-842. Obtenido de <https://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue5/PartM/6-5-2-365.pdf>
- Alatorre, L. C., & Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: Una revisión. *Cuaternario y Geomorfología*, 23(1-2), 29-48. Obtenido de https://digital.csic.es/bitstream/10261/92858/1/BegueriaS_CuatGeom_2009.pdf
- Bai, Y., & Cui, H. (2021). An improved vegetation cover and management factor for RUSLE model in prediction of soil erosion. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 21132-21144. doi:10.1007/s11356-020-11820-x
- Barrena-González, J., Rodrigo-Comino, J., Gyasi-Agyei, Y., Pulido-Fernández, M., & Cerdà, A. (2020). Applying the RUSLE and ISUM in the Tierra de Barros Vineyards (Extremadura, Spain) to estimate soil mobilisation rates. *Land*, 9(93), 1-17. doi:10.3390/land9030093
- Becerra-Moreno, A. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Behera, M., Sena, D. R., Mandal, U., Kashyap, P. S., & Dash, S. S. (2020). Integrated GIS-based RUSLE approach for quantification of potential soil erosion under future climate change scenarios. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(733), 1-18. doi:10.1007/s10661-020-08688-2
- Boakye, E., Anyemedu, F. O., Donkor, E. A., & Quaye-Ballard, J. A. (2020). Spatial distribution of soil erosion and sediment yield in the Pra River Basin. *SN Applied Sciences*, 2(320). doi:10.1007/s42452-020-2129-1
- Bubenzer, G. D., & Jones, B. A. (1971). Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. *Transactions of the ASAE*, 14(4), 625-628. doi:10.13031/2013.38353
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. doi:10.22267/rcia.163302.58.
- Castelán-Vega, R., Tamariz-Flores, V., Linares-Fleites, G., & Cruz-Montalvo, A. (2014). Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*(83), 28-40. doi:10.14350/rig.33480
- Castellanos-Ramos, J. Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP* (Segunda ed.). México: INTAGRI.

- Castro-Quintero, A. F., Lince-Salazar, L. A., & Riaño-Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombi. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 17-26. doi:10.22490/21456453.1828
- Chadli, K. (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment volume*, 2(51), 1-10. doi:10.1007/s40808-016-0105-y
- CONAFOR. (2004). *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales* (Segunda ed.). Zapopán, Jalisco: Comisión Nacional Forestal. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CG008969.pdf>
- CONAFOR. (2012). *PODESNOS_Recuperación de áreas degradadas por disturbios y/o perturbaciones antropogénicas-Términos de Referencia*. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/2771Recuperaci%3%b3n%20de%20Areas%20Degradadas.pdf>
- CONAFOR. (2018a). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas* (Quinta ed.). Zapopan: CONAFOR_Gerencia de Restauración Forestal. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>
- CONAFOR. (2018b). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos_ Informe de Resultados 2009-2014*. Zapopan: CONAFOR. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>
- CONAFOR. (2020). Obtenido de <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>
- CONAGUA. (s.f.). <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=hgo>. Recuperado el 20 de Octubre de 2021, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=hgo>
- Cordero-Rebolledo, H. (2022). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el cálculo del índice de erosión usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) en la cuenca del río de Oro del municipio de Girón, Santander*. [Tesis de especialidad, Universidad de Santander]. Repositorio Institucional de la Universidad de Santander. Obtenido de <https://repositorio.udes.edu.co/bitstream/001/6654/1/Aplicaci%3%b3ndelosSistemasdelInformaci%3%b3nGeogr%3%a1fica%28SIG%29ParaelC%3%a1>

culodel%c3%8dndice de Erosi%c3%b3n Usandola Ecuaci%c3%b3n Universal de P%c3%a9rdid de Suelo%28RUSLE%29.pdf

- Cruz, C., Balbontin, C., Paz, F., Etchevers, J., & Krasilnikov, P. (2007). Variabilidad morfogénica de los suelos en México y su relación con el modelo fisiográfico nacional. León, Guanajuato: XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Obtenido de <http://www.madrimas.org/blogs/universo/2007/06/22/68351>
- Dumas-Salazar, Á. (2012). *Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo*. [Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la UCM. Obtenido de https://eprints.ucm.es/17468/1/TFM_AfricaDumas.pdf
- ESRI. (2019). *ArcGIS Desktop (10.8) [software]*. Obtenido de <https://www.esri.com/en-us/home>
- ESRI. (s.f.). *ArcGIS Resources*. Obtenido de ¿Qué es ArcGIS?: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- FAO. (1996). Tema 2: El suelo. En FAO, *Ecología y enseñanza rural: Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas* (pág. 186). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido de http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm#P5_56
- FAO. (02 de Julio de 2008). *Aumenta la degradación del suelo*. Obtenido de <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2008/1000874/index.html>
- FAO. (2015). *Soils*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-2015/faq/es/>
- Flores-Islas, E. (2016). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2016/octubre/0751167/Index.html>
- Flores-López, H. E., Martínez-Menes, M., Oropeza-Mota, J. L., Mejía-Saens, E., & Carrillo-González, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 233-244. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315595010.pdf>
- Foster, G. R., Meyer, L. D., & Onstad, C. A. (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASABE*, 20(4), 683-687. doi:10.13031/2013.35628

- Gaitán, J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L., Pizarro, M. J., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina* (Primera ed.). (J. Gaitán, M. F. Navarro, P. Carfagno, & L. Tenti Vuegen, Edits.) Buenos Aires: Ediciones INTA.
- García, E., & CONABIO. (1998). *Climas (clasificación de Koppen, modificado por E. García)*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., . . . Vargas, R. (Edits.). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxembourg: Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Ghosal, K., & Das Bhattacharya, S. (2020). A review of RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 689-707. doi:10.1007/s12524-019-01097-0
- Gomes, L., Simoes C, S. J., Forti, M. C., Hometo B, J. H., & Nora Dalla, E. I. (2017). Using Geotechnology to Estimate Annual Soil Loss Rate in the Brazilian Cerrado. *Journal of Geographic Information System*, 9, 420-439. doi:10.4236/jgis.2017.94026
- González-Morales, S. B., Mayer, A., & Ramírez-Marcial, N. (2018). Assessment of soil erosion vulnerability in the heavily populated and ecologically fragile communities in Motozintla de Mendoza, Chiapas, Mexico. *Solid Earth*, 9, 745-757. doi:10.5194/se-9-745-2018
- INECC. (2007a). *Capítulo primero: El suelo*. Obtenido de [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html#:~:text=El%20suelo%20es%20una%20mezcla,organismos%20vivos%20\(figura%201\).&text=Los%20componentes%20minerales%20constituyen%20la,un%20suelo%20\(figura%201\).](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html#:~:text=El%20suelo%20es%20una%20mezcla,organismos%20vivos%20(figura%201).&text=Los%20componentes%20minerales%20constituyen%20la,un%20suelo%20(figura%201).)
- INECC. (2007b). *Características y manejo de los ecosistemas templados de montaña*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/395/cotler.html>
- INECC. (2007c). *Parte II. Recursos Naturales. Suelo*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/16/parte2.html>
- INEGI. (2007). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Serie II, escala 1:250 000*. México: INEGI.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográficamunicipal de los Estados Unidos Mexicanos. Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo*. Obtenido de http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13056.pdf

- INEGI. (2012). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250,000, serie II. (Continuo Nacional). edición 2*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de Portal de Geoinformación 2020: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (2021a). *Áreas geoestadísticas municipales, escala 1:250,000. edición 1*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de División política municipal, escala 1:250,000. 2020: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>
- INEGI. (2021b). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000, Serie VII. Conjunto Nacional. edición 1*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de Portal de Geoinformación 2020: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. En P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo-Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, . . . J. Malley (Edits.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/02_Summary-for-Policymakers_SPM.pdf
- Kishore, S., Ghosh, S., & Ranjan, S. (2019). Identification of spatially distributed hotspots for soil loss and erosion potential in mining areas of Upper Damodar Basin- India. *Catena*, 182, 1-9. doi:10.1016/j.catena.2019.104144
- Kushwaha, N. L., & Yousuf, A. (2017). Soil erosion risk mapping of watersheds using RUSLE, Remote Sensing and GIS: A Review. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 8(2), 269-277. Obtenido de https://www.academia.edu/42909790/Soil_erosion_risk_mapping_of_watersheds_using_RUSLE_remote_sensing_and_GIS_A_review
- López-García, E. M., Torres-Trejo, E., López-Reyes, L., Flores-Domínguez, Á. D., Peña-Moreno, R. D., & López-Olguín, J. F. (2020). Estimation of soil erosion using USLE and GIS in the locality of Tzicatlacoyan, Puebla, Mexico. *Soil and Water Research*, 15(1), 9-17. doi:10.17221/165/2018-SWR
- Loredo-Osti, C. (2005). *Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas* (Vol. Libro Técnico No. 1). INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. Obtenido de <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre32.pdf>
- Loredo-Osti, C., Beltrán-López, S., Moreno-Sánchez, F., & Casiano-Domínguez, M. (2007). *Predicción de riesgo a la erosión hídrica a nivel microcuenca* (Vol.

- Folleto Técnico No. 29). INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. Obtenido de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/170.pdf>
- Martínez-Murillo, J. F., Remond, R., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2020). Validation of RUSLE K factor using aggregate stability in contrasted mediterranean eco-geomorphological landscapes (southern Spain). *Environmental Research*, 183, 1-11. doi:10.1016/j.envres.2020.109160
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. doi:10.13031/2013.30576
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASABE*, 32(5), 1571-1576. doi:10.13031/2013.31192
- Melchor-Marroquín, J. I., & Chagoya-Fuentes, J. L. (2016). Diagnóstico de la erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz, México. *Aqua-LAC*, 8(2), 25-35. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/PHI-03ArticuloJoseMelchor.pdf>
- Montes-León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 5-17. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531972001>
- Mukanov, Y., Chen, Y., Baisholanov, S., Chukwudi Amanambu, A., Issanova, G., Abenova, A., . . . Abayev, N. (2019). Estimation of annual average soil loss using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated in a Geographical Information System (GIS) of the Esil River basin (ERB), Kazakhstan. *Acta Geophysica*, 67, 921-938. doi:10.1007/s11600-019-00288-0
- Ordóñez-Rodríguez, C. A. (2017). *Modelación de la erosión hídrica en la cuenca alta del río Conchos, Chihuahua [Tesis de Maestría]*. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Pastrana-Ortiz, O. (2014). *Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los Sistemas de Información Geográfica*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Obtenido de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3846/63103%20PASTRANA%20ORTIZ,%20ONOFRE%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Pedraza-Villafaña, A. (2015). *Estimación de la erosión hídrica mediante dos métodos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en la cuenca del Río Chapingo, Texcoco*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Obtenido de http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/49410/TESIS_AM%c3%89RICA%20PROTEGIDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Pérez-Vega, A., Regil García, H. H., & Francois Mas, J. (2020). Degradación ambiental por procesos de cambios de uso de suelo y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas*(103). doi:10.14350/rig.60150
- Peri A., A. (2017). *Using GIS to compare leading process and empirically based soil erosion models within Headwater Watersheds*. [Tesis de Maestría, Northern Arizona University]. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/151423128.pdf>
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 119-137. doi:10.1007/s10668-005-1262-8
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3, 443-463. doi:10.3390/agriculture3030443
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2014). *Edafología. Uso y protección de suelo*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero De Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (Tercera ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Prado-Hernández, J. V., Rivera-Ruiz, P., de León-Mojarro, B., Carrillo-García, M., & Martínez-Ruiz, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo USLE y MUSLE en una ceunca forestal de México: Caso el Malacate. *Agrociencia*, 51(3), 265-284. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30250596002>
- Ramalho-Filho, A., & Beek, K. J. (1995). *Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras* (Tercera ed.). Río de Janeiro: EMBRAPA. Obtenido de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/330132/1/Sistema-de-avaliacao-da-aptidao-agricola-das-terras-1995.pdf>
- Ramírez, R. G., Wilson, M. G., Marizza, M. S., & Gabioud, E. (2017). Utilización de SIG para la aplicación del modelo MUSLE en la estimación de la producción de sedimentos en Aldea Santa María, entre Ríos. 9° CAI-Congreso Argentino de Agroinformática, (págs. 205-217). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/301078656.pdf>
- Rashid, M., ur Rehman, O., Alvi, S., Kausar, R., & Akram, I. (2016). The effectiveness of soil and water conservation terrace structures for improvement of crops and soil productivity in rainfed terraced system. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 53(1), 241-248. Obtenido de <https://www.tehqeeqat.org/downloadpdf/15150>

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE. Revised Universal Soil Loss Equation. *Soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33. Obtenido de <https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/775.pdf>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Vol. Handbook No. 703). U.S. Department of Agriculture. Obtenido de https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf
- Rodríguez-Cristaldo, R. B. (2012). *Erosividad de la lluvia en el departamento de alto Paraná, Paraguay*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Asunción]. Obtenido de <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/TES-BN-015.pdf>
- Salazar-Arrieta, S. G. (2016). *Detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del río San Pedro-Mezquitla*. [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional-CIDIR Durango]. Obtenido de <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/23382/1/SusanaSalazar.pdf>
- Sánchez-Hernández, R., Mendoza-Palacios, J., De la Cruz Reyes, J. C., Mendoza Martínez, J. E., & Ramos-Reyes, R. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *Universidad y Ciencia*, 29(2), 153-161. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v29n2/v29n2a5.pdf>
- Sancho, C., Benito, G., & Gutiérrez, M. (1991). *Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos* (Primera ed.). Geoforma ediciones. Obtenido de <https://edepot.wur.nl/481138>
- Santacruz-De León, G. (2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 3(1), 45-54. doi:10.29104/phi-aqualac/2011-v3-1-06
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015*. Ciudad de México, México: SEMARNAT. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SEMARNAT-CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/307967321_SEMARNAT-CP_2003_Memoria_Nacional_2001-

2002_Evaluacion_de_la_Degradacion_del_Suelo_causada_por_el_Hombre_ en_la_Republica_Mexicana_escala_1250000_Memoria_Nacional

- SSSA. (2008). *Soil basics*. Obtenido de <https://www.soils4teachers.org/files/s4t/soils-overview-for-teachers-2020.pdf>
- UN Environment. (2019). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 6*. Cambridge. Obtenido de <https://www.unep.org/es/resources/perspectivas-del-medio-ambiente-mundial-6>
- Vargas-Lomelín, J. G. (2015). *Estimación de la erosión hídrica actual y potencial de la Sub-cuenca de Sayula, Jalisco, México*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Guadalajara]. Repositorio Institucional de la Universidad de Guadalajara. Obtenido de http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5992/Vargas_Lomelin_Jose_Guillermo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Wischmeier , W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning* (Vol. Agriculture Handbook No. 537). Unites States Deparment of Agriculture/Science and Education Administration. Obtenido de <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Rome: World Soil Resources Reports No. 106. Recuperado el 08 de Octubre de 2022, de <http://www.fao.org/3/a-i3794en.pdf>
- Zamudio, V., & Méndez, E. (2011). La vulnerabilidad de erosión de suelos agrícolas en la región centro-sur del estado de Nayarit, México. *Ambiente y Desarrollo*, XV(28), 11-40. Obtenido de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/3154>

ANEXOS

Procedimiento seguido y aplicado en el software ArcGIS 10.8 para el cálculo de la erosión hídrica actual del municipio de Santiago Tulantepec.

Municipio a modelar

Para iniciar fue necesario contar con el mapa de la división política municipal del año 2021, el cual fue obtenido del Portal de Geoinformación de la CONABIO para posteriormente seguir los pasos que a continuación se describen:

Una vez cargado el mapa, se dirigió mediante la ruta **ArcToolBox > Analysis Tools > Extract > Select** y de esta manera seleccionar la herramienta correspondiente (Figura 16).

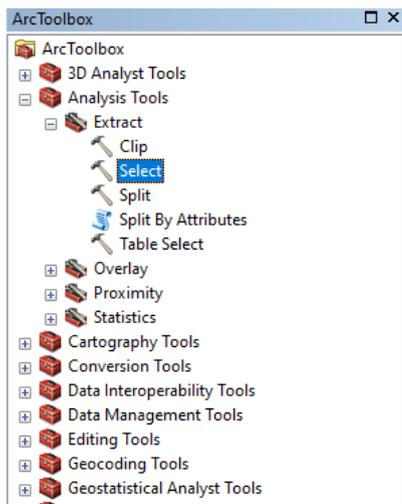


Figura 16. Localización de la herramienta *Select*.

Ya abierto el cuadro de datos (Figura 17), se procedió a elegir la información necesaria para cada apartado y así obtener el mapa del área a estudiar (Figura 18).

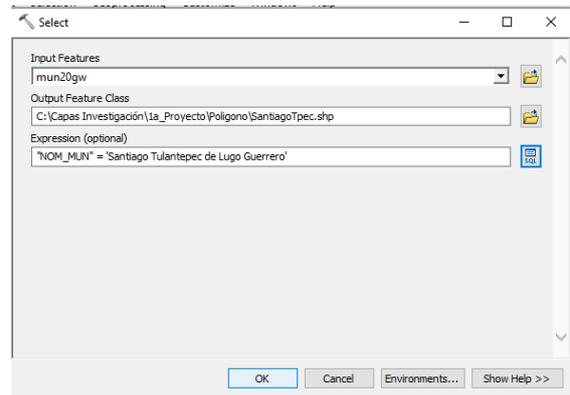


Figura 17. Configuración de herramienta *Select*.

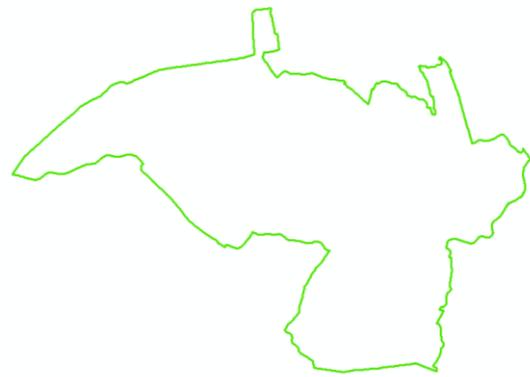


Figura 18. Polígono de Santiago Tulantepec

ANEXO 1

Factor R

Para la obtención del Factor R (erosividad de la lluvia) fue necesaria la consulta de datos del Servicio Meteorológico Nacional, con la finalidad de tabular la información de coordenadas

UTM, precipitaciones medias anuales del periodo 1953 – 2010 y su altitud para cada estación meteorológica ubicada dentro y fuera del área de estudio y con influencia en la misma.

Una vez registrados los datos en una tabla de Excel y en formato .txt, se procedió a subir los puntos de referencia de las estaciones meteorológicas y obtener el archivo tipo *shapefile* correspondiente.

De este modo, sobre el archivo de las estaciones meteorológicas dentro de ArcGIS, se siguió la ruta **Click derecho > Display XY Data** (Figura 19) y así configurar según la información necesaria (Figura 20).

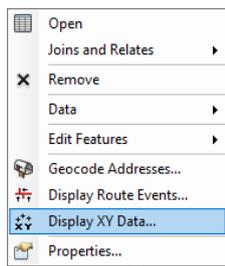


Figura 19. Herramienta *Display XY Data*.

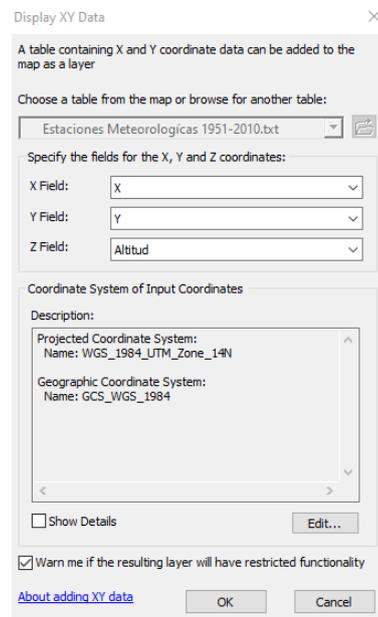


Figura 20. Configuración de herramienta *Display XY Data*.

Al archivo de puntos generado, se le dio **Click derecho > Data > Export Data** y se le asignó un nombre de salida para finalmente obtener el *shapefile* de las estaciones meteorológicas (Figura 21).

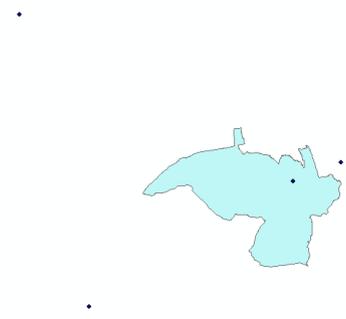


Figura 21. Puntos localización de las estaciones meteorológicas.

Una vez generados los puntos de referencia para cada estación meteorológica, se procedió a aplicar el método de interpolación *Kriging* para

obtener la distribución de las lluvias en el área de estudio y el cual consistió en seguir la ruta **ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Interpolation > Kriging** (Figura 22).

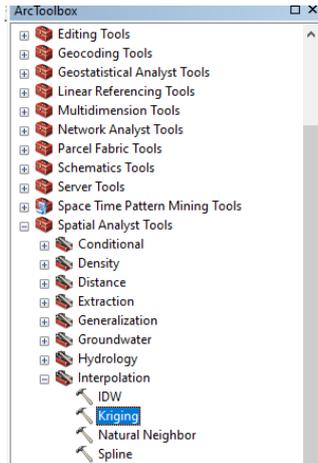


Figura 22. Localización de la herramienta *Kriging*.

Al cuadro de configuración abierto (Figura 23) y correspondiente al método de interpolación, se le asignan los datos necesarios, con la finalidad de obtener el *ráster* de la precipitación media anual para el periodo de registro 1953 - 2010 (Figura 24).

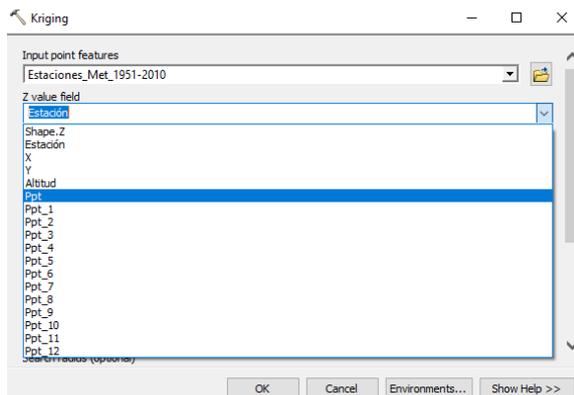


Figura 23. Menú de configuración del *Kriging*.

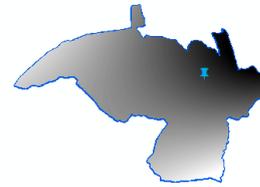


Figura 24. Mapa de interpolación *Kriging* para la distribución de la precipitación.

Realizado el proceso anterior, fue necesario seguir la ruta **ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator** (Figura 25) la cual permitió acceder a la aplicación de la fórmula asociada a la Región I de la metodología propuesta por Cortés (1991).

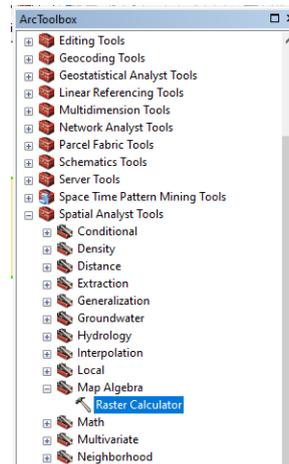


Figura 25. Localización de la herramienta *Raster Calculator*.

Finalmente, en el cuadro de datos de la función *Raster Calculator* fue necesario indicar la formula a aplicar, así como la dirección y nombre de guardado del *ráster* resultante (Figura 26).

Y de esta manera se obtuvo el archivo tipo *ráster* del factor R de Santiago Tulantepec (Figura 27).

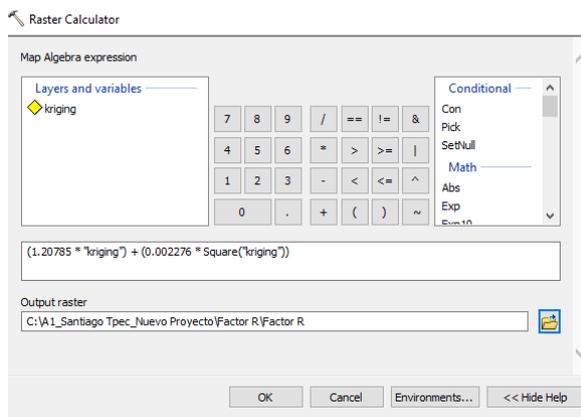


Figura 26. Menú de configuración de *Raster Calculator* para el cálculo del factor R.

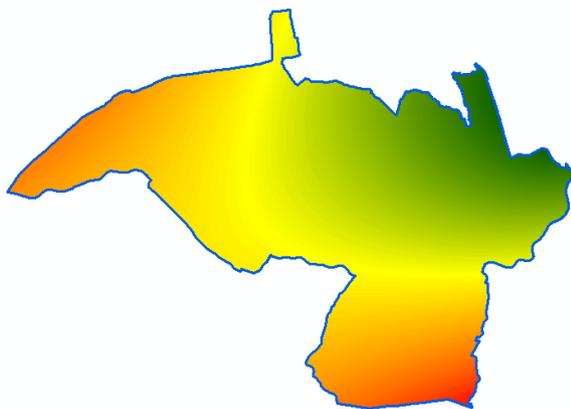


Figura 27. *Ráster* de distribución del factor R para Santiago Tulantepec.

ANEXO 2

Factor K

Con ayuda del conjunto de datos vectoriales, escala 1.250,000, serie II (continuo nacional) del INEGI (2014), se obtuvieron las unidades de suelo presentes en Santiago Tulantepec. Para ello fue necesario aplicar la ruta **Geoprocessing > Clip** (Figura 28).

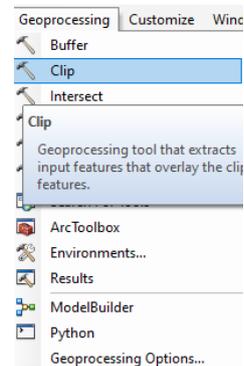


Figura 28. Localización de la herramienta *Clip*.

Se procedió al llenado del cuadro de diálogo (Figura 29) con los datos necesarios.

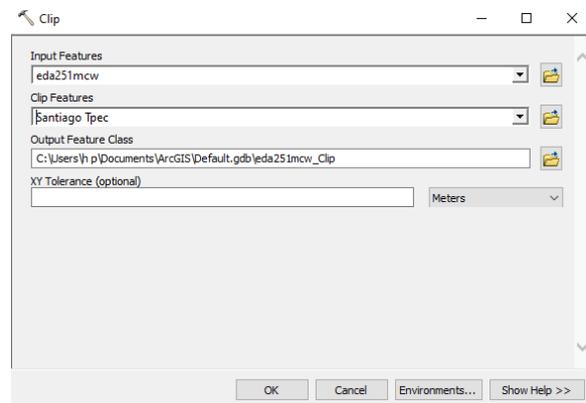


Figura 29. Menú *Clip* para unidades de suelo.

Y así obtener el polígono de Santiago Tulantepec según la distribución de sus unidades de suelo presentes (Figura 30).

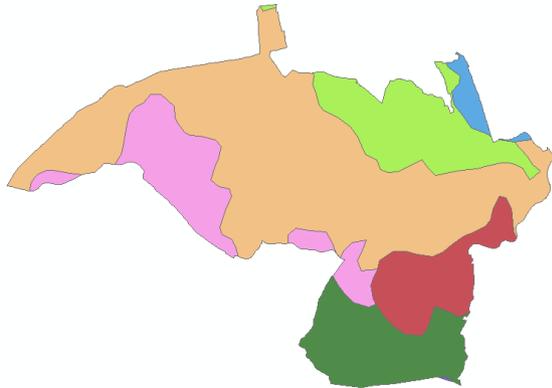


Figura 30. Mapa de distribución de las unidades de suelo en Santiago Tpec.

Con la finalidad de ubicar puntos de referencia para la obtención de muestras de suelo, se generó una malla de puntos al seguir los pasos que se indican a continuación:

Al polígono de representativo de Santiago Tulantepec se le aplicó la función que comprende la siguiente ruta: **ArcToolbox > Data Management Tools > Sampling > Create Fishnet** (Figura 31).

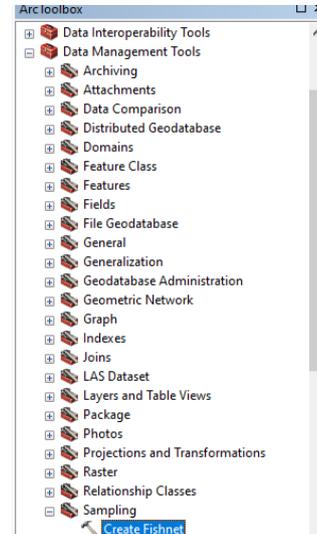


Figura 31. Localización de la herramienta *Create Fishnet*.

De esta manera, al cuadro de dialogo se le indicaron las características necesarias y lograr obtener los puntos según sus coordenadas UTM (Figura 32).

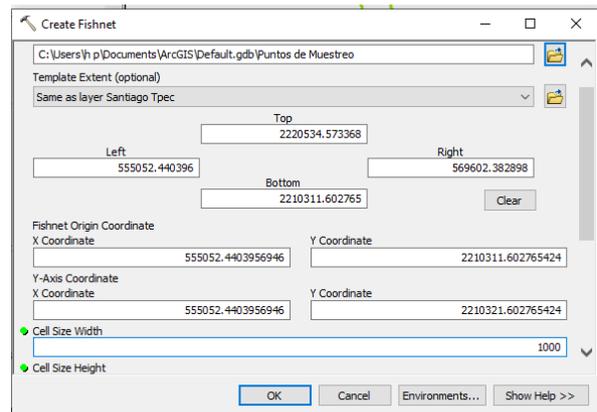


Figura 32. Menú *Create Fishnet* para generar puntos de muestreo.

Así se permitió obtener los puntos de referencia para el muestreo en campo de suelo con fines de actualización de la textura de los suelos presentes (Figura 33).

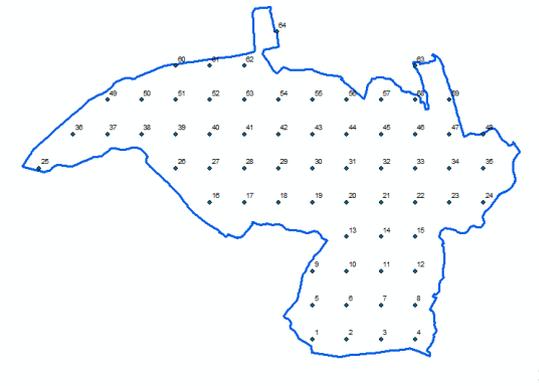


Figura 33. Malla de puntos de referencia para muestreo.

Método de Bouyoucos

Una vez obtenidas las muestras de suelo para cada sitio de muestreo se procedió a determinar la clase textural para cada una, para lo cual se aplicó el método de Bouyoucos y de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 fue necesario seguir los pasos que a continuación se enlistan:

- Se pesan 50 g de suelo seco y colocarlos en un vaso de precipitados de 250 ml. Adicionar agua destilada hasta cubrir la superficie con una lámina de 2 cm. Agregar 5 ml de oxalato de sodio y 5 ml de metasilicato de sodio y dejar reposar durante 15 minutos.
- A continuación, pasar la muestra del vaso de precipitado a la copa del agitador mecánico, pasando

todo el material con la ayuda de una piceta. Encender el agitador y proceder a dispersar durante 5 minutos. Al finalizar el tiempo de agitación, transvasar el contenido a una probeta de 1000 ml, enjuagando la copa con ayuda de una piceta.

- Posteriormente es necesario agregar agua destilada con la finalidad de aforar a un litro con el hidrómetro dentro de la suspensión. Sacar el hidrómetro y suspender el suelo con un agitador de mano operando durante un minuto.
- Finalmente, tomar las lecturas del hidrómetro a los 40 segundos y después de 2 horas de terminada la dispersión con el agitador de mano.

Es recomendable para hacer una lectura, colocar el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes del momento de la determinación, cuidando de alterar en lo más mínimo posible la suspensión. Después de hacer la lectura se seca el hidrómetro, se lava, se seca y se toma la temperatura. Si por alguna razón al realizar la lectura se acumula espuma

alrededor del hidrómetro, agregar unas gotas de alcohol etílico.

Para realizar los cálculos asociados a la determinación de la textura del suelo es necesario corregir las lecturas del hidrómetro agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5 y viceversa. La lectura a los 40 segundos multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla más limo y restando a 100, se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a 2 horas multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla y el porcentaje de limo se obtiene por diferencia.

Cuando se usan 100 g de suelo no debe multiplicarse por 2, ya que el hidrómetro está calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo. Con los porcentajes de limo arcilla y arena se determina la textura correspondiente al triangulo de texturas.

Una vez realizado el procedimiento anterior, se obtuvieron los datos que se muestran a continuación (Tabla 19) para cada sitio de muestreo:

Tabla 19. Valores obtenidos durante la aplicación del método de Bouyoucos para cada sitio de muestreo.

No. Sitio	Lectura Hidrómetro		Lectura Termómetro (°C)		Porcentaje de partículas			Triángulo de texturas	Textura
	40 s	2 h	40 s	2 h	% Arcilla	% Limo	% Arena		
1	25	11	26	26	26	28	46	Franco arcillo arenosa	Media
2	28	14	25.5	26	32	28	40	Franco arcillosa	Media
3	30	19	25.5	26	38	26	36	Franco arcillosa	Media
4	27	11	25.5	26	26	32	42	Franca	Media
5	28	12	25.5	26	28	32	40	Franco arcillosa	Media
6	32	16	25.5	26					
6R	32	16	25.5	26	36	32	32	Franco arcillosa	Media
7	35	21	25.5	26	46	28	26	Arcillosa	Fina
8	30	15	25	25	34	30	36	Franco arcillosa	Media
9	32	18	25	25	40	28	32	Franco arcillosa	Fina
10	37	24	25	25	52	26	22	Arcillosa	Fina
11	24	11	25	25	26	26	48	Franco arcillo arenosa	Media
12	32	17	25	25					
12R	32	17	25	25	38	30	32	Franco arcillosa	Media
13	32	17	26	25	38	30	32	Franco arcillosa	Media
14	38	23	26	25	50	31	19	Arcillosa	Fina
15	29	13	26	25	29	33	38	Franco arcillosa	Media
16	26	10	26	25	23	33	44	Franca	Media
17	24	14	26	25	32	20	48	Franco arcillo arenosa	Media
18	19	9	25	25					
18R	20	9	25	25	22	21	57	Franco arcillo arenosa	Media
19	29	18	24	25	40	21	39	Franco arcillosa	Fina
20	31	20	23	24	43	21	36	Arcillosa	Fina
21	29	19	24	25	42	17	41	Arcillosa	Fina
22	24	13	24	25	30	21	49	Franco arcillo arenosa	Media

23	30	16	25	25	36	28	36	Franco arcillosa	Media
24	27	21	23	25	46	11	43	Arcillosa	Fina
24R	28	21	23	25	28	30	42	Franco arcillosa	Media
25	27	12	25	25	23	35	42	Franca	Media
26	27	12	25	25	36	32	32	Franco arcillosa	Media
27	32	16	25	25	42	24	34	Arcillosa	Fina
28	31	19	25	25	40	26	34	Arcillosa	Fina
29	31	18	25	25	32	34	34	Franco arcillosa	Media
30	31	14	25	25	46	22	32	Arcillosa	Fina
30R	31	14	25	25	34	30	36	Franco arcillosa	Media
31	32	21	25	25	27	27	46	Franca	Media
32	30	15	25	25	36	25	39	Franco arcillosa	Media
33	26	12	23	24	32	29	39	Franco arcillosa	Media
34	32	17	21	23	34	37	29	Franco arcillosa	Media
35	30	15	21	23	52	23	25	Arcillosa	Fina
36	35	16	22	23	26	31	43	Franca	Media
36R	35	16	22	23	52	22	26	Arcillosa	Fina
37	37	25	22	23	28	32	40	Franco arcillosa	Media
38	28	12	22	23	56	12	32	Arcillosa	Fina
39	35	24	26	26	46	26	28	Arcillosa	Fina
40	28	12	26	26	46	18	36	Arcillosa	Fina
41	35	26	26	26	26	24	50	Franco arcillo arenosa	Media
42	34	21	26	25	44	28	28	Arcillosa	Fina
42R	34	21	26	25	44	26	30	Arcillosa	Fina
43	30	21	26	25	26	24	50	Franco arcillo arenosa	Media
44	23	11	26	26	20	24	56	Franco arcillo arenosa	Media
45	34	20	26	26	20	24	56	Franco arcillo arenosa	Media
46	33	20	26	25	20	24	56	Franco arcillo arenosa	Media
47	23	11	26	26	20	24	56	Franco arcillo arenosa	Media
48	20	8	26	26	20	24	56	Franco arcillo arenosa	Media

48R	20	8	26	26						
49	24	9	26	26	22	30	48	Franca	Media	
50	34	16	26	25	36	37	27	Franco arcillosa	Media	
51	29	12	26	25	27	35	38	Franco arcillosa	Media	
52	22	9	26	26	22	26	52	Franco arcillo arenosa	Media	
53	34	19	26	25	42	31	27	Arcillosa	Fina	
54	31	15	26	25						
54R	31	15	26	25	34	32	34	Franco arcillosa	Media	
55	26	11	26	25	25	31	44	Franca	Media	
56	28	16	26	25	36	24	40	Franco arcillosa	Media	
57	36	20	24.5	24	43	32	25	Arcillosa	Fina	
58	22	10	24.5	24	23	24	53	Franco arcillo arenosa	Media	
59	21	10	24.5	25	23	22	55	Franco arcillo arenosa	Media	
60	34	18	24.5	24						
60R	34	18	24.5	24	39	32	29	Franco arcillosa	Media	
61	32	14	23	23	30	36	34	Franco arcillosa	Media	
62	28	14	23	24	31	27	42	Franco arcillosa	Media	
63	20	9	23	24	21	21	58	Franco arcillo arenosa	Media	
64	30	17	23	24	37	25	38	Franco arcillosa	Media	

Una vez aplicado el método de Bouyoucos a cada una de las muestras obtenidas durante el muestreo y la determinación de la textura de cada unidad de suelo, se actualizaron y asignaron los valores de K en la tabla de datos del archivo *vectorial* trabajado (Figura 34).

FID	Shape *	AREA	PERIMETER	DESCRIPCIO	Factor_K
5	Polygon	764.480691	14.499981	CAMBISOL HUMICO	0.02
6	Polygon	1.514285	0.758914	FEZEM HAPLICO	0.02
4	Polygon	568.821037	13.287083	FEZEM LUVICO	0.02
2	Polygon	113.460682	7.732075	LITOSOL	0.013
1	Polygon	3310.355931	49.574482	LUVISOL CROMICO	0.04
3	Polygon	822.573695	25.185372	LUVISOL ORTICO	0.04
0	Polygon	843.411183	20.841103	VERTISOL PELICO	0.079

Figura 34. Tabla de datos del archivo vectorial del factor K.

Para finalizar el cálculo del factor K, fue necesario seguir la ruta: **ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster > Feature to Raster** (Figura 35) y poder realizar las configuraciones necesarias (Figura 36).

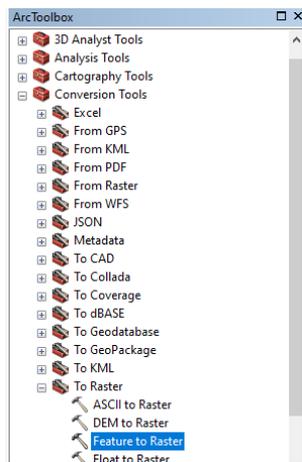


Figura 35. Localización de la herramienta *Feature to Raster*.

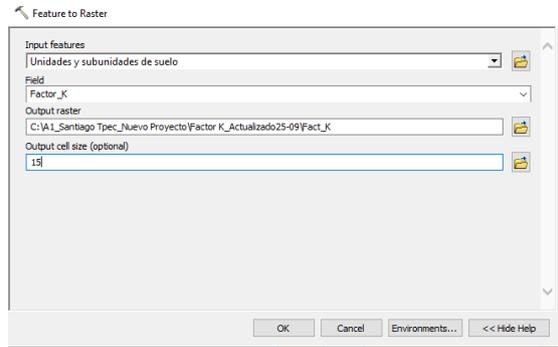


Figura 36. Configuraciones de la herramienta *Feature to Raster*.

Y así fue como se logró obtener el *ráster* de distribución del factor K. (Figura 37).

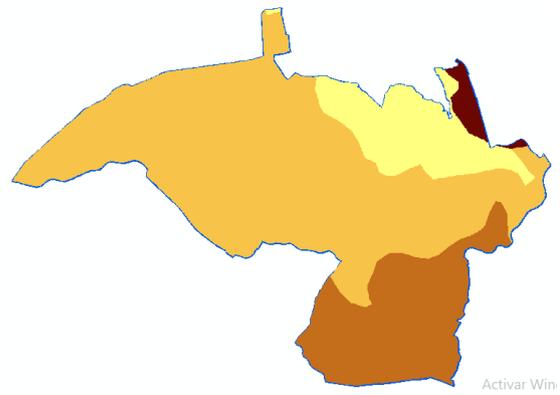


Figura 37. *Ráster* de distribución del factor K en Santiago Tulantepec.

ANEXO 3

Factor LS

Para obtener el factor LS fue necesario contar con el Continuo de Elevaciones Mexicano versión 3.0 del INEGI, el cual tiene una distancia entre píxeles de 15 m. Una vez teniendo el CEM 3.0 de referencia, se procedió a aplicar la ruta siguiente: **ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by**

Mask, con la finalidad de obtener el *ráster* correspondiente al área de estudio (Figura 38).

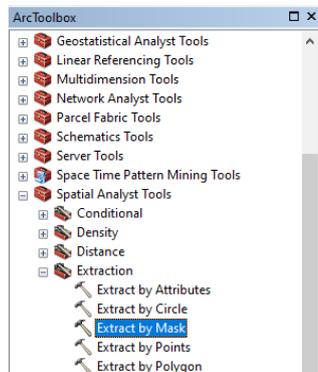


Figura 38. Localización de la herramienta *Extract by Mask*.

Una vez asignadas las referencias para la obtención específica del área de estudio (Figura 39), se permitió obtener el polígono de referencia y de trabajo referente a las elevaciones presentes en Santiago Tulantepec (Figura 40).

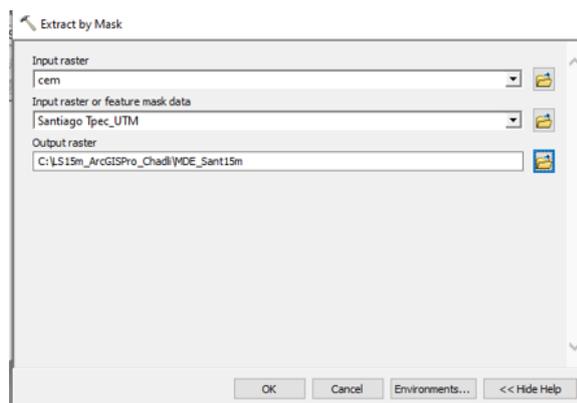


Figura 39. Configuración de la herramienta *Extract by Mask*.

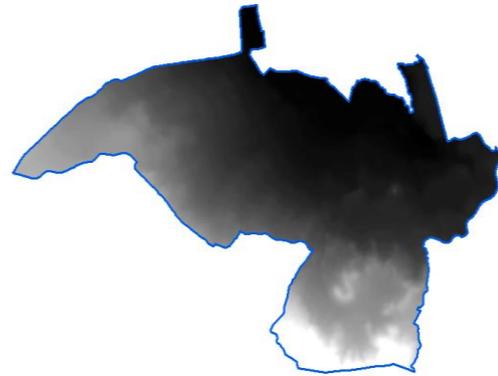


Figura 40. *Ráster* de elevaciones de Santiago Tulantepec.

Teniendo el *ráster* de elevaciones del polígono del municipio y aplicando la metodología del factor LS, de manera inicial fue necesario aplicarle la herramienta *Fill* que se encontró en la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill** (Figura 41) y sus configuraciones necesarias (Figura 42) para obtener el *ráster* de elevaciones sin errores de llenado de pixeles (Figura 43).

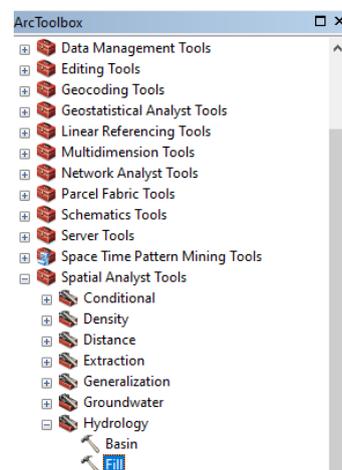


Figura 41. Localización de la herramienta *Fill*.

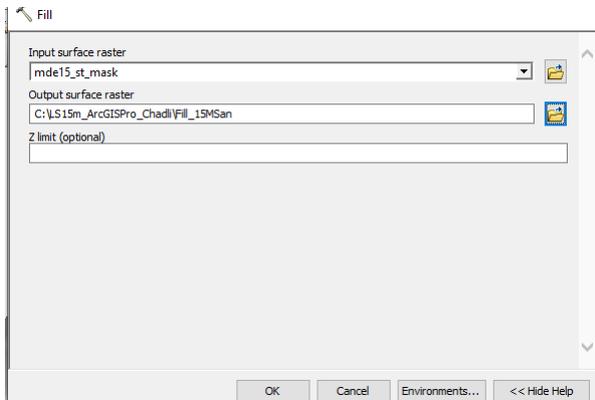


Figura 42. Configuración de la herramienta *Fill*.



Figura 43. Ráster resultante de la herramienta *Fill*.

A continuación, al ráster resultante anterior, se le aplicó la herramienta *Flow Direction*, encontrado en **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction** (Figura 44) y sus configuraciones necesarias (Figura 45) que permitieron obtener la dirección de flujo del municipio (Figura 46).

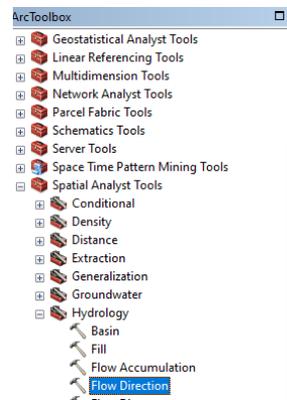


Figura 44. Localización de la herramienta *Flow Direction*.

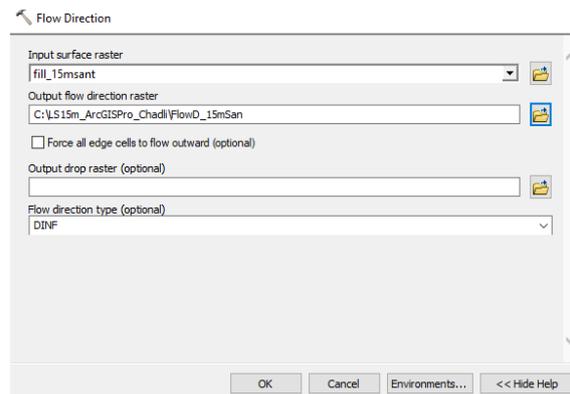


Figura 45. Configuración de la herramienta *Flow Direction*.

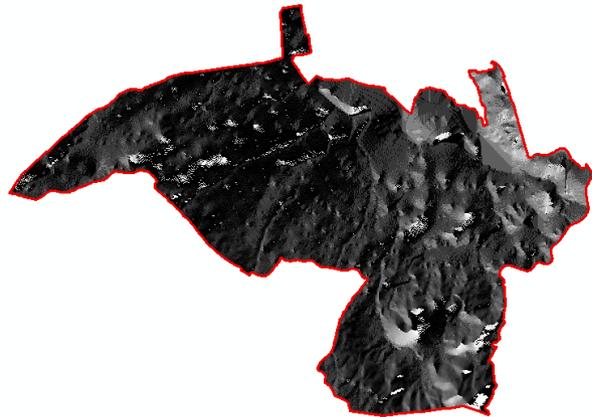


Figura 46. Ráster de dirección de flujo de Santiago Tulantepec.

Posteriormente, al ráster obtenido en el proceso anterior, se le aplicó la herramienta *Flow Accumulation* que se encontró siguiendo la ruta **ArcToolbox >**

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation (Figura 47) y sus configuraciones necesarias (Figura 48) que permitieron obtener la acumulación de flujo de Santiago Tulantepec (Figura 49).

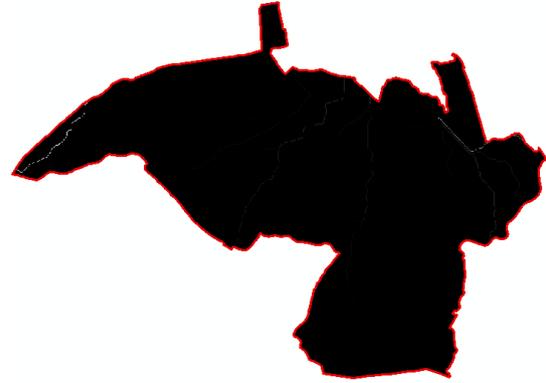


Figura 49. Ráster de distribución de la acumulación de flujo.

De manera siguiente, fue necesario obtener la pendiente del terreno, por ello se tomó la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope** (Figura 50).

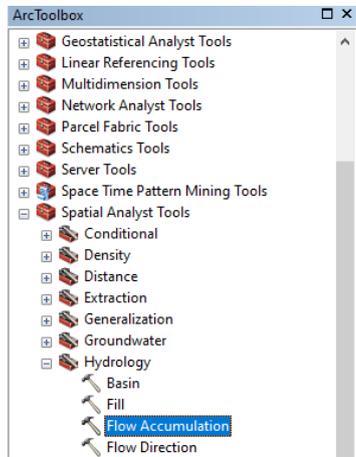


Figura 47. Localización de la herramienta *Flow Accumulation*.

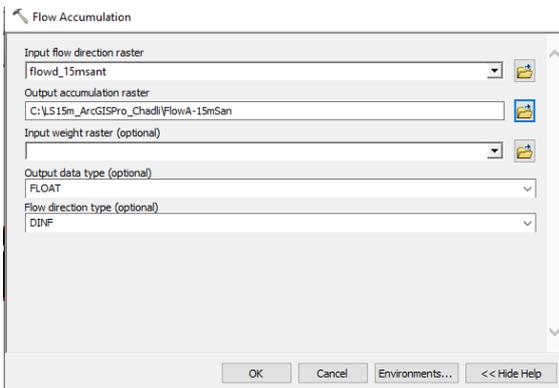


Figura 48. Configuración de la herramienta *Flow Accumulation*.

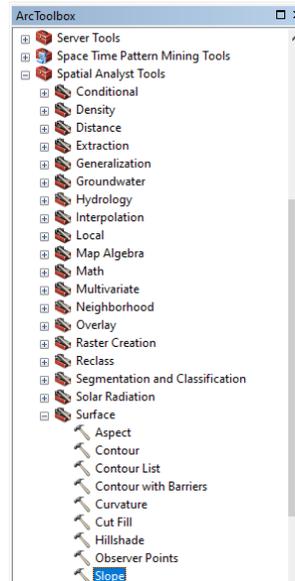


Figura 50. Localización de la herramienta *Slope*.

A la cual se le realizaron las configuraciones necesarias (Figura 51) para poder obtener el ráster de distribución de la pendiente, expresada en grados (Figura 52).

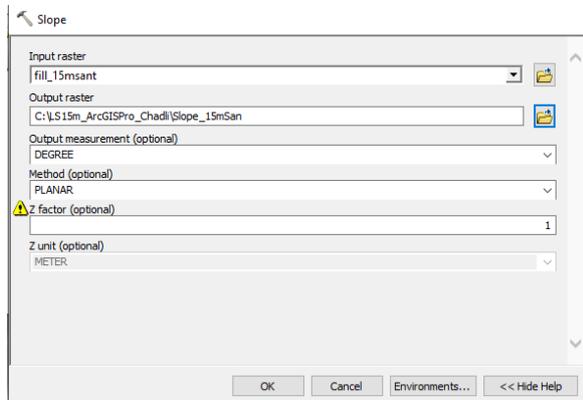


Figura 51. Menú de configuración de la herramienta *Slope*.



Figura 52. *Ráster* de distribución de la pendiente en grados para Santiago Tulantepec.

Una vez realizados los procesos anteriores, se aplicaron las fórmulas relacionadas con la metodología de trabajo, que de manera inicial indicaron el cálculo del valor de β , mediante la función *Raster Calculator* (Figura 53) y que ya fue explicada su localización en procesos anteriores.

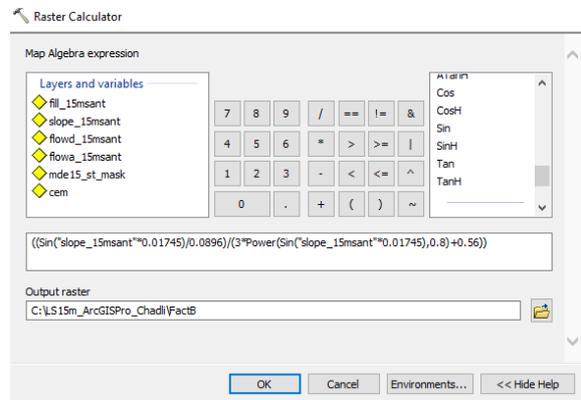


Figura 53. Cálculo del valor de β mediante la herramienta *Raster Calculator*.

Esto permitió la obtención del *ráster* de distribución de β para el municipio (Figura 54).

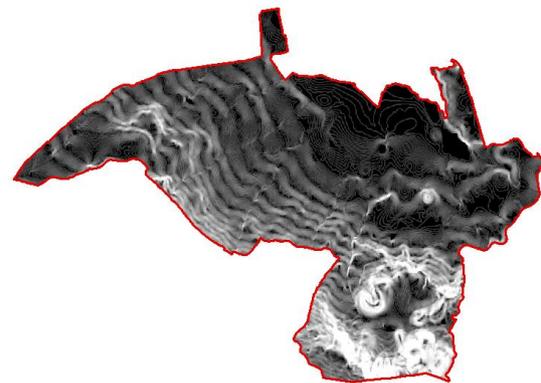


Figura 54. *Ráster* de distribución de β para Santiago Tulantepec.

Después, se procedió a aplicar la fórmula asociada para el cálculo de m , mediante la *Raster Calculator* (Figura 55).

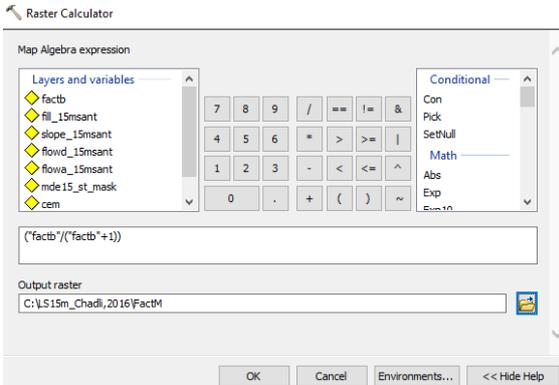


Figura 55. Aplicación de la fórmula asociada a m .

Del mismo modo, se obtuvo el ráster de distribución de m para el área de estudio (Figura 56).

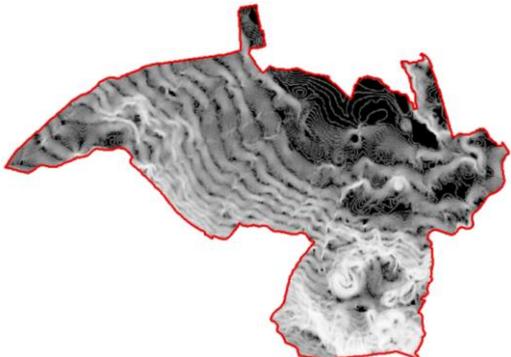


Figura 56. Ráster de distribución de la variable m .

Ya obtenidos los ráster de las variables β y m , se realizó el cálculo del factor L y la aplicación de su fórmula (Figura 57).

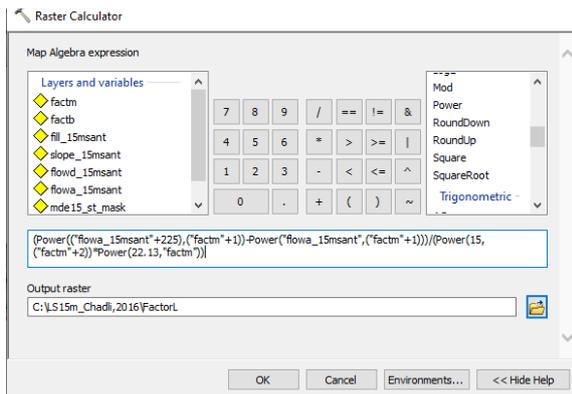


Figura 57. Cálculo del factor L mediante la *Raster Calculator* y su fórmula asociada.

De esta manera, se estimó la distribución del factor L para el polígono de Santiago Tulantepec (Figura 58).

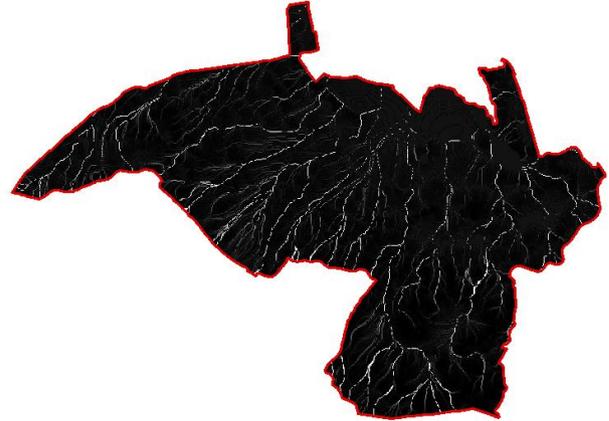


Figura 58. Ráster de distribución del factor L en Santiago Tulantepec.

De manera continua, se estimó el valor del factor S a través de su fórmula asociada y su aplicación en la herramienta *Raster Calculator* (Figura 59).

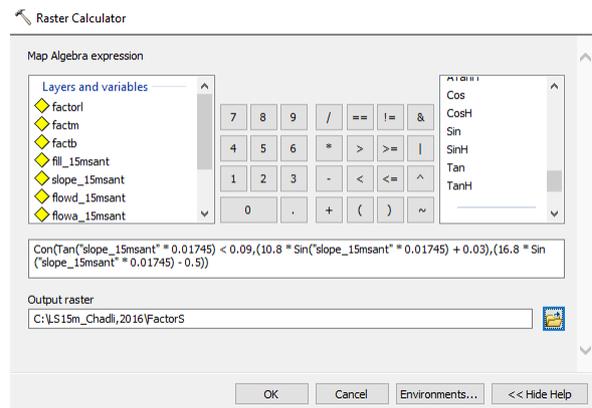


Figura 59. Estimación del factor S mediante la *Raster Calculator*.

Lo que permitió obtener su distribución dentro del polígono del municipio de Santiago Tulantepec (Figura 60).

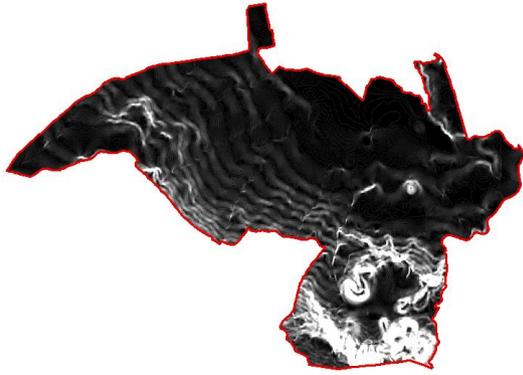


Figura 60. Ráster de distribución del factor S para Santiago Tulantepec.

Finalmente, obtenidos los ráster de distribución del factor L y S, fue necesario su cálculo de manera conjunta mediante la herramienta *Raster Calculator* (Figura 61) y así obtener el factor LS distribuido en Santiago Tulantepec (Figura 62).

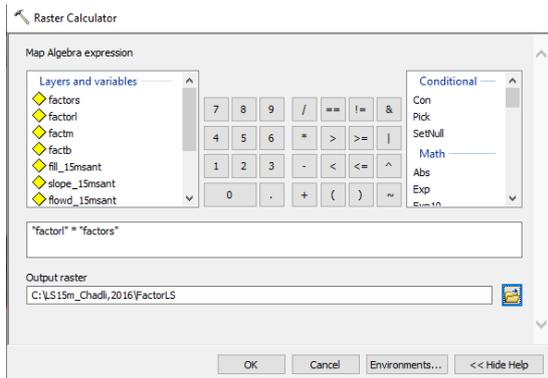


Figura 61. Cálculo del factor LS para el municipio.



Figura 62. Ráster de distribución del factor LS de Santiago Tulantepec.

ANEXO 4

Factor C

Mediante el uso de imágenes satelitales y el polígono de referencia de Santiago Tulantepec, se realizó una clasificación de superficies, de acuerdo a su uso de suelo y vegetación.

Para ello fue necesario la generación de poligonales según los diferentes usos de suelo y vegetación encontrados en el área de estudio (Figura 63).

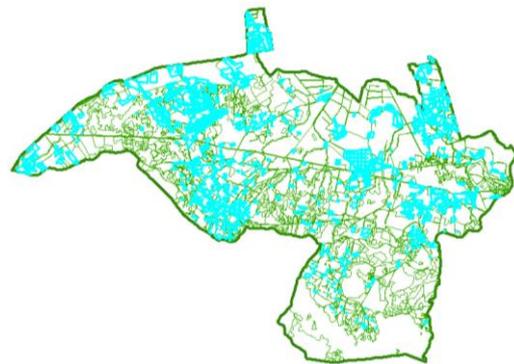


Figura 63. Polígonos de corte para los diferentes usos de suelo y vegetación.

Una vez determinadas las áreas y su análisis, se asignaron los valores correspondientes y que mejor se adaptaron a la realidad del factor C, a través de su tabla de atributos (Figura 64).

FID	Shape *	Veg_2021	Area	Factor_C
365	Polygon	Bosque de táscate de cobertura regular	7.944306	0.03
584	Polygon	Bosque de táscate de cobertura regular	13.376874	0.03
2	Polygon	Camino Rural	240.477809	1
1	Polygon	Carretera	18.413739	0.001
792	Polygon	Corriente de agua	0.588796	0.08

Figura 64. Asignación de valores de C a la tabla asociada a los polígonos de usos de suelo y vegetación.

Continuamente, se siguió la ruta **ArcToolbox > Convesion Tools > To Raster > Feature to Raster** (Figura 65) y sus configuraciones necesarias (Figura 66), con la finalidad de convertir el archivo de polígonos a un formato ráster referente al factor C y su distribución (Figura 67).

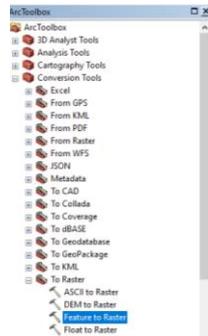


Figura 65. Localización de la herramienta *Feature to Raster*.

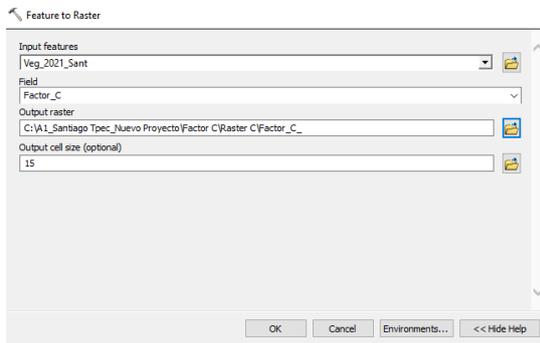


Figura 66. Configuración de la herramienta *Feature to Raster*.

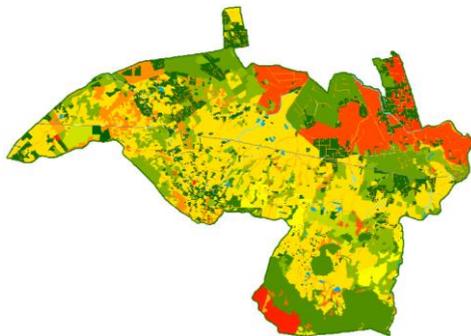


Figura 67. Distribución del factor C en el municipio.

ANEXO 5 Factor P

Una vez clasificado el uso de suelo y vegetación en Santiago Tulantepec y evaluada la posible presencia de obras/prácticas de conservación de suelo y agua, se asignaron los valores a la tabla asociada según P (Figura 68).

FID	Shape	Veg_2021	Area	Factor_P
5	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	0.419609	0.5
6	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	0.184781	0.5
7	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	2.638075	0.5
8	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	0.677376	0.5
9	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	1.992544	0.5
10	Polygon	Agricultura de temporal anual_Maiz	1.871841	0.5

Figura 68. Asignación de valores de P a la tabla asociada.

Realizada la asignación de valores de P, fue necesario aplicar la ruta **ArcToolbox > Convesion Tools > To Raster > Feature to Raster** (Figura 69) y la verificación de sus configuraciones necesarias (Figura 70) que permitieron el procesamiento y obtención de la distribución del factor P en Santiago Tulantepec (Figura 71).

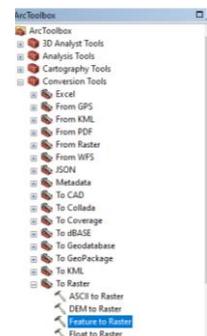


Figura 69. Ruta de localización de *Feature to Raster*.

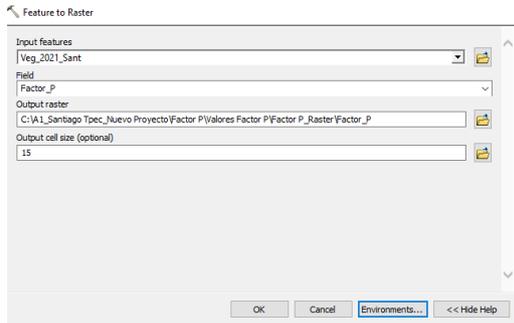


Figura 70. Pestaña de configuración de la herramienta *Feature to Raster*.



Figura 71. Distribución del factor P en Santiago Tpec.

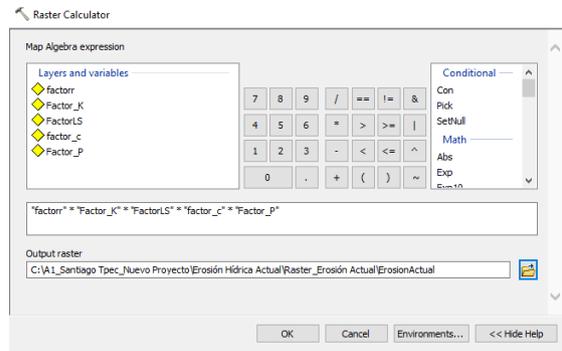


Figura 72. Aplicación de la fórmula de erosión hídrica actual en la *Raster Calculator*.



Figura 73. Distribución de la erosión hídrica actual en Santiago Tulantepec.

ANEXO 6

Erosión Hídrica Actual

Para realizar el cálculo de la erosión hídrica actual y de acuerdo a su fórmula asociada, fue necesario el uso de la herramienta *Raster Calculator* (Figura 72), la cual permitió la estimación de la distribución actual de la erosión, expresada mediante un archivo tipo *raster* (Figura 73).

ANEXO 7

Erosión Hídrica Potencial

En el cálculo de la erosión hídrica potencial, fue necesario solo tomar en cuenta los factores R, K y LS, esto de acuerdo con la fórmula asociada para su determinación, lo cual fue posible mediante su aplicación en la herramienta *Raster Calculator* (Figura 74).

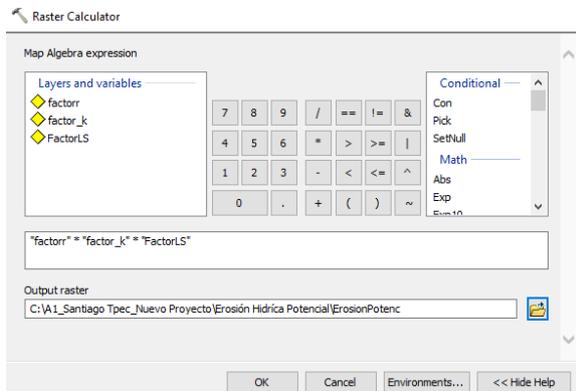


Figura 74. Cálculo de la erosión hídrica potencial mediante la *Raster Calculator*.

Y de este modo, se obtuvo el mapa de distribución de la erosión hídrica potencial para Santiago Tulantepec (Figura 75).



Figura 75. Distribución de la erosión hídrica potencial en el área de estudio.



Universidad
Mariana

UNIVERSIDAD MARIANA

PERSONERÍA JURÍDICA, RESOLUCIÓN No. 230 DEL 25 DE MARZO DE 1970
GOBERNACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO



FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN AMBIENTAL GIA

Certifica que la Presentación Oral titulada:

Estimación de la erosión hídrica de Santiago Tulantepec a través de la EUPSR integrada a SIG

Francisco Daniel Vera-Ramírez; Juan Capulín-Grande; Ramón Razo-Zarate; Naum Abraham Fragosso-López;
Alfonso Suárez-Islas.

Se desarrolló en el

2do Congreso Internacional de Ciencias Ambientales

Celebrado los días 7 y 8 de octubre de 2021 en en modalidad virtual.
San Juan de Pasto

Mg. ROBINSON JIMENEZ TOLEDO
Decano Facultad de Ingeniería

Mg. PAOLA A. ORTEGA GUERRERO
Directora Programa Ingeniería Ambiental

CONGRESO INTERNACIONAL DE DESARROLLO SUSTENTABLE Y ENERGÍAS RENOVABLES

La Asociación Latinoamericana de Desarrollo Sustentable y
Energías Renovables (ALDESER)

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

*Francisco Daniel Vera-Ramírez, Juan Capulin-Grande, Ramón Razo-Zarate, Naum
Abraham Fragoso-López, Alfonso Suárez-Islas.*

Por la presentación del trabajo:

**Estimación de la erosión hídrica de Santiago Tulantepec, Hgo. a través de la
EUPSR integrada a SIG.**



4, 5 y 6 de Noviembre de 2021

Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo
ALDESER

Orizaba, Veracruz, México

“Vivimos en la Tierra como si tuviéramos otra a la que ir”

~ Terri Swearingen ~