



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

IMPLICACIONES DEL USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA Y EROSIÓN EN LA
SUBCUENCA HUICHIHUAYÁN-HUEHUETLÁN, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO.

PRESENTA:

Lic. Geog. VERÓNICA OSORIO CARMONA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ALFONSO MUÑOZ ROBLES

ASESORES:

DR. HUMBERTO REYES HERNÁNDEZ

DR. JAVIER FORTANELLI MARTÍNEZ

Julio 2017

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

El Instituto de Investigación de Zonas Desérticas (IIZD) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo la tutoría del Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles

CON FINANCIAMIENTO DE:

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT)

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 334040

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS DEL
PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

Dedicatoria

A mi mamá:

Con profundo amor, respeto y admiración. Gracias por los valores inculcados, pero sobre todo, por la confianza y apoyo en todo momento para la realización de cada una de mis metas.

A mi familia:

Quienes han confiado en mí para realizar este proyecto de vida mostrando siempre un apoyo incondicional.

A mis mejores amigas Yuri y Ale:

Por estar presentes aun en la distancia, por la comprensión, apoyo y entusiasmo, sobre todo en los momentos difíciles; ¡Gracias!

Al Dr. Carlos:

Gran maestro y director, pero sobre todo amigo; por la motivación para realizar éste posgrado, el tiempo dedicado y la confianza depositada en mí.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de este posgrado.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por haberme dado la oportunidad de continuar con mis estudios de posgrado.

A los profesores del posgrado de Ciencias Ambientales, por compartir sus conocimientos para mi formación.

Al Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles, director de ésta tesis, por su disposición, consejos y críticas constructivas para la realización del posgrado. Mi respeto y admiración.

Al comité tutelar: Dr. Javier Fortanelli Martínez y Dr. Humberto Reyes Hernández por las recomendaciones que enriquecieron el contenido de la tesis.

A la Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez, quien formó parte del jurado, gracias por las sugerencias y el tiempo dedicado para la finalización de este trabajo.

Al Dr. José Antonio Ávalos Lozano, por su colaboración.

A mi amigo Joshua por formar parte en el trabajo de campo, pero sobre todo por su apoyo y amistad.

A mi amiga Gaby por iniciar éste posgrado juntas, por esos días de locura, estrés, alegría y tristeza así como por las noches bohemias. Gracias por formar parte de mi vida estos dos años.

A mis compañeros y amigos de posgrado, por compartir sus conocimientos enriqueciendo cada una de las clases.

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de este posgrado especialmente al Mtro. Alexandro Medina Chena y al Dr. Rafael Villegas Patraca, quienes me apoyaron para ingresar al posgrado.

Contenido

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. ANTECEDENTES	17
2.1. El enfoque de cuenca en el manejo de recursos naturales	17
2.2. Características de las cuencas	17
2.3. El ciclo hidrológico.....	21
2.4. Escorrentía y erosión.....	22
2.4.1. Factores que influyen en la erosión	25
2.4.2. Límites permisibles de erosión.....	27
2.5 Modelos de estimación de escorrentía, erosión y cambio de uso de suelo	29
2.5.1. Modelos de estimación de la escorrentía y erosión	29
2.5.2. Modelos de cambio de uso de suelo.....	33
3. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1 Descripción del área de estudio	35
3.1.1. Localización	35
3.1.2. Fisiografía y Relieve	36
3.1.3. Geología	37
3.1.4. Clima.....	38
3.1.5. Edafología.....	40
3.1.6. Hidrología	42
3.1.7. Vegetación y uso de suelo.....	44
3.1.8. Caracterización socioeconómica de la subcuenca	46
3.2 Metodología	49
3.2.1 Características morfométricas de la subcuenca	49
3.2.2. Estimación de escorrentía y erosión hídrica	50
3.2.3 Validación del modelo SWAT	56
3.2.4. Proyección de la escorrentía y erosión bajo distintos escenarios de cambio de cobertura y precipitación.....	58
4. RESULTADOS	60
4.1. Características morfométricas de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán	60
4.2. Vegetación y uso del suelo.....	61
4.3 Escorrentía y erosión hídrica en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	65

4.3.1 Escorrentía	65
4.3.2 Erosión.....	68
4.4. Validación del modelo SWAT usando datos de gasto medido en estaciones hidrométricas.	71
4.5. Escorrentía y erosión bajo distintos escenarios futuros de precipitación y cambio de uso del suelo y vegetación.....	74
4.5.1. Vegetación.....	74
4.5.2 Escorrentía	76
4.5.3 Erosión.....	79
5. DISCUSIÓN	82
5.1. Escorrentía y erosión hídrica en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	82
5.2 Validación del modelo SWAT usando datos de gasto medido en estaciones hidrométricas. 86	
5.3 Escorrentía y erosión bajo distintos escenarios futuros de precipitación y cambio de uso del suelo y vegetación.....	89
6. CONCLUSIONES.....	92
7. BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS.....	98

Índice de Figuras

Figura 1: Erosión hídrica potencial nacional. Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf	13
Figura 2: Erosión hídrica en san Luis Potosí. Fuente: Ordenamiento Ecológico San Luis Potosí 2008. Fuente: http://evirtual.uaslp.mx/Ambiental/Proyectos	14
Figura 3: Ciclo hidrológico.....	22
Figura 4: Ubicación geográfica de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.	35
Figura 5: Fisiografía (Fuente: Fisiografía, escala 1:1 000 000. INEGI).	36
Figura 6: Mapa de ángulo de inclinación de las pendientes en la subcuenca Huichihuayán- Huehuetlán, San Luis Potosí, México.	37
Figura 7: Geología del área de estudio (Fuente: Mapa Digital de México, Geología escala 250 000, INEGI).....	38
Figura 8: Unidades climáticas en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.	40
Figura 9: Edafología en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.	42
Figura 10: Regiones Hidrológicas (Fuente: Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)).	43

Figura 11: Hidrografía (Fuente: Red Hidrográfica, escala 50 000, INEGI).	44
Figura 12: Vegetación y Uso de Suelo en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán. (Fuente: INEGI, carta de vegetación y uso del suelo serie V)	46
Figura 13: Grado de marginación en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.(Fuente: http://www.conapo.gob.mx)	49
Figura 14: Parámetros de entrada para SWAT y Kineros2.	51
Figura 15: Estaciones climatológicas.....	55
Figura 16: Estación Hidrométrica Requetemu.....	57
Figura 17: Perfil longitudinal del cauce principal en la subcuenca Huichihuayán- Huehuetlán.	61
Figura 18: Vegetación y uso de suelo en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	62
Figura 19: Equivalencias de vegetación y uso de suelo para SWAT.	63
Figura 20: Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en la subcuenca Huichihuayán- Huehuetlán.	65
Figura 21: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 1985.....	66
Figura 22: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 2002.....	67
Figura 23: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 2014.....	68
Figura 24: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 1985.	69
Figura 25: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 2002.	70
Figura 26: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 2014.	71
Figura 27: Coeficiente de determinación (R^2) de la escorrentía superficial calculada y observada.....	72
Figura 28: Gasto mensual calculado y observado: periodo 1983-1987.	72
Figura 29: Gasto mensual calculado y observado: periodo 2000-2004.	73
Figura 30: Sedimentos calculados anuales.	74
Figura 31: Escenarios de vegetación y uso de suelo a futuro para 10, 25 y 50 años.....	74
Figura 32: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 10 años con distinta intensidad y duración.....	77
Figura 33: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 25 años con distinta intensidad y duración.....	78
Figura 34: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 50 años con distinta intensidad y duración.....	79
Figura 35: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 10 años con distinta intensidad y duración.	80
Figura 36: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 25 años con distinta intensidad y duración.	81
Figura 37: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 50 años con distinta intensidad y duración.	82
Figura 38: Precipitación anual. (fuente: http://smn.conagua.gob.mx/).....	84

Índice de tablas

Tabla 1: Límites permisibles de pérdida del suelo	28
Tabla 2: Población total por municipios comprendidos en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán	47
Tabla 3: Población ocupada por municipio y su distribución porcentual según división ocupacional.	47
Tabla 4: Población ocupada por municipio y su distribución porcentual según Sector de actividad económica.	48
Tabla 5: Estaciones climatológicas, CONAGUA empleadas en este estudio.	54
Tabla 6: Ejemplo del formato de entrada para archivo de precipitación diaria en SWAT. .	56
Tabla 7: Periodo de retorno, duración y profundidad de la lámina de la precipitación para el área de estudio	59
Tabla 8: Características morfométricas de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán	60
Tabla 9: Coeficiente Kappa y fiabilidad global	61
Tabla 10: Matriz de cambio para el periodo 1985-2002 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.	63
Tabla 11: Matriz de cambio para el periodo 2002-2014 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.	64
Tabla 12: Tasa de transformación durante el periodo 1985-2002 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	64
Tabla 13: Tasa de transformación durante el periodo 2002-2014 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	64
Tabla 14: Matriz de cambio para el periodo 2024-2039 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.	75
Tabla 15: Matriz de cambio para el periodo 2039-2064 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.	75
Tabla 16: Tasa de transformación durante el periodo 2024-2039 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	76
Tabla 17: Tasa de transformación durante el periodo 2039-2064 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.....	76
Tabla 18: Coeficiente de determinación para escurrimiento superficial obtenidos por otros autores empleando el modelo SWAT.....	86

RESUMEN

La erosión del suelo es un problema ambiental a nivel mundial, con especial énfasis en tierras destinadas a la agricultura, pues ocasiona la pérdida de suelo en tasas superiores a los valores permisibles y la reducción de materia orgánica y nutrientes, lo que ocasiona la degradación de ese cuerpo natural.

La precipitación pluvial y el cambio de uso del suelo son dos de los factores más dinámicos que influyen en la escorrentía y la erosión, en este sentido, se torna pertinente generar escenarios que permitan visualizar los procesos relacionados con las variaciones en dichos factores.

La zona analizada en el presente trabajo correspondió a la subcuenca de Huichihuayán - Huehuetlán, la cual se localiza en los municipios de Aquismón, Huehuetlán, Xilitla, Axtla de Terrazas y Coxcatlán pertenecientes al Estado de San Luis Potosí y una fracción del municipio de Landa de Matamoros perteneciente al estado de Querétaro. En esta subcuenca se estimó mediante el modelo hidrológico SWAT la escorrentía y erosión en las temporalidades de 1985, 2002 y 2014. Asimismo, se generaron escenarios a futuro de la escorrentía y erosión mediante el modelo hidrológico KINEROS2, a partir de proyecciones en la vegetación y uso de suelo para 2024, 2039 y 2064 con periodos de retorno de lluvia de 10, 25 y 50 años con diferente intensidad y duración.

Se observó una disminución en ambos procesos con el paso del tiempo, debido a la recuperación de la vegetación forestal, sin embargo, la erosión en la subcuenca se encuentra por encima de los límites permisibles de erosión. La validación de la escorrentía simulada con datos de estaciones hidrométricas para dos periodos arrojó coeficientes de determinación R^2 de 0.88 y 0.85, con error medio de 34.36% para 1983-1987 y 17.28% para 2000-2004.

Los resultados de los escenarios mostraron que a pesar de la recuperación de bosques y en comparación con 1985, 2002 y 2014, la escorrentía y erosión aumentarían como consecuencia de la variabilidad en las intensidades de la lluvia y se podrán observar los valores más altos en lluvias con duración de 2 h.

Se concluye que la subcuenca posee alto grado de erosión hídrica, sin embargo, mediante modelos hidrológicos se puede contribuir en planes de manejo ambiental para la disminución y control de la erosión hídrica, pues son una herramienta para la simulación de los procesos hidrológicos dentro de una cuenca que nos aproximan a la realidad.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un problema ambiental a nivel mundial, pues afecta de forma predominante tierras destinadas a la agricultura y ocasiona la pérdida de suelo, disminución de materia orgánica y nutrientes, además de modificar la estructura del suelo y reducir su productividad (Morgan, 2009).

Aunque la erosión es un proceso geológico natural, muchas veces es acelerado por prácticas agrícolas inadecuadas, el sobrepastoreo, la deforestación, la urbanización y el cambio de uso del suelo. Debido a esto, la erosión del suelo es un problema económico y social (Alvarado et al., 2007). Se estima que tan solo en Estados Unidos se tienen pérdidas entre \$ 30 mil millones y \$ 44 mil millones de dólares al año (Uri et al., 1998).

En México de acuerdo a Cotler et al. (2007) el costo por erosión en términos de productividad y pérdida de nutrientes por parcela agrícola es de \$16.2 a \$32.4 dólares y de \$22.1 dólares por hectárea al reemplazar los nutrientes perdidos. Sin embargo, las implicaciones de la pérdida de suelo no sólo son la baja producción y el incremento en la utilización de fertilizantes debido a la pérdida de nutrientes, también el abandono de las tierras, baja producción de alimentos, así como la depreciación en el valor del suelo, lo que desencadena otros problemas ambientales, económicos y sociales.

La tasa de pérdida de suelo depende de variables como la cubierta vegetal, el clima, la topografía y las características físicas del suelo, pues influyen en la energía del agente erosivo (intensidad de la precipitación, escorrentía, viento), la resistencia (propiedades mecánica y químicas del suelo) y la protección del suelo (Morgan, 2009). De estas variables, el único factor que brinda protección al suelo es la vegetación, ya que aumenta la retención del suelo y lo protege del impacto ocasionado por los agentes erosivos (Almorox et al., 2010). El grado de protección al suelo dependerá del tipo de vegetación presente, por lo que puede variar tanto en el sentido espacial y temporal.

La vegetación se relaciona con el clima, pues a mayor precipitación mayor es la cubierta vegetal (y su protección al suelo), sin embargo, también puede haber un mayor grado de erosión debido al cambio de uso de suelo, por ejemplo en regiones donde se pueden presentar precipitaciones intensas por encima de 1700 mm debido a su volumen e intensidad. A escala local es importante también considerar la pendiente, el tipo de suelo y el uso de la tierra (Morgan, 2009).

La fuerte presión sobre el uso de suelo ejercida por las actividades humanas ha representado diversas modificaciones en los procesos hidrológicos, biológicos, químicos y físicos (Maya, 2011), mismos que sirven para el funcionamiento adecuado de los sistemas ecológicos. Por esta razón, es importante considerar los diferentes usos de suelo y la influencia que éstos tienen sobre el proceso erosivo y que a futuro servirán de base para medidas que evitarán o disminuirán los cambios en los procesos mencionados.

La erosión hídrica se considera como la más importante (Honorato et al., 2001) debido a la magnitud con la que se presenta y que, en combinación con otras variables, puede causar grandes impactos ambientales y es la causa más importante de la erosión en Asia, África, América y Europa (Santacruz, 2011).

En México, según datos de la Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2012), el 44.9% de los suelos en el país sufre algún proceso de degradación; de éstos, el 11.9% corresponde a erosión hídrica (Figura 1). El 9.5% corresponde a erosión eólica, procesos influidos por las características fisiográficas (geomorfología, climatología, edafología, vegetación) que se encuentran presentes y que actúan en diferente grado en cada región.

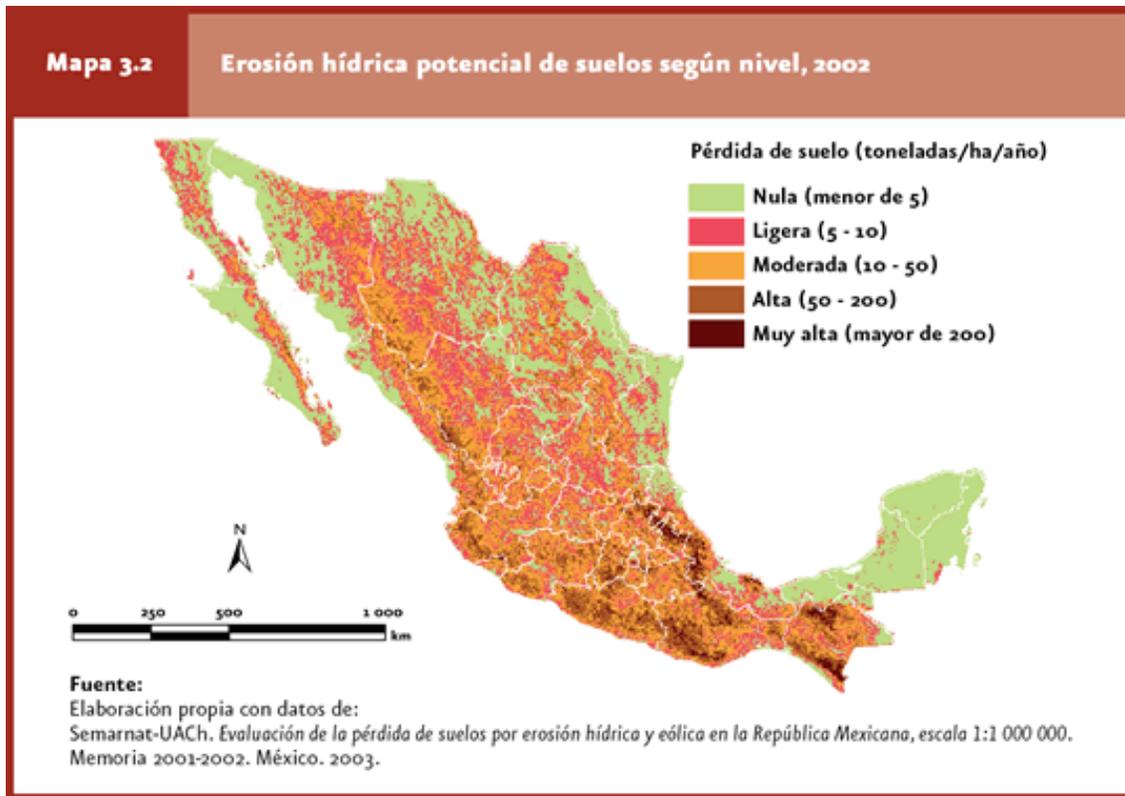


Figura 1: Erosión hídrica potencial nacional. Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

En México, la agricultura es una de las principales actividades económicas que ha originado cambios de uso de suelo. Se estima que existe un aumento en el área de este sector, de 262 389 ha en 1976, a 325 057 ha en 2000, a costa de la disminución de bosques y selvas (Velázquez et al., 2002). Este cambio, en combinación con el clima, pendiente y suelo contribuye al proceso de erosión, sobre todo en regiones de clima tropical y relieve accidentado, donde los procesos geológicos han conformado relieves con pendientes pronunciadas (Uribe et al., 2002).

De acuerdo con la SEMARNAT (2012), en el Estado de San Luis Potosí se presentan 178 175 ha con erosión hídrica ligera, 223 609 ha con erosión moderada, 61 651 ha con erosión severa y 2241 ha con erosión extrema, es decir, un total de 465 678 ha cuentan con algún grado de erosión.

De forma particular en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán existen niveles de erosión de moderado a muy alto (Figura 2), con valores muy altos en la parte central

de la subcuenca en el municipio de Xilitla, donde se tienen pendientes abruptas (Ordenamiento Ecológico de San Luis Potosí, 2008)

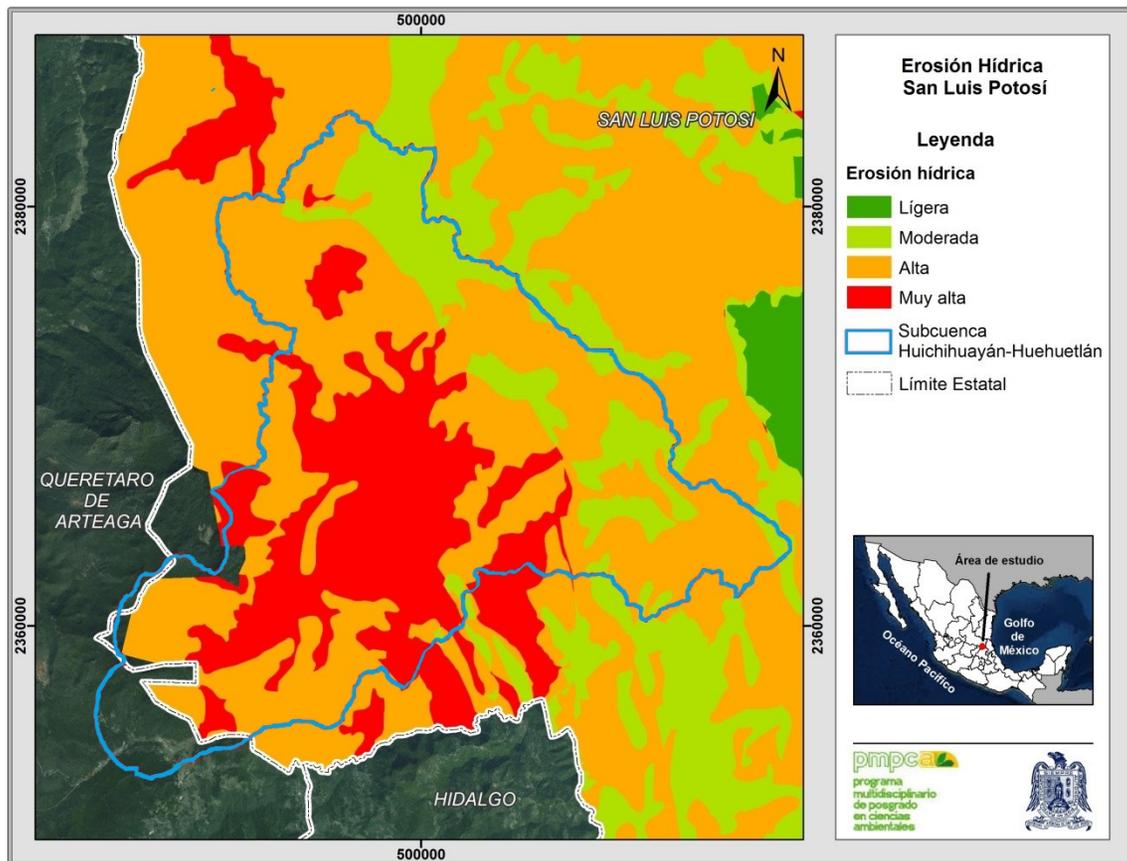


Figura 2: Erosión hídrica en san Luis Potosí. Fuente: Ordenamiento Ecológico San Luis Potosí 2008. Fuente: <http://evirtual.uaslp.mx/Ambiental/Proyectos>

En los últimos años se ha observado una variación en las condiciones climáticas a escala mundial, con evidencias de cambios significativos en los patrones de la precipitación pluvial. En la mayor parte del territorio de México, la temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, con gran importancia para el sector agrícola de temporal. Los registros indican que la precipitación anual ha incrementado 1.8% en las regiones áridas y semiáridas y 1.9% en regiones húmedas (Méndez et al., 2008); estas condiciones pueden modificar la esorrentía y como consecuencia el grado de erosión. Dentro de la región de la Huasteca potosina se han presentado

eventos de precipitación intensa, esto ha ocasionado procesos de remoción en masa en zonas de pendiente abrupta, así como erosión superficial.

Por estas razones, es de gran importancia generar escenarios con cambios de uso de suelo y su interacción con eventos de lluvia de diferentes características (duración e intensidad), que permitan visualizar modificaciones en procesos ecológicos e hidrológicos que puedan repercutir en pérdidas económicas por improductividad de las tierras agrícolas (Gaspari et al., 2009).

El presente trabajo busca conocer las implicaciones, presentes y futuras del cambio en la vegetación y uso de suelo sobre la erosión del suelo en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán en San Luis Potosí. Dichos resultados pueden apoyar a programas de manejo ambiental que contribuyan a la disminución de la erosión hídrica en la región, ya que en esa subcuenca se combinan áreas con uso de suelo agrícola en pendientes pronunciadas con eventos de precipitación intensa.

1.1. OBJETIVOS

General:

Analizar las implicaciones del cambio en el uso de suelo y la vegetación en la escorrentía y erosión mediante un análisis espacio-temporal en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán en San Luis Potosí, México.

Específicos

- Estimar la escorrentía y erosión hídrica del suelo en la subcuenca
- Validar el modelo hidrológico SWAT para estimar la escorrentía y erosión hídrica del suelo.
- Proyectar la escorrentía y erosión bajo distintos escenarios de precipitación y cambio de cobertura.

1.2. HIPÓTESIS

La subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán presenta alto grado de erosión debido al tipo de uso de suelo y precipitaciones intensas. Con el cambio de cubierta vegetal (i. e. disminución de cubierta vegetal) y eventos de precipitación intensa, la escorrentía y la erosión del suelo aumentarán. De continuar con esta dinámica, la pérdida de los suelos se agravará, se reducirá la productividad agrícola y aumentará la degradación ambiental.

2. ANTECEDENTES

2.1. El enfoque de cuenca en el manejo de recursos naturales

Los problemas ambientales que se presentan en la actualidad a nivel mundial, provocados por la contaminación de desechos industriales y domésticos, la deforestación y los sistemas de producción agrícola, ocasionan la degradación de los recursos naturales en las cuencas hidrológicas y pueden reflejarse en la pérdida y degradación de suelos. El enfoque de cuencas hidrológicas ha sido utilizado para evaluar el comportamiento del ciclo hidrológico, dicho enfoque considera la existencia de una interrelación entre factores espaciales y temporales de los procesos que ocurren dentro de una cuenca. (SEMARNAT, 2013).

Las acciones que se lleven a cabo con el manejo de recursos naturales dentro de una cuenca tendrán repercusiones positivas o negativas en las partes bajas, pues modificarán los flujos de sedimentos, nutrientes, compuestos químicos y agua los cuales se acumulan en los puntos de salida de la cuenca (Cotler et al., 2009)

2.2. Características de las cuencas

Para poder planificar un adecuado manejo de los recursos naturales dentro de una cuenca es de suma importancia conocer las características que influyen en su respuesta hidrológica. Así, una cuenca se define como una zona de la superficie terrestre donde la escorrentía fluye y se almacena hacia un mismo punto de salida; esta zona está delimitada por los puntos de mayor elevación altitudinal que se denomina parteaguas (Aparicio, 1992).

Dentro de la cuenca existen las subcuencas y microcuencas, áreas más pequeñas que fluyen hacia una corriente principal con un comportamiento propio, de esta manera es posible trabajar a cualquier escala en el manejo de cuencas. Sin embargo también es posible su fragmentación de acuerdo a la función hidrológica que desempeñan, las cuales se reconocen tres (Garrido, 2010):

1) Área de captación (parte alta), donde el agua que precipita es captada, infiltrada y concentrada en escorrentía, por lo que las condiciones de estabilidad o perturbación en dicha zona serán transferidas a las parte media.

2) Área de captación-transporte (parte media), donde convergen todas las corrientes de las microcuencas.

y 3) Zona de descarga (parte baja), estas zonas presentan estabilidad debido a la perdida de velocidad y erosividad de las corrientes además de ser un depósito de sedimentos. En esta área se desaloja el agua proveniente de toda la cuenca Dependiendo del tipo de salida que tenga esta cuenca se puede clasificar en endorreica (cerrada) o exorreica (abierta) (Becerra, 1999).

El comportamiento hidrológico de una cuenca está determinado por sus características físicas como son la forma, tamaño, pendiente, tiempo de concentración y la red de drenaje (Aparicio, 1992), además de la estrecha relación entre precipitación y escorrentía.

La forma de la cuenca determina el tiempo de concentración de la escorrentía, pues en una cuenca que presenta forma redondeada el tiempo de concentración se da con mayor rapidez, a diferencia de una con forma alargada. Para la estimación se realiza por medio del coeficiente de compacidad de Gravelius K_c , el cual compara la longitud del perímetro de una cuenca con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la cuenca (Fuentes, 2004):

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde

K_c = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km²)

Es de suma importancia conocer el tamaño de una cuenca, pues influye de forma directa en la escorrentía; a mayor tamaño, mayor volumen de escorrentía. A partir

del tamaño de la cuenca es posible saber si es una cuenca grande o pequeña; sin embargo, en términos hidrológicos esto se deduce a partir de características climatológicas y fisiográficas que influyen en la escorrentía. Es decir, una cuenca se considera pequeña cuando se presentan lluvias de alta intensidad y corta duración pero se tienen escorrentías significativas, mientras que en una cuenca grande las crecidas en los ríos se dan con lentitud y cuentan con áreas mayores a 250 km² (Becerra, 1999).

La pendiente del cauce principal es uno de los indicadores más importantes en el grado de respuesta en una cuenca, pues influye en la escorrentía superficial y la energía que está presente; entre mayor sea la pendiente mayor será la velocidad de la escorrentía. Por consiguiente, es un elemento importante en el manejo de cuencas, pues en cuencas con pendientes abruptas y con usos de suelo inadecuados se puede presentar mayor riesgo de erosión. Por medio del desnivel entre los dos extremos de la corriente dividido entre su longitud, es posible conocer la pendiente del cauce principal (Becerra, 1999).

Otra característica importante para el manejo de cuencas es el tiempo de concentración, el cual se relaciona con la forma de la cuenca. Se define como el tiempo que tarda el agua en llegar desde la parte más alejada de la cuenca hasta el punto de salida, sitio donde se presenta la máxima concentración de agua proveniente de todos los puntos de una cuenca (Ibáñez et al., 2011).

$$TC = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

Dónde:

TC= Tiempo de concentración (horas)

S= Área de la cuenca (km²)

L= Longitud del cauce principal (km)

H= Elevación media de la cuenca (m)

La escorrentía forma una red de drenaje, que es un sistema jerarquizado e interconectado de cauces, desde pequeños surcos hasta ríos, los cuales transportan materia y energía dentro de la cuenca. La morfología de una red de drenaje y su densidad, así como el orden de las corrientes, dependen de las características geomorfológicas y bióticas de la cuenca (De Metauco, 2004).

Las características de la red de drenaje también influyen en la escorrentía, como son: 1) el número de corrientes (densidad de corrientes), entre mayor es el número de corrientes, mayor escorrentía; 2) clase de corrientes, estas se clasifican por la duración en que se transporta el agua y pueden ser efímeras, perennes, intermitentes; y 3) la densidad de drenaje, es decir, la longitud total de corrientes, dividida entre el área total de la cuenca (Horton, 1945).

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

Dónde:

D_d = Densidad de drenaje (km/km²)

L= Longitud total de los cauces (km)

A= Área total de la cuenca (km²)

El orden de corrientes está dado por el cauce principal, y existen varios métodos de clasificación. El más empleado es la jerarquización de Horton (1945), quien propone que una corriente sin afluentes es de orden uno, la unión de dos corrientes de orden 1, forman una de orden 2, la unión de dos de orden 2, forman una de orden 3 y así de manera sucesiva. Una cuenca con un orden alto o una densidad de drenaje elevada, presenta un alto grado de disección por lo que su respuesta a una tormenta es rápida.

Las densidades u órdenes de corrientes pequeñas reflejan la poca erosionabilidad de los suelos, los cuales suelen ser muy resistentes o muy permeables, mientras que en las cuencas que presentan valores altos, los suelos suelen erosionarse con facilidad dada su relativa impermeabilidad, además de presentar pendientes altas y escasa cubierta vegetal (Aparicio, 1992).

2.3. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es la circulación, en distintas etapas, del agua sobre la superficie terrestre, la cual pasa de la atmosfera a la Tierra y viceversa, mediante los procesos de evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía (Figura 3). Para el movimiento del ciclo del agua son necesarios dos efectos: la evaporación, por medio de la energía solar y la precipitación y escorrentía, causados por la gravedad terrestre. El vapor de agua que es arrastrado por el viento hacia las partes continentales donde se condensa para formar nubes y originar precipitación; sin embargo, no toda llega al suelo, pues puede evaporarse durante la caída o ser interceptada por la vegetación o infraestructura (Aranda, 1984).

El agua que alcanza la superficie forma escorrentías superficiales; las cuales desembocan en el mar o lagos, o bien logra infiltrarse o percolarse, para formar las aguas subterráneas y desembocar en los mares o volviendo a la atmosfera por evaporación o transpiración de las plantas, por la dificultad que representa separar ambos procesos, ambos se integran como evapotranspiración (Aparicio, 1992) .

Es importante conocer las cualidades del sistema hidrológico, pero también las cantidades de agua que se presentan en cada etapa donde interactúan distintas variables físicas, temporales y espaciales. El conocimiento de las cantidades de agua que se presentan en cada etapa, es parte primordial para el manejo de cuencas, pues por medio de los resultados y conociendo como ocurren estos procesos, se pueden establecer acciones para un manejo sustentable dentro de la cuenca (Aranda, 1984).

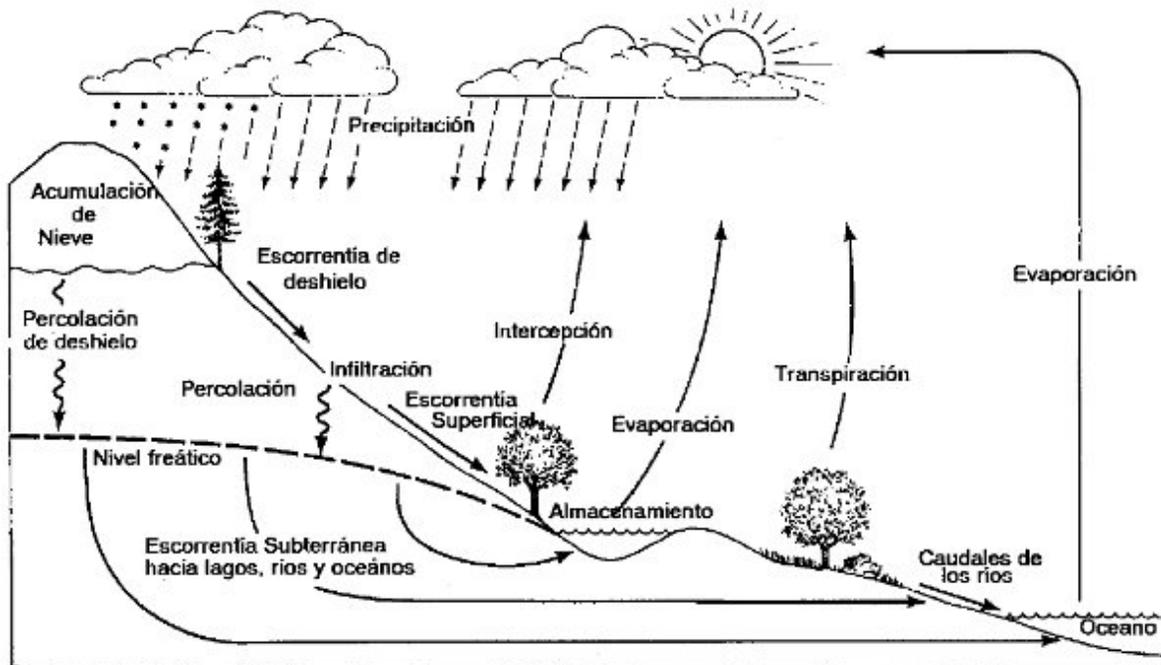


Figura 3: Ciclo hidrológico.

2.4. Escorrentía y erosión

Los cambios de uso de suelo afectan de manera significativa a la dinámica hidrológica de las cuencas, ya sea por construcción de presas, crecimiento urbano, deforestación o actividades ganaderas como el sobrepastoreo. Numerosos estudios, tanto en parcelas como en cuencas experimentales, han demostrado un incremento en la escorrentía cuando existe deforestación y compactación del suelo (por sobre pastoreo), situación que presenta impactos para diversos factores que interactúan en el ecosistema (Descroix et al., 2004).

Entre los primeros estudios donde se demostró la interrelación entre cobertura forestal y escorrentía, se encuentra el de Hibbert (1965) con resultados de 39 cuencas experimentales; este autor concluyó que la reducción de la cobertura forestal incrementa la escorrentía, mientras que la reforestación disminuye los escurrimientos, por lo que es importante el manejo forestal de las cuencas hidrológicas.

Las escorrentías son definidas como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo de la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca. Cuando se presentan eventos de precipitación, el agua es interceptada por la vegetación, luego alcanza la superficie del suelo y se infiltra hasta saturar el suelo (Aparicio, 1992).

Cuando el suelo ha sido saturado el agua empieza a escurrir sobre la superficie, a este flujo se le conoce como flujo en la superficie del terreno, hasta que llega a un cauce definido se convierte en escorrentía; durante este trayecto el agua de la escorrentía seguirá infiltrándose o evaporándose en pequeñas cantidades (Aparicio, 1992).

La cantidad de agua en la escorrentía se relaciona con las características de la lluvia, entre las cuales destacan:

- a) Cuando la intensidad de la lluvia es menor a la velocidad de infiltración del suelo, la escorrentía superficial es nula porque se tiene mayor infiltración hasta que se alcanza el nivel de saturación del suelo y se forman escorrentías.
- b) Cuando la intensidad de la lluvia es mayor a la velocidad de infiltración, solo se infiltra parte del agua precipitada, la escorrentía superficial se desarrolla de manera rápida o forma charcos en zonas planas.

Por otra parte, la velocidad de la escorrentía depende de la pendiente. Sin embargo, para Braud et al. (1999) la variabilidad de la lluvia y el tipo de suelo son factores que influyen de manera significativa en los escurrimientos más que la variabilidad de la vegetación.

La erosión es un proceso natural definido por la FAO (PRADO et al., 1993) como el desprendimiento, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos. Sin embargo, este proceso puede ser acelerado por el uso y manejo inadecuado del suelo, el cual provoca múltiples problemáticas de orden ambiental, social y económica ya planteadas con antelación, por tanto se torna indispensable

conocer las etapas en que se presenta la erosión para implementar acciones que disminuyan dicho impacto.

De acuerdo a los agentes erosivos, la erosión se clasifica en hídrica, eólica y gravitacional. La erosión hídrica es un proceso físico cuyo agente erosivo es el agua, cuya cantidad y velocidad aportarán la energía al sistema. Existen tres tipos de erosión hídrica: 1) **Laminar**, originada por el impacto de la gota de lluvia y el arrastre posterior de las partículas de suelo desprendidas, por un flujo superficial poco profundo; este tipo de erosión es poco visible, debido a que los cultivos crecen de manera estable y se tiene presencia de materia orgánica y/o cobertura vegetal, misma que disminuye el impacto de las gotas sobre el suelo. 2) En **surcos**, provocados por flujos concentrados de agua que forman pequeños surcos sobre el suelo, derivados de las irregularidades y rugosidades de la superficie; cuando se presenta este tipo de erosión disminuye la materia orgánica, la infiltración y el rendimiento productivo, debido a pérdidas de suelo y de nutrientes, esta situación está relacionada con el uso intensivo por la actividad agrícola. 3) **Erosión en cárcavas**, que son cauces con fuertes pendientes que presentan alto grado de erosión; estos suelos presentan baja productividad, por lo que suelen ser abandonados. En regiones con clima húmedo y subhúmedo las cárcavas evolucionan con rapidez (Almorox et al., 2010).

Por otra parte, la erosión eólica es el proceso de disgregación, remoción y transporte por acción del viento, este tipo de remoción es favorecido bajo condiciones de vientos fuertes y frecuentes, superficies planas, suelos de textura fina, seco, en regiones de climas secos y una escasa cubierta vegetal (Almorox et al., 2010).

La erosión, además de la pérdida de suelo ocasiona otros problemas entre los cuales destacan (Becerra, 1999):

- Reducción de profundidad del horizonte A y pérdida de fertilidad del suelo
- Pérdida de nutrientes
- Pérdida de capacidad de retención de agua
- Compactación de suelo y afloramiento de rocas
- Aumento de sedimento en ríos y presas

- Formación de grietas y cárcavas
- Disminución de productividad agrícola.

2.4.1. Factores que influyen en la erosión

El grado de erosión depende de factores físicos como el clima, tipo de suelo, la pendiente y la vegetación; sin embargo es acelerado por las prácticas agrícolas inadecuadas y por el cambio de uso de suelo. Estos cambios provocan una disminución de nutrientes y, por ende, menor productividad (Tayupanta, 1993); pero también se pueden observar cambios ambientales, por ejemplo, mayor escorrentía debido a la pérdida de materia orgánica y cubierta vegetal, el azolve en ríos, procesos de remoción en masa e inundaciones (Morgan, 2009).

Entre las variables que condicionan el grado de erosión, la cubierta vegetal y el cambio en el uso de suelo son las que pueden ser modificadas con mayor facilidad de manera espacial y temporal por el ser humano; sin embargo, también los cambios en éstas pueden originar la aceleración o disminución de la erosión. Para entender el problema de la erosión es necesario conocer las interrelaciones existentes entre el clima, el suelo, vegetación y la pendiente con el cambio de uso de suelo dentro de una cuenca (Morgan, 2009).

El clima está relacionado con el proceso de erosión por la precipitación, en especial por las lluvias de intensidades altas, que son el principal factor de la erosión hídrica. En regiones donde las lluvias son escasas la erosión es menor, pues es el proceso es detenido por la vegetación, la cual reduce el impacto de las gotas y disminuye la escorrentía, ya que favorece la infiltración. Por el contrario, en regiones donde las precipitaciones son frecuentes, como es el caso de las regiones tropicales donde se alcanzan precipitaciones anuales mayores a 1000 mm y la vegetación abundante (Morgan, 2009), el proceso de erosión se acelera al eliminar la cubierta vegetal y al dejar al suelo desprovisto de protección.

La cantidad de lluvia y las características de la precipitación (e. g. intensidad, duración, frecuencia) pueden causar altas tasas de erosión en suelos con escasa

cubierta vegetal; además, el grado de erosión aumenta en zonas con fuertes pendientes y suelos susceptibles a la erosión (Hudson, 1982). Cada evento de lluvia presenta distintas características que favorecen la erosión; por ejemplo, se pueden producir escorrentías tanto con precipitaciones intensas de corta duración que rebasan la capacidad de infiltración, como por una tormenta de larga duración y baja intensidad que satura el suelo (Morgan, 2009).

Los cambios en el uso de suelo aceleran el proceso de erosión, pues la vegetación actúa como capa protectora de éste, y puede cambiar el volumen y la energía de las gotas de lluvia, al ser interceptadas por las hojas y tallos, mientras que las raíces contribuyen a la resistencia mecánica de los suelos. La cobertura vegetal aumenta la cantidad de materia orgánica, por lo que disminuye la velocidad del flujo de la escorrentía debido a la rugosidad superficial y aumenta la infiltración por la estructura granular del suelo superficial (Almorox et al., 2010).

Los efectos protectores que la cobertura vegetal tiene sobre el suelo varían según a las características estructurales de cada tipo de vegetación (cobertura, estratificación, densidad y distribución de raíces, características de los tallos, altura del dosel) las cuales originan que la velocidad de la escorrentía se reduzca en la medida que la cubierta vegetal se torna más densa (Morgan, 2009). Aunque existen pocas investigaciones sobre esto, se acepta que una cobertura vegetal de al menos entre el 30% y 40% puede ofrecer una protección razonable (Hooke et al., 2017; Morgan, 2009).

Otro factor que influye en el proceso erosivo es el tipo de suelo, sus propiedades físicas y químicas, el contenido de materia orgánica, el material original y el grado de meteorización. Entre los factores que más influyen en el proceso se encuentran la distribución de partículas de acuerdo a tamaño, forma, profundidad del perfil, grado de agregación y humedad inicial (Tayupanta, 1993).

La erosionabilidad refiere la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte por los agentes erosivos, y depende de la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la capacidad de infiltración, composición orgánica y química, humedad del suelo y prácticas de cultivo, entre otros. Un suelo con buena

agregación mantiene cohesionadas las partículas por lo que reduce la erosionabilidad (Almorox et al., 2010).

La textura del suelo es una propiedad determinante en la erosionabilidad puesto que partículas finas son resistentes al desprendimiento por su cohesividad y las partículas grandes son resistentes al transporte, pues se requiere mayor fuerza para su arrastre (Morgan, 2009). De esta manera se presenta mayor intensidad de erosión en suelos arenosos y limosos y disminuye en suelos arcillosos. Los suelos que poseen 30-35 % de arcilla combinados con materia orgánica forman agregados más estables, que resisten el impacto de las gotas así como la dispersión de las partículas, además de almacenar agua en la componente arcillosa, situación que permite la resistencia a la erosión en su componente laminar; mientras que suelos con arenas y limos que poseen texturas medias a gruesas están más expuestos al proceso (Tayupanta, 1993).

Debido a la gravedad terrestre, la topografía de la superficie es un factor que influye en la erosión hídrica, pues en zonas con poca pendiente la erosión es de baja magnitud. Se espera que el grado de erosión sea mayor con el aumento y longitud de la pendiente del terreno, pues ambos factores contribuyen en el incremento en la velocidad y volumen de la escorrentía superficial. En estudios realizados se ha demostrado que el efecto de la pendiente, en ausencia de la cobertura vegetal original, es más fuerte en climas tropicales con lluvias intensas (Morgan, 2009).

2.4.2. Límites permisibles de erosión

El cálculo y predicción en la cantidad de sedimentos generados es importante en la toma de decisiones de manejo de las cuencas, pues esto puede generar la colmatación de presas o de otros cuerpos de agua lo cual, reduce la vida útil de éstos y afecta los programas de desarrollo. En México se reporta colmatación por escorrentía de 535 millones de toneladas anuales, lo que produce una pérdida de 2.8 t/ha cada año (Vázquez, 1986).

La pérdida de suelo puede existir en cualquier ecosistema, aunque sea mínima, como en un bosque por ejemplo. Sin embargo, para que este ecosistema se conserve productivo, sin degradación, es necesario que las pérdidas sean menores o iguales a las tasas de erosión permisibles. Estos límites se basan en parámetros edafológicos y climáticos que se relacionan con el máximo de pérdida de suelo que garantiza la productividad de forma indefinida. Para lograr dicha productividad es necesario que la tasa de pérdida de suelo: sea igual o menor a la tasa de formación del suelo; que se mantenga estable para evitar la aparición de cárcavas; y que permita mantener cierta profundidad del suelo para la productividad a futuro (Sandoval, 1991).

Los límites permisibles de pérdida de suelo estarán en función de la ubicación geográfica y de las características edafológicas (profundidad, tipo, procesos formadores de suelo y clima); esto significa que la pérdida de suelos deberá ser menor en regiones con suelos poco profundos o en regiones donde la formación del suelo es lenta (Hudson, 1982). Para México, de acuerdo con Becerra (1999), se tienen los siguientes límites permisibles (Tabla 1):

Tabla 1: Límites permisibles de pérdida del suelo

Límites permisibles de pérdida del suelo						
Profundidad del suelo (cm)	Material	Pérdida permisible (t/ha/año)				
		11.2	9	6.7	4.5	2.2
>100	Rocoso	*				
>100	Arena o grava	*				
50-100	Rocoso		*			
50-101	Arena o grava		*			
25-50	Rocoso				*	
25-50	Arena o grava			*		
10-50	Lecho arcilloso			*		
<25	Lecho rocoso					*
<25	arena o grava				*	
<10	Lecho arcilloso				*	

A partir de los límites permisibles señalados con antelación y del mapa de erosión hídrica (Figura 1) de la SEMARNAT (2012) se puede observar que la subcuenca

Huichihuayán-Huehuetlán se encuentra fuera de estos parámetros, pues se tienen pérdidas mayores a 50 t ha⁻¹ año⁻¹.

2.5 Modelos de estimación de escorrentía, erosión y cambio de uso de suelo

Las implicaciones derivadas del cambio de uso de suelo en términos de escorrentía y erosión se han abordado desde enfoques económicos (Gaspari et al., 2009), hidrológicos (Huerta et al., 2014) y ecológicos (Figueroa et al., 2011). Sin embargo, en la gran mayoría de estos estudios ha sido necesario el uso de modelos hidrológicos que permitan conocer la condición actual y futura de un sistema de cuenca. Estos modelos requieren datos de entrada como tipo de vegetación, uso de suelo, precipitación media anual, precipitación diaria, unidades de suelo (propiedades físico-químicas), pendiente, radiación solar, evapotranspiración, temperatura máxima y mínima, así como datos hidrométricos anuales y mensuales (Rivera et al., 2012). Sus características se describen en la siguiente sección.

2.5.1. Modelos de estimación de la escorrentía y erosión

El cálculo de la escorrentía y la erosión en el manejo de cuencas es parte importante para la construcción de canales, drenajes, prevención de los procesos de remoción en masa e identificación de los niveles máximos de zonas de inundación; a partir de estos datos se pueden predecir los niveles de la escorrentía en una cuenca.

Los modelos hidrológicos se han utilizado en distintas regiones. Tal es el caso de la cuenca del Río Cabriales, Venezuela, donde validaron con datos observados los modelos de lluvia-escorrentía HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) y HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension). Estos modelos simulan los procesos hidrológicos a nivel de cuenca como es la infiltración, hidrogramas unitarios, evapotranspiración, nieve derretida, humedad de suelo, escorrentía, previsión de flujo, y análisis meteorológico, entre otros. Los resultados medidos de lluvia-escorrentía coincidieron en la temporada de sequía, con un coeficiente de correlación de 0.99, el cual es considerado un valor aceptable (Vega et al., 2015).

En España, mediante el modelo RMMF (Revised Morgan-Morgan-Finney Model), que predice la pérdida promedio anual de suelo a partir de la escorrentía y las tasas de desagregación por salpicadura y escorrentía, se realizó un estudio sobre la predicción de escorrentía y erosión del suelo, para diferentes escenarios de uso de suelo mediante la aplicación del modelo implementado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Fueron considerados cuatro usos de suelo: cultivo, bosque mediterráneo, matorrales dispersos y campos abandonados. Las simulaciones de escorrentía se realizaron en dos escenarios futuros; uno que simuló la recuperación de la vegetación en campos abandonados y otro sin considerar esta recuperación. Con la recuperación de la vegetación disminuyeron la escorrentía y la erosión del suelo (López et al., 2013). El Modelo RMMF requiere como datos de entrada: mapa topográfico, mapa de suelos, vegetación y uso del suelo, precipitación diaria, mapa de geología, así como estudios preliminares de las cuencas (geología, meteorología, e información estadística) (Basayigit et al., 2010).

El modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) es un método para calcular la erosión total laminar y en surcos en un segmento de pendiente. Requiere seis factores: la erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), longitud de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C) y prácticas de conservación (P) (Wischmeier et al., 1978). Gaspari et al. (2009), realizaron un diagnóstico temporal, espacial y económico de los problemas que causa la erosión hídrica en Argentina, mediante un sistema de información geográfica y el modelo USLE. Los resultados mostraron que la escorrentía aumentó en una zona sin manejo sustentable, donde se incrementó la erosión, mientras que la economía de la región se vio afectada, pues se registró una disminución en la productividad de los cultivos y en los ingresos económicos.

Otro diagnóstico de erosión hídrica en Argentina consistió en un análisis cualitativo en campo con apoyo de imágenes satelitales (paisaje, suelo, vegetación, geología, etc.) y un método cuantitativo basado en el modelo hidrológico HYMO 10, para el cálculo de caudales en una tormenta típica de la zona y el método USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) para la estimación de sedimentos. El modelo

hidrológico HYMO 10 es un modelo matemático de lluvia-escorrentía para cálculos hidrológicos de crecientes en cuencas que no presentan datos de aforo, permitiendo la simulación del sistema hidrológico. Calcula hidrogramas de escurrimiento, determina la escorrentía, el caudal pico y el tiempo al pico del Hidrograma (Gaspari et al., 2003). La correlación entre los diagnósticos cualitativo y cuantitativo permitió localizar sitios de erosión hídrica por la escasa cobertura vegetal la implementación de técnicas en el uso de suelo que al ser combinadas con las características de pendiente favorecían la degradación del suelo.

En estudios realizados en México (Mendoza et al., 2002) se ha demostrado que las condiciones hidrológicas en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, se han modificado debido a los cambios ambientales ocurridos entre 1975 y 2000, lo que ha incrementado la escorrentía en algunas zonas, de manera principal en las planicies. Esto da una pauta para deducir que también existe un incremento en la erosión hídrica en consideración con otros factores (cobertura vegetal, precipitación, pendiente). Este análisis se realizó mediante percepción remota por medio de SIG con el modelo de balance hídrico de Thornthwaite y Matter.

Los sistemas agrícolas en México contribuyen al aumento en la erosión hídrica debido a las características fisiográficas presentes en algunas regiones. En la región de la Sierra Madre Oriental se comprobó mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y pruebas de laboratorio, que los cambios en las propiedades físicas del suelo y los procesos hidrológicos varían de acuerdo con la etapa en la que se encuentren los cultivos. Se determinó que durante el período de barbecho del sistema de cultivo roza-tumba-quema, la tasa de erosión disminuyó durante el primer año, debido al crecimiento de cubierta del suelo, sin embargo, el periodo de recuperación de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo (porosidad, densidad, tasas de infiltración) requieren temporalidades mayores aun año para incrementar el carbono orgánico (Avwunudiogba, 2012). La ecuación RUSLE fue desarrollada para cubrir limitaciones de USLE como son nuevos valores de erosividad, nuevos métodos para calcular el factor C, y la computarización de algoritmos para cálculos, entre otros. Sin embargo, ambas ecuaciones no funcionan

para estimar rendimientos de sedimentos en pendientes ni en cuencas grandes (Renard et al., 1991).

Otro estudio sobre la erosión con diferente manejo agrícola (tradicional, labranza mínima y de conservación) se realizó en la cuenca del lago de Zirahuén en el Estado de Michoacán. El objetivo de este trabajo fue la predicción de la erosión hídrica mediante USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y Sistemas de Información Geográfica en diferentes escenarios de manejo agrícola. Se demostró que el manejo de labranza de conservación elimina la erosión alta (Bravo et al., 2009).

Existen diferentes métodos para la evaluación de la erosión hídrica; cada uno de ellos puede reflejar resultados diferentes, y esto se puede comprobar en un estudio realizado en la microcuenca de Hualahuises en Nuevo León, donde se utilizó un método directo (unidades geomorfológicas) y la ecuación RUSLE (unidades ambientales). Los resultados de ambos métodos fueron comparados con investigaciones realizadas con antelación, en las cuales se obtuvieron resultados diferentes, debido a la sobreestimación o subestimación con respecto a la pendiente, a la presencia de cárcavas en la zona, pues cada método brinda diferente peso a las variables consideradas (Pando et al., 2003).

Otro modelo para el cálculo de la erosión hídrica, producción de agua y sedimentos a nivel de cuenca es SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual fue diseñado para cuantificar el impacto de las prácticas de manejo de tierras mediante la simulación de los diferentes procesos del ciclo hidrológico en distintas escalas de tiempo. Este modelo se aplicó en la cuenca Ixtapan de Oro en el Estado de México, en donde se compararon valores con la técnica de álgebra de mapas. SWAT subestima los valores del factor topográfico en pendientes mayores a 25%; sin embargo, se puede corregir e introducir valores de forma manual (Rivera et al., 2012).

Yuan et al. (2015) analizaron en las montañas Taihang, norte de China, el efecto del cambio del uso del suelo en la escorrentía y en la producción de sedimentos, a través del modelo de erosión del suelo y sedimentos: DSESYM (Distributed Soil

Erosion and Sediment Yield Model), el cual simula procesos hidrológicos como infiltración, intercepción, almacenamiento, escorrentía superficial, y rendimiento de sedimentos; esto para eventos de lluvia única y no eventos continuos. Se realizaron 14 escenarios de uso de suelo mezclados, y se demostró que la escorrentía y los sedimentos aumentaron bajo escenarios de cultivos, mientras que en zonas de bosques y matorrales disminuyeron.

2.5.2. Modelos de cambio de uso de suelo

Los modelos de cambio de uso de suelo son una herramienta para explicar esos procesos con respecto a las variables económicas, sociales y espaciales que los producen. A partir de ellos se pueden proyectar los posibles impactos ambientales y sociales que se desencadenarían, lo que permite la evaluación y la formulación de posibles planes de manejo para el desarrollo y uso sustentable (Aguayo et al., 2007).

El cambio de uso de suelo desempeña un papel fundamental en los cambios en la escorrentía, como fue demostrado por Figueroa et al. (2011) en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), imágenes de satélite y el software Idrisi. Durante un periodo de 34 años se presentaron cambios en la escorrentía y en los niveles de erosión debido a la disminución de cobertura vegetal y al aumento de zonas agrícolas y urbanas.

Los modelos de cambio de uso de suelo usan variables como áreas urbanas, vías de comunicación, condiciones topográficas, infraestructura y tierras en situación especial (por ejemplo áreas protegidas). El principal punto para la modelación es identificar las variables que ejercen presión sobre el cambio de uso de suelo (Henríquez et al., 2006). En este sentido, en el sureste mexicano se realizó un modelo de simulación del proceso de deforestación en el cual se utilizaron variables como altitud, pendiente y distancia a carreteras, y determinaron mediante análisis estadístico que estas variables explicaron un 90% de la variabilidad en la deforestación (Mas et al., 1996).

Otro modelo de cambio de uso de suelo fue realizado para el estado de Michoacán, donde se utilizaron variables socioeconómicas (población total, cambio en viviendas totales, población indígena). Los resultados comprobaron que el estado atraviesa por una etapa de degradación del recurso forestal, sobre todo en zonas escarpadas con baja presión demográfica pero con alta actividad forestal como consecuencia de un desarrollo económico no sustentable (Bocco et al., 2001).

En la región del Biobío, de manera específica en la Ciudad de los Ángeles, Chile, se evaluaron y simularon los cambios en la escorrentía superficial para el periodo 1998–2022, mediante el SIG Idrisi Kilimanjaro, métodos de Cadenas de Markov, evaluación multi-criterio y autómatas celulares. En este estudio se consideró la evolución de usos de suelo y sus cambios futuros. Se observó un mayor incremento en la escorrentía, como resultado del crecimiento de la ciudad de Los Ángeles para 2022 (Henríquez et al., 2006).

El Kit de modelado del cambio de uso de la tierra (LUCK) es un método para la simulación de la transformación espacial de los patrones del uso de la tierra, el cual incluye tres categorías como las principales tendencias de cambio: la urbanización, la agricultura y el uso forestal. LUCK se basa en datos espaciales básicos, como son uso de la tierra, suelo y topografía. Dicho modelo fue aplicado en una cuenca de meso-escala en el sudoeste de Alemania, donde realizaron la simulación de diferentes escenarios de uso de la tierra, para mostrar la influencia de diferentes eventos de tormenta sobre la escorrentía, para finalizar se determinó que ésta depende en mayor medida de las características del evento de lluvia y no de las condiciones del uso de la tierra, lo que puede provocar inundaciones (Niehoff et al., 2002).

En el centro-sur de Chile, las cuencas hidrográficas han sufrido transformaciones territoriales, por lo que Aguayo et al. (2007) evaluaron el efecto hidrológico de futuros escenarios de vegetación y uso de suelo. Los escenarios fueron realizados mediante un modelo de regresión logística hacia los años 2018, 2028 y 2038. Los resultados mostraron una disminución en los caudales, como resultado del aumento de la cobertura forestal.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1. Localización

La subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán se encuentra en los municipios de Aquismón, Huehuetlán, Xilitla, Axtla de Terrazas y Coxcatlán en San Luis Potosí, y Landa de Matamoros perteneciente al estado de Querétaro, abarca un área de 699.62 km² (Figura 4).

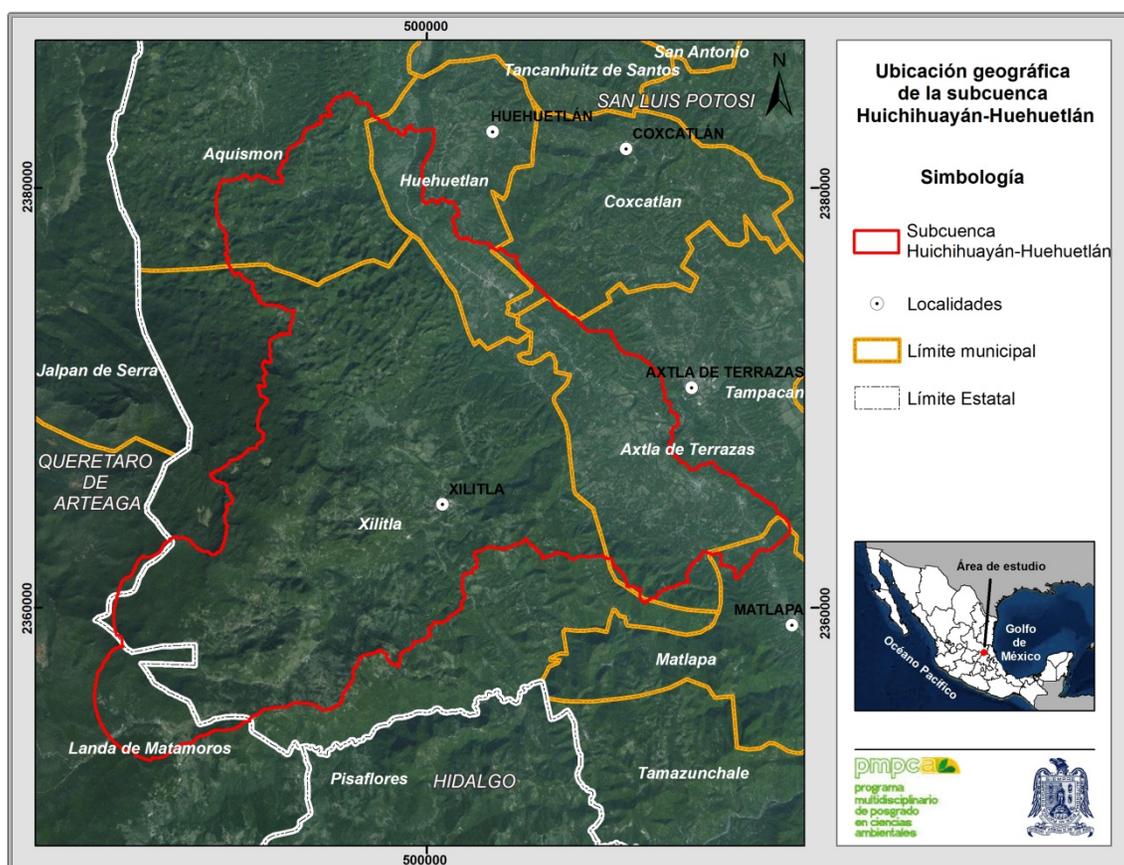


Figura 4: Ubicación geográfica de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.

3.1.2. Fisiografía y Relieve

La subcuenca se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental dentro de la subprovincia del Carso Huasteco (Figura 5) (INEGI, 2001).

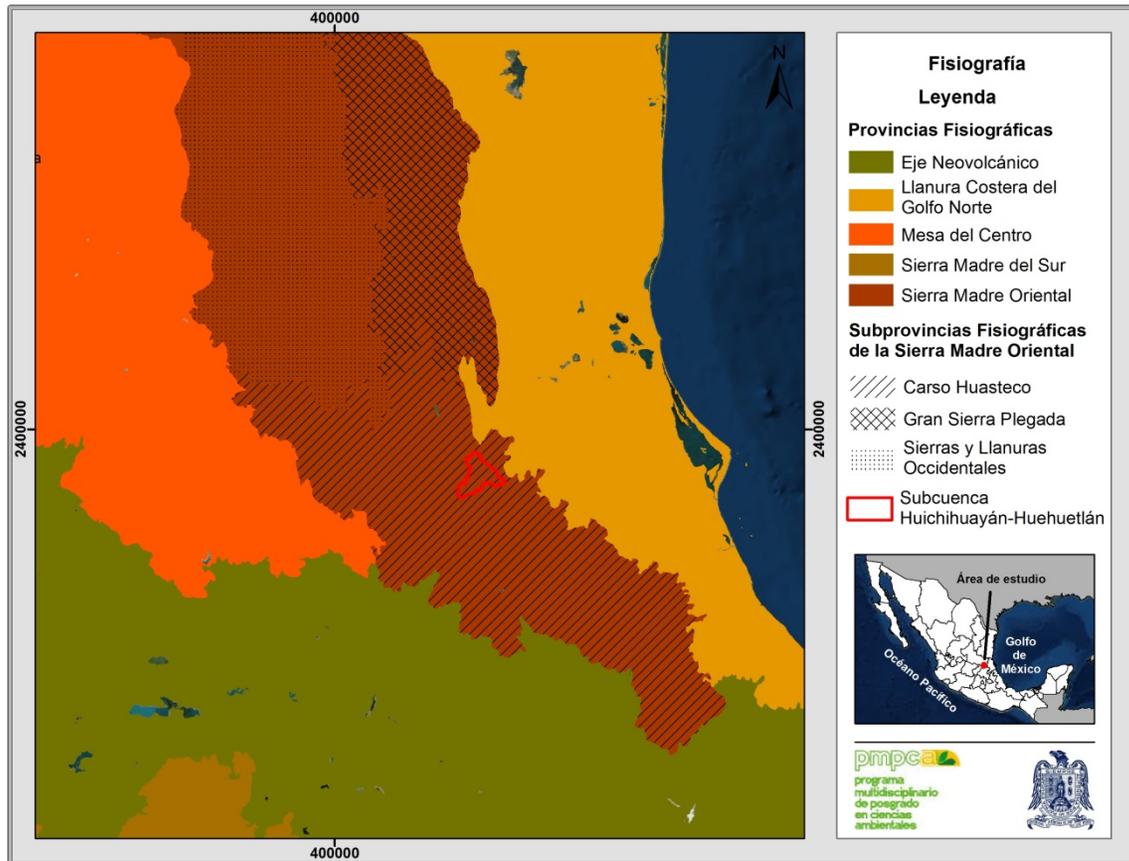


Figura 5: Fisiografía (Fuente: Fisiografía, escala 1:1 000 000. INEGI).

La Sierra Madre Oriental es un sistema montañoso desde la frontera septentrional, en el estado de Nuevo León, hasta el sistema Neovolcánico Transversal, su orientación predominante es al noroeste y en la superficie predominan las calizas cretácicas. Debido a la variedad climática que se presenta en este sistema se originan procesos exógenos, de los cuales resulta la formación de grandes mantos de pie de monte en el norte, Karst en el sur y erosión fluvial por corrientes perennes en el centro-sur (Lugo-Hubp, 1990). La subprovincia Carso Huasteco, se encuentra

al sur de la Sierra Madre Oriental, presenta alto grado de disección, encontrando cañones debido a la acción de los ríos como el Tampaón, además de depresiones, grutas e infiltración como resultado de la presencia de calizas (INEGI, 2002). En esta subprovincia podemos encontrar los altos topográficos corresponden a los cerros San Gaspar, El Madroño y Grande en la Sierra de Xilitla, con elevaciones que oscilan entre los 2600 y 3000 msnm con pendientes abruptas (Figura 6).

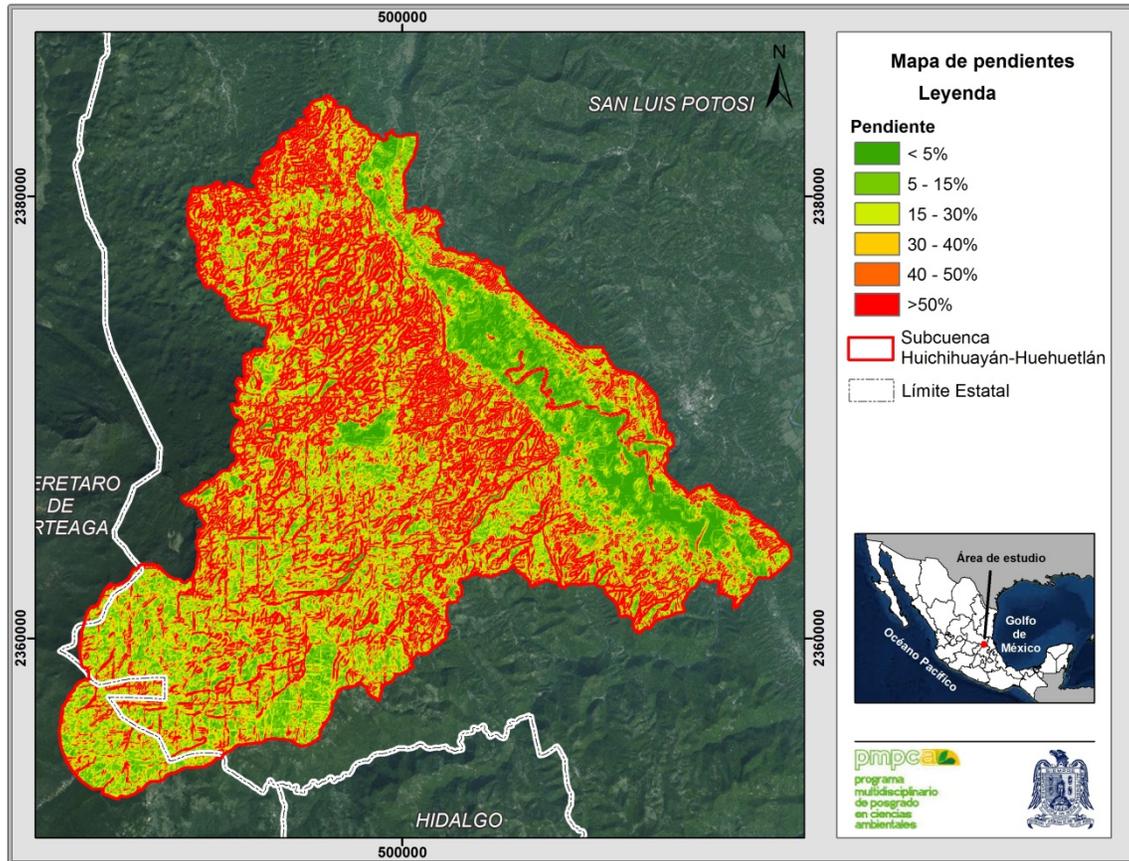


Figura 6: Mapa de ángulo de inclinación de las pendientes en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.

3.1.3. Geología

De acuerdo a la carta geológico-minera, escala 1:250,000, Ciudad Valles F14-8, dentro de la subcuenca se encuentran rocas Caliza-Lutita, Lutita y Caliza (Figura

7). Durante el periodo Cretácico Inferior-superior se desarrollaron rocas constituidas de caliza que comprenden a las formaciones en la zona de Tamasopo, mientras que durante el Jurásico Medio al Cretácico Inferior, la evolución de los arcos pacíficos, en los estados de San Luis Potosí, Hidalgo y Querétaro, se desarrolló una sucesión alternante de Lutita y Caliza.

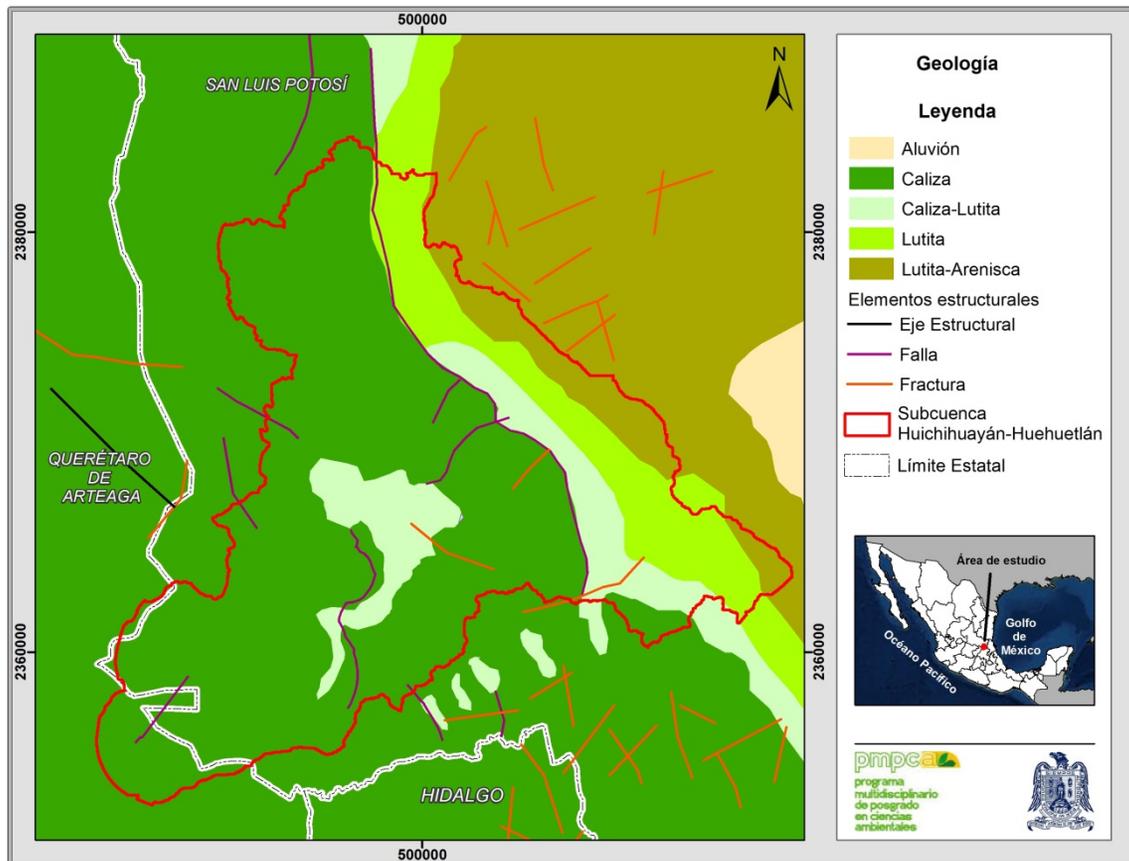


Figura 7: Geología del área de estudio (Fuente: Mapa Digital de México, Geología escala 250 000, INEGI)

3.1.4. Clima

Con base en la clasificación climática de García (1964), en el área de estudio se encuentran cinco tipos de clima (Figura 8); el clima predominante es semicálido (A)C húmedo con lluvias todo el año (A)C(fm), presentándose al oeste de Xilitla y Tamazunchale con una temperatura media anual entre 18 y 24°C y precipitación

total anual de 1200 a 2500 mm, el semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (A)C(m)(w) al este de la entidad, encontrándose en Zocohuite, Tamasopo, Tampamolón, Coxcatlán y Tamazunchale, con temperatura media anual entre 15° y 23.5 °C y precipitación total anual de 1539.2 a 1919.7 mm; durante los meses de junio y septiembre se presenta la mayor precipitación alcanzando entre 206.7 y 373 mm; y el semicálido subhúmedo con lluvias en verano (A)C(w₀)w; éste se presenta al oeste de la sierra Madre Oriental con una temperatura media anual entre 18° y 22° C, precipitación total anual de 700 a 1200 mm y en septiembre se presenta la mayor precipitación alcanzando hasta 212.8 mm. El clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano C(m)(w), se encuentra en las partes más elevadas de las sierras El Pinal, El Pino y El Camarón, con temperatura media anual que oscila entre los 16° y 18°C, con una precipitación total anual de 1200 a 1500 mm (INEGI, 2002).

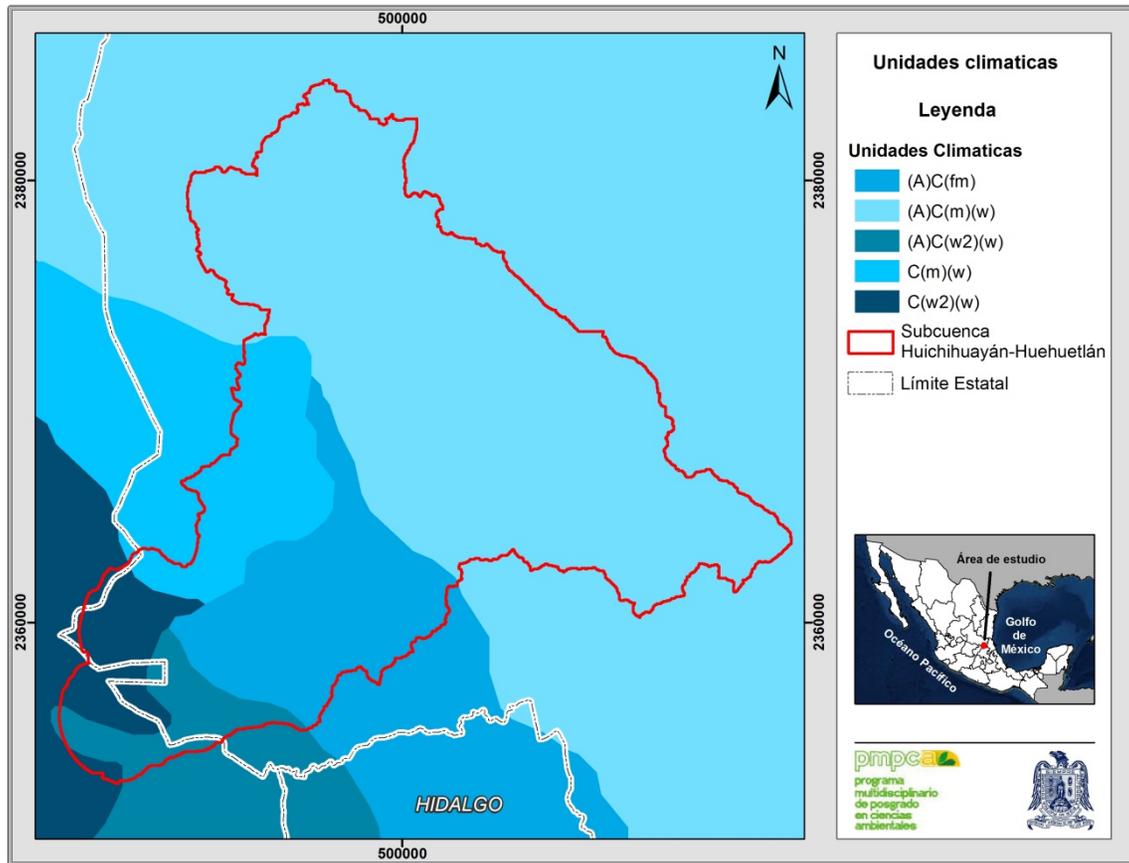


Figura 8: Unidades climáticas en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.

3.1.5. Edafología

Con base en la clasificación edafológica propuesta por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la zona de estudio se encuentran suelos de tipo Luvisol, Feozem, Regosol y Rendzina, de acuerdo a INEGI (Figura 9). Los luvisoles se caracterizan por un mayor contenido de arcilla en el horizonte B que en el horizonte A, el material parental lo constituyen materiales no consolidados como depósitos eólicos, aluviales y coluviales, presentándose en zonas planas o con pendientes suaves en regiones templadas frescas y cálidas. Este tipo de suelo es fértil para distintos cultivos; sin embargo, cuando presentan alto contenido de limo son susceptibles al deterioro en su estructura, sobre todo cuando se trabajan

mojados y con maquinaria pesada. Los luvisoles en pendientes fuertes necesitan medidas de control contra la erosión (FAO, 2007).

Los feozems se encuentran en regiones húmedas. Están formados por un horizonte superficial oscuro, rico en materia orgánica, en zonas de llanas a onduladas, con vegetación de pastizal y/o bosque. Los feozems son suelos porosos y fértiles, por lo que son favorables para la agricultura, pero pueden presentar alto riesgo a la erosión eólica e hídrica (FAO, 2007).

Los suelos del grupo Regosol están poco desarrollados en materiales no consolidados de grano fino, son comunes en regiones áridas y regiones montañosas. Presentan un perfil mínimo por ser de edad joven y/o por su lenta formación del suelo. Los Regosoles presentan baja retención de humedad, por lo que se necesita sistema de riego para cultivos; sin embargo, en zonas montañosas son delicados, y se recomienda mantenerlos cubiertos con bosques (FAO, 2007).

Las rendzinas son suelos someros en regiones semiáridas, tropicales o templadas. La capa superficial presenta alto contenido de materia orgánica, sobre roca caliza o materiales con altos contenidos de cal. Por lo general son arcillosos y poco profundos, menores a 25 cm; sin embargo pueden sustentar una cubierta vegetal de selva alta perennifolia y son susceptibles de forma moderada a la erosión (INEGI, 2004).

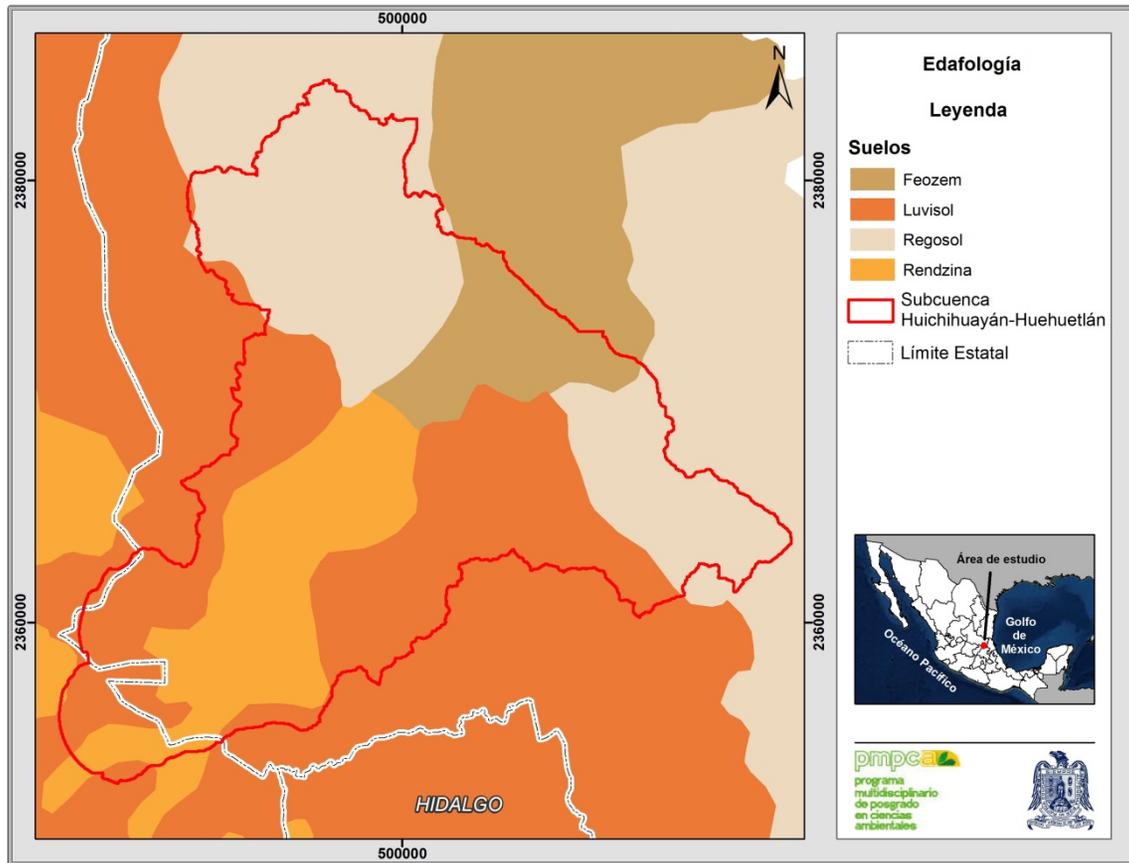


Figura 9: Edafología en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, San Luis Potosí, México.

3.1.6. Hidrología

La subcuenca Huichihuayán–Huehuetlán corresponde a la cuenca del río Moctezuma perteneciente a la región hidrológica No. 26 Pánuco (Figura 10), en el sureste del estado de San Luis Potosí.

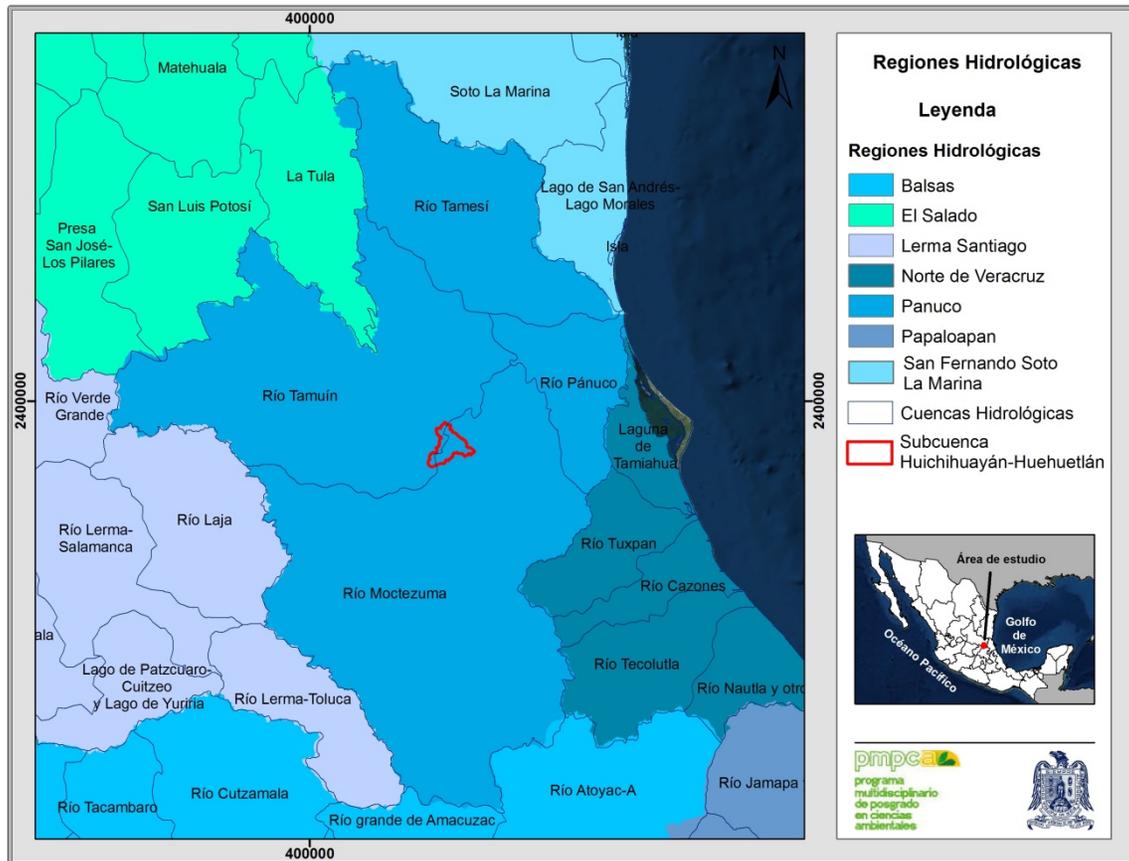


Figura 10: Regiones Hidrológicas (Fuente: Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)).

Dicha región se caracteriza por descender en una topografía abrupta hasta llegar al golfo de México. El escurrimiento principal de la cuenca es el río Moctezuma, con un rango de escurrimiento de 100 a 200 mm (INEGI, 2002) . En esta área debido a las características geológicas existen arroyos intermitentes de tipo dendrítico paralelo y rectangular (Figura 11).

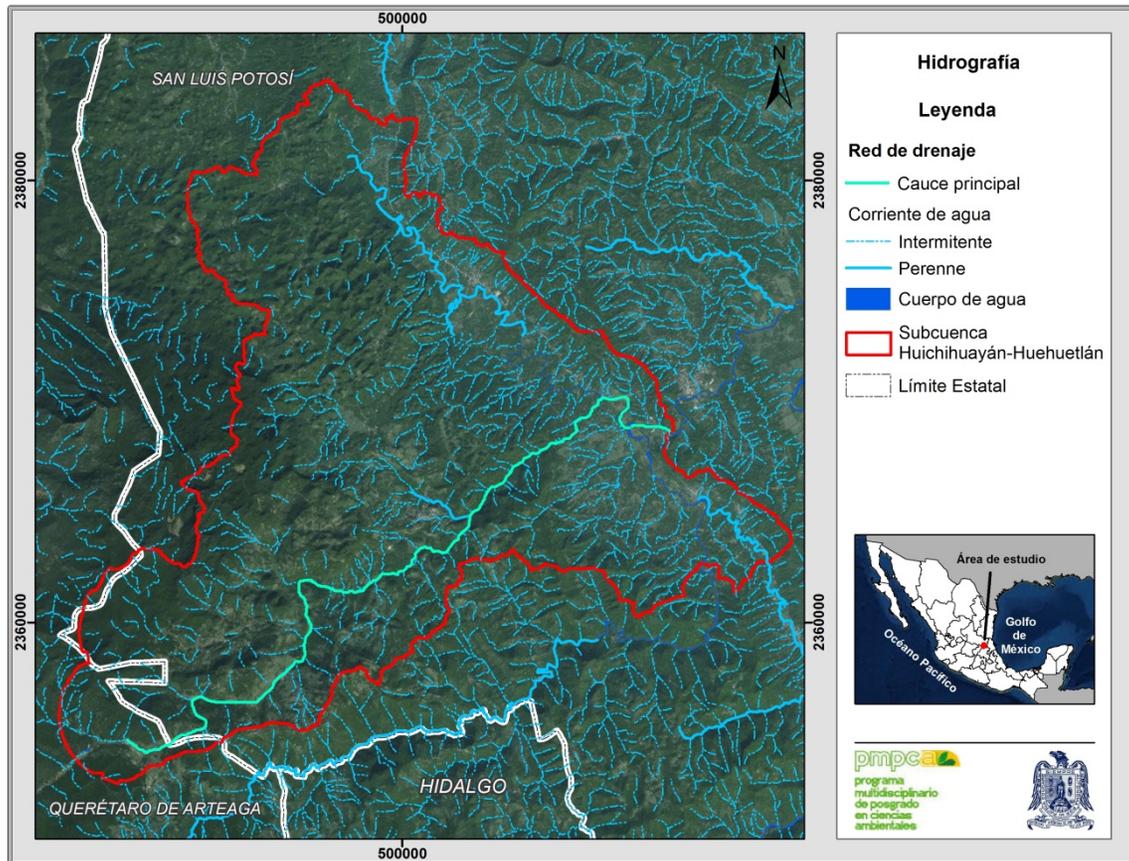


Figura 11: Hidrografía (Fuente: Red Hidrográfica, escala 50 000, INEGI).

3.1.7. Vegetación y uso de suelo

Con base en la clasificación propuesta por INEGI en la subcuenca se encuentran los siguientes tipos de vegetación (Figura 12; INEGI, carta de vegetación y uso del suelo serie V):

Bosque de pino: este tipo de vegetación se encuentra en la parte alta de la subcuenca entre los límites de San Luis Potosí y Querétaro. El bosque de pino se desarrolla en climas templados y semicálidos subhúmedos con lluvias en verano, con temperaturas que oscilan entre los 6 y 28° C y de 350 1200 mm de precipitación anual. Se encuentran desde los 1800 hasta los 2400 m de altitud, con pendientes que oscilan entre 20°-30°, sobre rocas calizas del mesozoico que constituyen el material parental para los suelos de tipo rendzina (INEGI, 2014).

Bosque de pino-encino: se encuentra en la parte media de la subcuenca en el municipio de Xilitla, en climas semifríos, semitemplados, semicálidos y cálidos húmedos y subhúmedos con lluvias en verano, con precipitación que va desde los 600 a los 2500 mm anuales y temperatura que oscila entre los 10° y 28° C y altitudes de entre los 1600 a 2200 msnm. El sustrato de rocas corresponde a calizas del mosozoico que constituyen material parental para los suelos tipo Rendzina y luvisol (INEGI, 2014).

Bosque mesófilo de montaña (BMM): dentro de la subcuenca este tipo de bosque se encuentra en la parte media, dentro del municipio de Xilitla. El BMM se desarrolla en regiones con relieve accidentado y laderas pronunciadas entre los 800 y 1800 m de altitud, el desarrollo de neblina es característico del BMM. La precipitación media anual es superior a los 1000 mm y la temperatura media anual oscila entre los 12° a 23° C. este tipo de vegetación crece sobre Rendzina, con abundante materia orgánica, y rocas calizas (INEGI, 2014).

Pastizal: dentro de la subcuenca se encuentra pastizal cultivado e inducido. El pastizal inducido aparece, a partir del desmonte de cualquier tipo de vegetación, pero también en zonas agrícolas abandonadas o zonas que se incendian con frecuencia. Estos pastizales pueden corresponder a la fase de sucesión normal en la cual el clímax será de manera común en bosque o matorral; sin embargo, este proceso se detiene por el pastoreo intenso o fuegos periódicos (INEGI, 2014).

Vegetación secundaria: se desarrolla cuando la vegetación es eliminada o alterada por factores naturales o humanos. A partir de este disturbio se desarrolla una comunidad vegetal distinta a la original con estructura y composición florística heterogénea. Dentro de la subcuenca predomina este tipo de vegetación, con diferentes tipos de vegetación secundaria en función de la etapa sucesional y del tipo de vegetación primaria (INEGI, 2014).

Agricultura: dentro de la subcuenca se desarrolla la agricultura de temporal, de forma destacada en la parte media y baja. Este tipo de agricultura corresponde a cultivos que se desarrollan durante la temporada de lluvias con duración anual, semipermanente o permanente (INEGI, 2014).

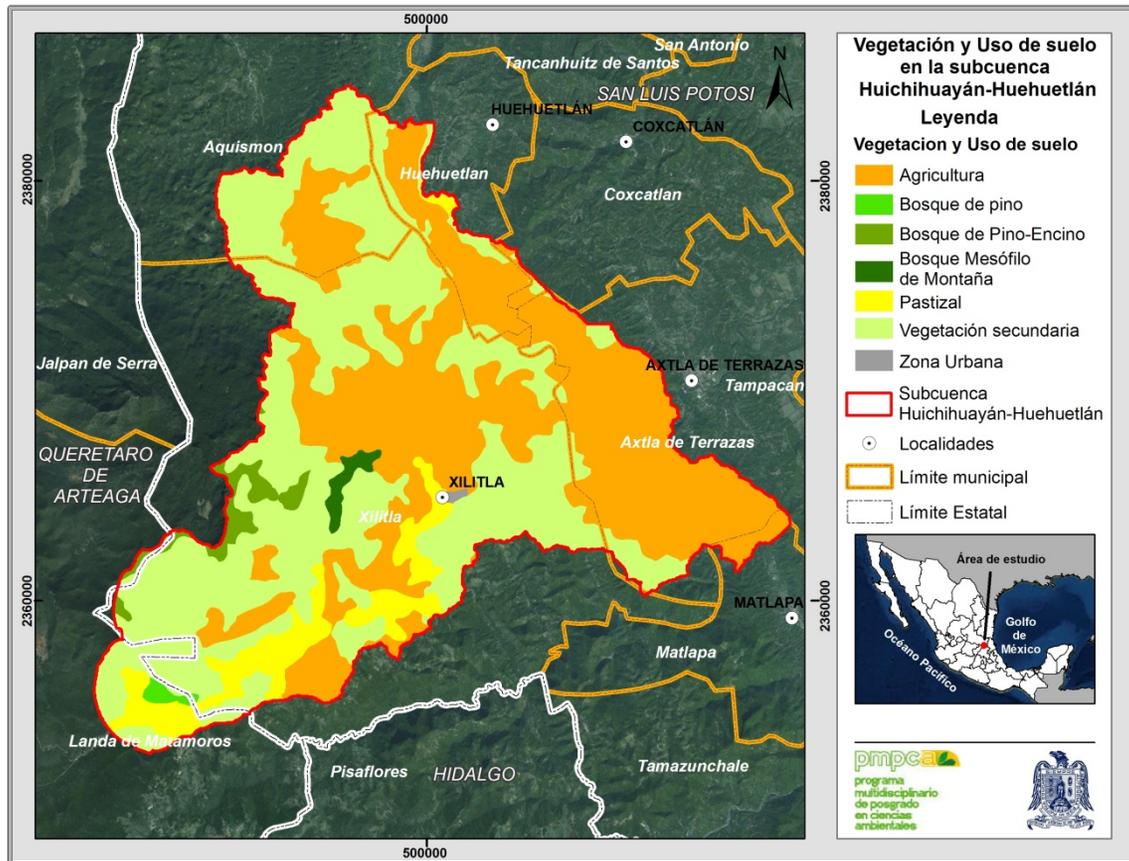


Figura 12: Vegetación y Uso de Suelo en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán. (Fuente: INEGI, carta de vegetación y uso del suelo serie V)

3.1.8. Caracterización socioeconómica de la subcuenca

La subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán se encuentra dentro de cinco municipios de San Luis Potosí y uno de Querétaro; estos municipios, de acuerdo con INEGI, cuentan con una población de 187 438 habitantes (Tabla 2); de las cuales 56 727 se encuentran dentro de la subcuenca de estudio repartidas en 193 localidades.

Tabla 2: Población total por municipios comprendidos en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán

Estado	Municipio	Población total
San Luis Potosí	Aquismón	48772
San Luis Potosí	Coxcatlán	15184
San Luis Potosí	Huehuetlán	15828
San Luis Potosí	Axtla de Terrazas	37645
San Luis Potosí	Xilitla	52062
Querétaro	Landa de Matamoros	17947
	Población Total	187438

Fuente: Datos tomados de INEGI, (fuente: <http://cuentame.inegi.org.mx>).

Abordar el tipo de ocupación que tiene la población es de suma importancia dado que las actividades humanas son uno de los principales elementos que promueven la degradación de los suelos. En la cuenca de estudio, la mayor parte de la fuerza ocupada se encuentra en el sector terciario de la economía, seguida del sector primario y secundario, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Población ocupada por municipio y su distribución porcentual según división ocupacional.

Municipio	Total	División ocupacional (porcentaje)				No especificado
		Funcionarios, profesionistas, técnicos y administrativos	Trabajadores agropecuarios	trabajadores en la industria	Comerciantes y trabajadores en servicios diversos	
Aquismón	10,410	8.39	29.77	10.26	50.78	0.81
Axtla de Terrazas	11,441	15.09	22.56	11.58	49.63	1.14
Coxcatlán	4,077	10.91	22.66	8.81	55.60	2.01
Huehuetlán	4,092	17.99	18.96	13.54	49.12	0.39
Xilitla	9,418	15.82	11.06	18.58	53.23	1.31
Landa de Matamoros		Sin datos				

INEGI. Dirección General de Estadísticas Sociodemográficas. *Encuesta Intercensal 2015*. www.inegi.org.mx (15 de febrero de 2016).

Sin embargo, en la Tabla 4, se observa que, en todos los municipios, el sector económico predominante es el primario.

Tabla 4: Población ocupada por municipio y su distribución porcentual según Sector de actividad económica.

Municipio	Total	Sector de actividad económica (porcentaje)				
		Primario	Secundario	Comercio	Servicios	No especificado
Aquismón	10,410	58.47	12.81	9.11	18.17	1.43
Axtla de Terrazas	11,441	45.26	11.41	12.53	29.39	1.42
Coxcatlán	4,077	57.52	11.36	6.89	21.51	2.72
Huehuetlán	4,092	38.76	17.64	11.58	31.48	0.54
Xilitla	9,418	36.61	19.54	11.03	31.31	1.51
Landa de Matamoros	Sin datos					

INEGI. Dirección General de Estadísticas Sociodemográficas. *Encuesta Intercensal 2015*. www.inegi.org.mx (15 de febrero de 2016).

De acuerdo con el Índice de marginación por municipio (CONAPO, 2010), los municipios comprendidos dentro de la subcuenca se encontraban con grado de marginación de medio a muy alto (Figura 13); estos valores indican desventajas para alcanzar ciertas oportunidades para el desarrollo, lo que propicia que la población se encuentre expuesta a determinados riesgos y vulnerabilidades.

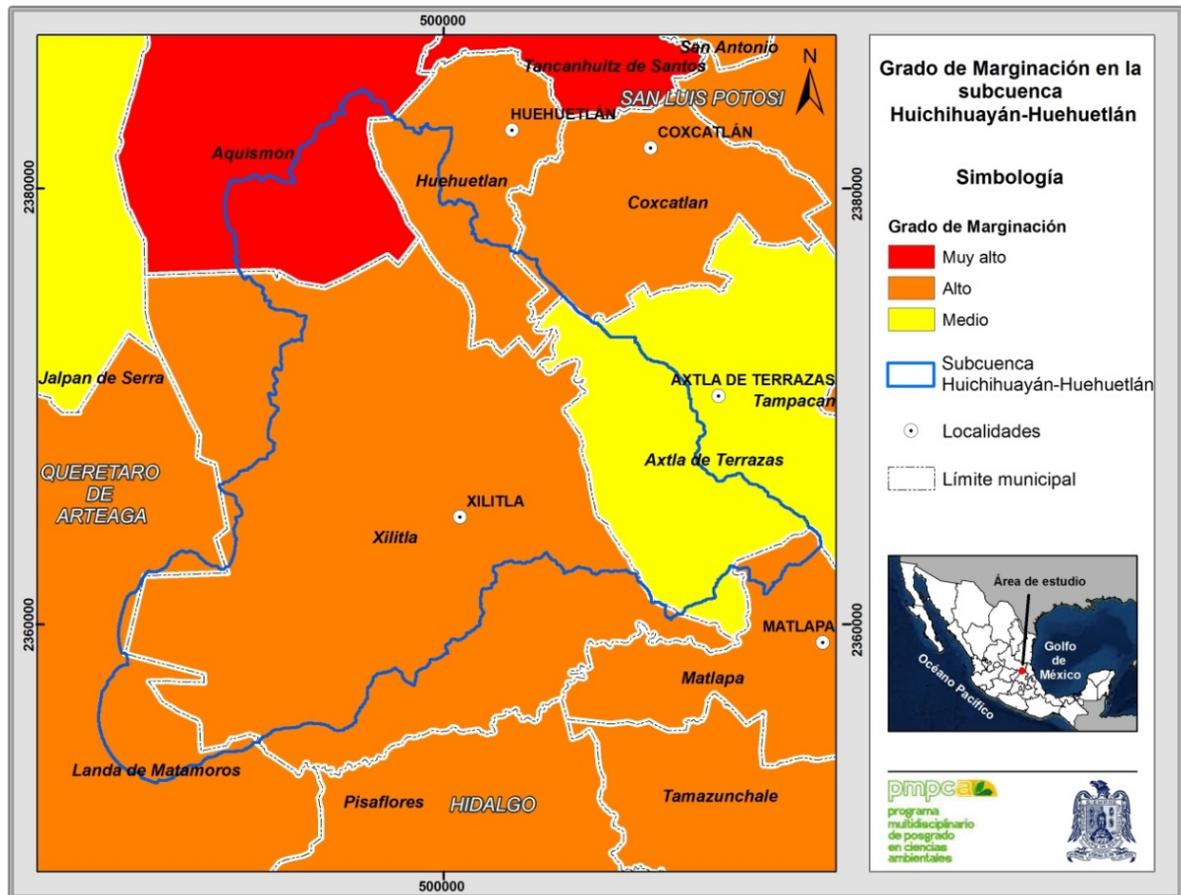


Figura 13: Grado de marginación en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.(Fuente: <http://www.conapo.gob.mx>)

3.2 Metodología

3.2.1 Características morfométricas de la subcuenca

A partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 15 m de INEGI se delimitó la subcuenca mediante el programa ArcGis 9.3. Se obtuvieron los parámetros como área, perímetro, longitud del cauce principal, elevación media de la subcuenca y tiempo de concentración (Salas et al., 2011). Para determinar los parámetros de drenaje se delimitaron los cauces a partir del MDE con resolución espacial de 15 m x 15 m.

El estudio se dividió en tres fases:

- 1) estimación de la escorrentía y erosión en la subcuenca con el modelo SWAT;
- 2) validación del modelo SWAT; y
- 3) proyección de la escorrentía y erosión bajo distintos escenarios de precipitación y uso del suelo y vegetación.

Las fases 1 y 3 se realizaron con el programa AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment), el cual contiene los modelos SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) y KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion)..

3.2.2. Estimación de escorrentía y erosión hídrica

Se utilizó el programa hidrológico AGWA (Figura 14), que es una herramienta con interface en el programa ArcMap para el modelado de la escorrentía y erosión en cuencas. Mediante este programa se pueden evaluar las condiciones hidrológicas de una cuenca en diferentes escalas de espacio y tiempo, gracias a los modelos hidrológicos integrados (<http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>).

AGWA contiene los modelos hidrológicos SWAT 2000, SWAT 2005, KINEROS2 y KINEROS OPUS. Para este estudio se utilizaron SWAT 2005 y KINEROS2. SWAT fue diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, los sedimentos y rendimientos químicos agrícolas bajo distintos usos de suelo y en largos periodos de tiempo.

Este modelo permite la simulación de procesos hidrológicos diarios, mensuales o anuales; para ello se le deben proporcionar datos de entrada como hidrología, precipitación y temperatura, radiación solar, crecimiento del cultivo, nutrientes, propiedades físico-químicas de suelos, pesticidas y gestión agrícola.

Por otra parte, KINEROS2 es un modelo hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para simular flujos y erosión para diferentes eventos de tormenta; permite evaluar escenarios futuros mediante el cálculo de los procesos de infiltración, erosión, flujo superficial e infiltración; gracias a ello, proporciona información para la toma de decisiones y planes de manejo.

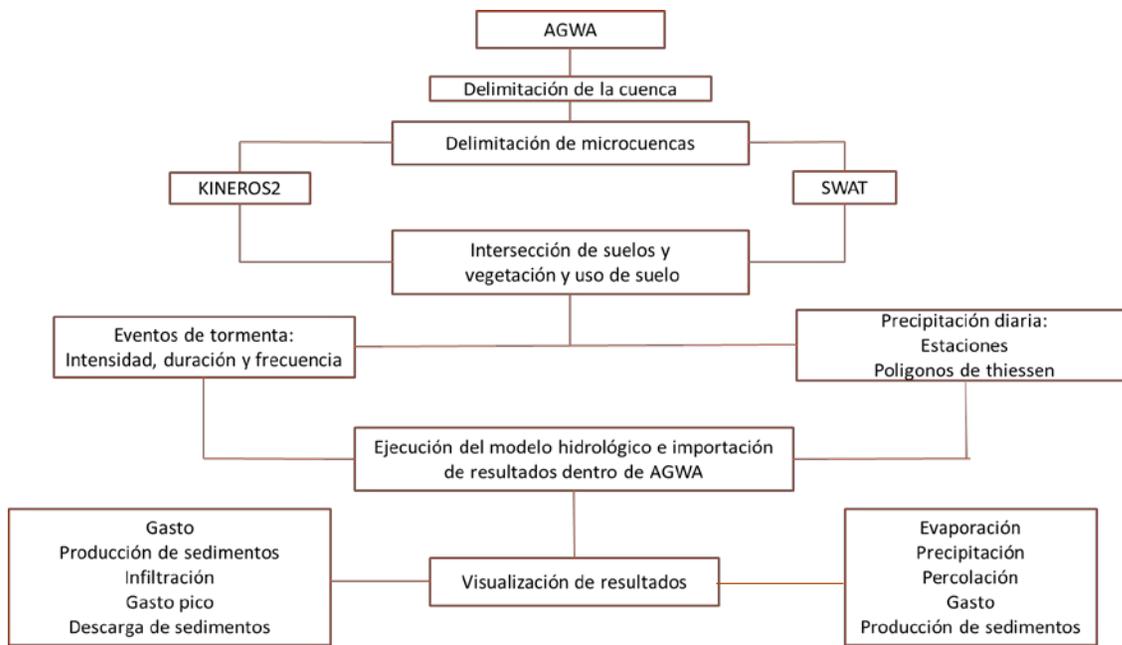


Figura 14: Parámetros de entrada para SWAT y Kineros2.

Ambos modelos requieren un MDE en formato de celdas que delimita la cuenca y su red de drenaje. A partir de las cuencas se crean unidades de respuesta hidrológicas (HRU), que son áreas que comparten las mismas características con relación a la vegetación, suelo y pendiente de la cuenca; esta última también es obtenida por medio del MDE de entrada. Una vez que se crean las HRU, es necesario introducir los datos climatológicos.

SWAT requiere la ubicación de estaciones climatológicas, precipitación diaria y temperatura, y a partir de ellos crea polígonos de Thiessen y determina la precipitación media para cada HRU; mientras que KINEROS requiere datos de intensidad y frecuencia para diferentes eventos de precipitación. En la presente investigación, una vez que se introdujeron todos los parámetros necesarios en SWAT se ejecutó el programa para el cálculo de datos que correspondiera a una periodicidad mensual.

Como primer parámetro de entrada se usó el MDE, para la delimitación de la subcuenca y cauces. Una vez hecho esto, en la generación de las HRU se

integraron datos de vegetación, tipo de suelo y variables climáticas, tal y como se describe a continuación.

Vegetación

Para obtener los mapas de vegetación y uso de suelo se usaron imágenes de satélite LANDSAT 5 TM para 1985, LANDSAT 7 ETM 2002 y LANDSAT 8 OLI_TIRS para 2014, obtenidas del U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>). Previo a la realización de la clasificación se realizó la corrección atmosférica de las tres imágenes mediante el software ENVI 4.8 con la herramienta Dark Substract.

Para el caso de las imágenes 2002 y 2014 se realizó la fusión de las bandas pancromática y multiespectral con el software ERDAS 9.1 para obtener una resolución espacial de 15 m. Después se realizó una clasificación supervisada para 1985, 2002 y 2014 mediante el programa ENVI 4.8 con un total de 100 áreas de entrenamiento para cada año con apoyo de la serie V de vegetación y uso de suelo de INEGI y Google Earth. Por medio de la interpretación de las imágenes satelitales se pudieron observar cinco clases de vegetación y uso del suelo: selva, áreas agrícolas, pastizal, bosque mesófilo de montaña y bosque de encino.

Entre las actividades agrícolas dentro de la zona es la producción se encuentra la producción de cítricos, por lo que se delimitaron estas zonas mediante digitalización manual en pantalla, con apoyo del programa Google Earth, para 2002 y 2014.

La vegetación y uso de suelo obtenida de las imágenes de satélite fue reclasificada por semejanza de tipos de vegetación con la base de datos integrada en SWAT, pues requiere datos como permeabilidad, grupo hidrológico, cobertura, coeficiente de Manning (índice de rugosidad sobre la superficie) para cada tipo de vegetación, por lo que se reclasificó de la siguiente manera:

- Forest: bosque mesófilo de montaña, bosque de encino, cítricos y selva
- Grassland: Pastizal y
- Agriculture: agricultura

Respecto a los cítricos, si bien no es uso forestal fue considerado dentro de éste, por ser un estrato arbóreo y en virtud de que la base de datos de usos del suelo y vegetación no incluye esta categoría ni la de bosque abierto.

Para la validación de los mapas se realizaron algunas entrevistas (Anexo 1) a personas clave como ejidatarios y delegados municipales que forman parte de la subcuenca. Las preguntas fueron referentes a la vegetación actual, apoyadas con imágenes satelitales impresas y de zonas con algún tipo de erosión, para conocer la percepción de las personas sobre la erosión.

Además, se determinó la fiabilidad global mediante una matriz de error a partir de la serie I de vegetación y uso de suelo de INEGI para 1985, la serie III de vegetación y uso de suelo de INEGI para 2002 e imágenes satelitales de Google Earth para 2014, se usaron 100 puntos para la validación de cada imagen. Con posterioridad se calculó el coeficiente Kappa, el cual expresa el grado de concordancia entre observadores, tomando valores entre -1 y +1. Cuanto más cercano es a +1 será mejor el grado de concordancia, mientras que más cercano sea a -1 será mayor el grado de discordancia (Cerdea et al., 2008).

Para finalizar, mediante la sobreposición digital de los mapas reclasificados para SWAT de cada fecha, se identificaron las áreas de cambio para los periodos 1985-2002 y 2002-2014; dichos resultados se presentan mediante matrices de cambio para cada periodo. Se calculó la tasa de cambio de uso del suelo y vegetación mediante la siguiente ecuación (CONANP, 2007):

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Dónde:

δ_n = Tasa de cambio

S1= superficie forestal, al inicio del periodo

S2= superficie forestal, al final del periodo

n= número de años de análisis

Suelos

Se utilizó la base de tipos de suelo con la clasificación de la FAO proporcionada por AGWA. Esto, debido a la falta de información detallada de suelos en la zona de estudio (textura, porcentaje de arena, limo y arcilla, grupo hidrológico, albedo del suelo, erosionabilidad, densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitez).

Datos de precipitación pluvial

SWAT permite ingresar datos meteorológicos, para calibrar el modelo con datos reales. Se obtuvieron datos de siete estaciones climatológicas (Tabla 5) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Cuatro de las estaciones se encuentran dentro de la subcuenca y tres en áreas adyacentes (Figura 15). La serie histórica de datos comprendió 28 años de precipitación diaria. Las temperaturas máximas y mínimas se obtuvieron de las normales climatológicas correspondientes al periodo 1982-2009 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Tabla 5: Estaciones climatológicas, CONAGUA empleadas en este estudio.

Número	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
1	24003	AQUISMON, AQUISMON	21.38	-99.05	33
2	24084	TANCULIN, TAMAZUCHALE	21.34	-99.07	92
3	24186	HUICHIHUAYAN, HUEHUETLAN	21.28	-98.58	91
4	24026	REQUETEMU VILLA TERRAZAS	21.26	-98.54	88
5	24125	TLAMAYA, XILITLA	21.26	-98.57	619
6	2410	XILITLA, XILITLA	21.24	-98.59	676
7	22024	TRES LAGUNAS	21.19	-99.12	1610

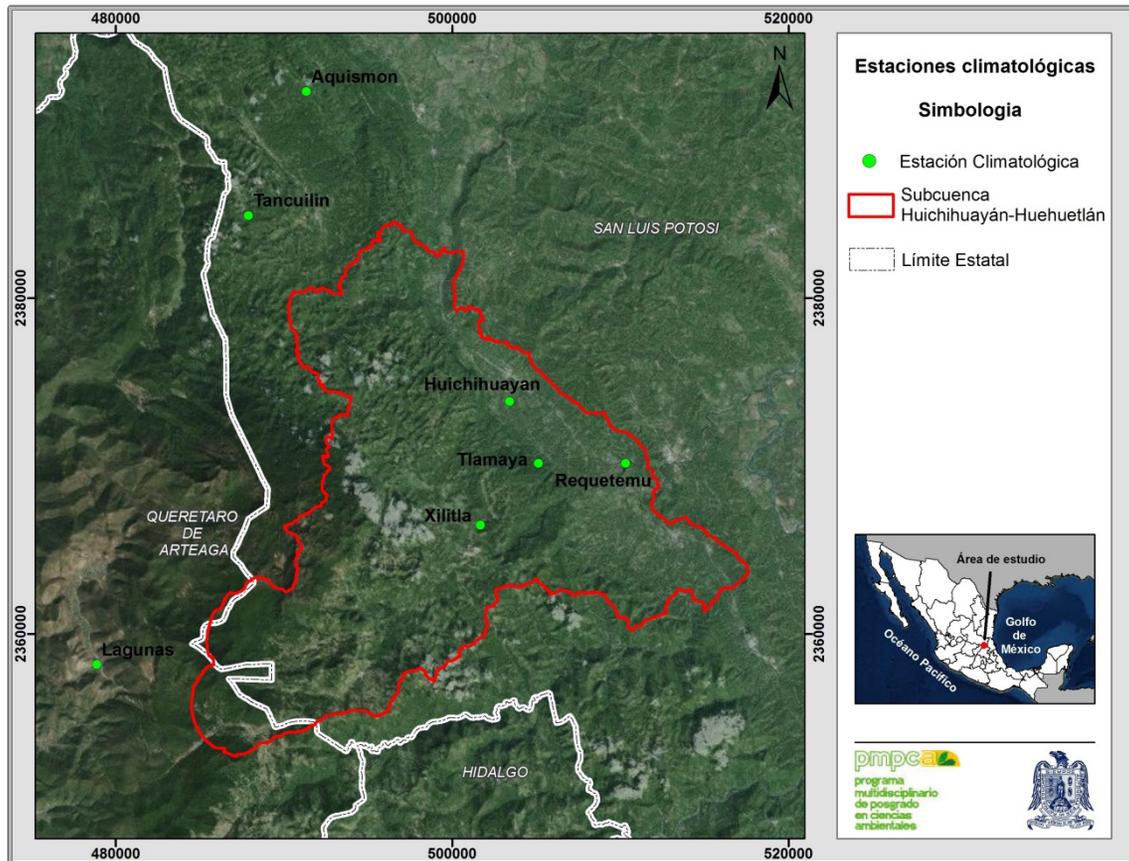


Figura 15: Estaciones climatológicas.

Para ingresar los datos de precipitación diaria fue necesaria la revisión de datos de las estaciones climatológicas para tener series temporales homogéneas y elaborar la tabla en el formato que necesita SWAT (Tabla 6). Existen días sin registros en algunas estaciones, por lo que fue necesaria la interpolación de datos próximos cuando el dato faltante era solo uno, mientras que en más de dos días sin datos le fue asignado -99, valor indicado por SWAT para estos casos (Leon, 2009).

Tabla 6: Ejemplo del formato de entrada para archivo de precipitación diaria en SWAT.

YEAR	DAY	24186	24003	24026	24084	24125	22024	2410
1982	1	0	0	0	0	0	0	0
1982	2	0	0	0	0	0	0	0
1982	3	0	0	0	0	0	0	0
1982	4	0	0	0	0	0	0	-99
1982	5	0	0	0	0	0	0	0
1982	6	0	0	0	0	0	0	0
1982	7	17	12	13	20	7	0	15
1982	8	2	2	1	1	0	0	1
1982	9	-99	0	0	0	0	0	0
1982	10	6	4	4	5	7	0	10

Una vez que se establecieron todos los parámetros de entrada, y se calibró con datos de precipitación, se ejecutó el modelo SWAT para el cálculo de datos mensuales para 1985, 2002 y 2014 por separado.

3.2.3 Validación del modelo SWAT

A partir de la ejecución del modelo SWAT se obtuvo la escorrentía y la erosión hídrica para la subcuenca. Para la validación mensual de los resultados se seleccionaron dos periodos de 5 años cada uno, 1983-1987 y 2000-2004 (n=120 meses).

Los datos de escorrentía estimados por SWAT se compararon con la escorrentía medida en la estación Requetemu (Figura 16), que se obtuvo del banco nacional de datos de aguas superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (<http://www.conagua.gob.mx/>). La estación cuenta con información desde el 27 de octubre de 1953 y con lecturas realizadas mediante un limnógrafo, que presenta un máximo aforado de 2,635 m³/s en una profundidad de 10.86 m; sin embargo, dicha estación no cuenta con datos medidos de sedimentos, por lo que no fue posible comprobar la eficiencia del modelo.

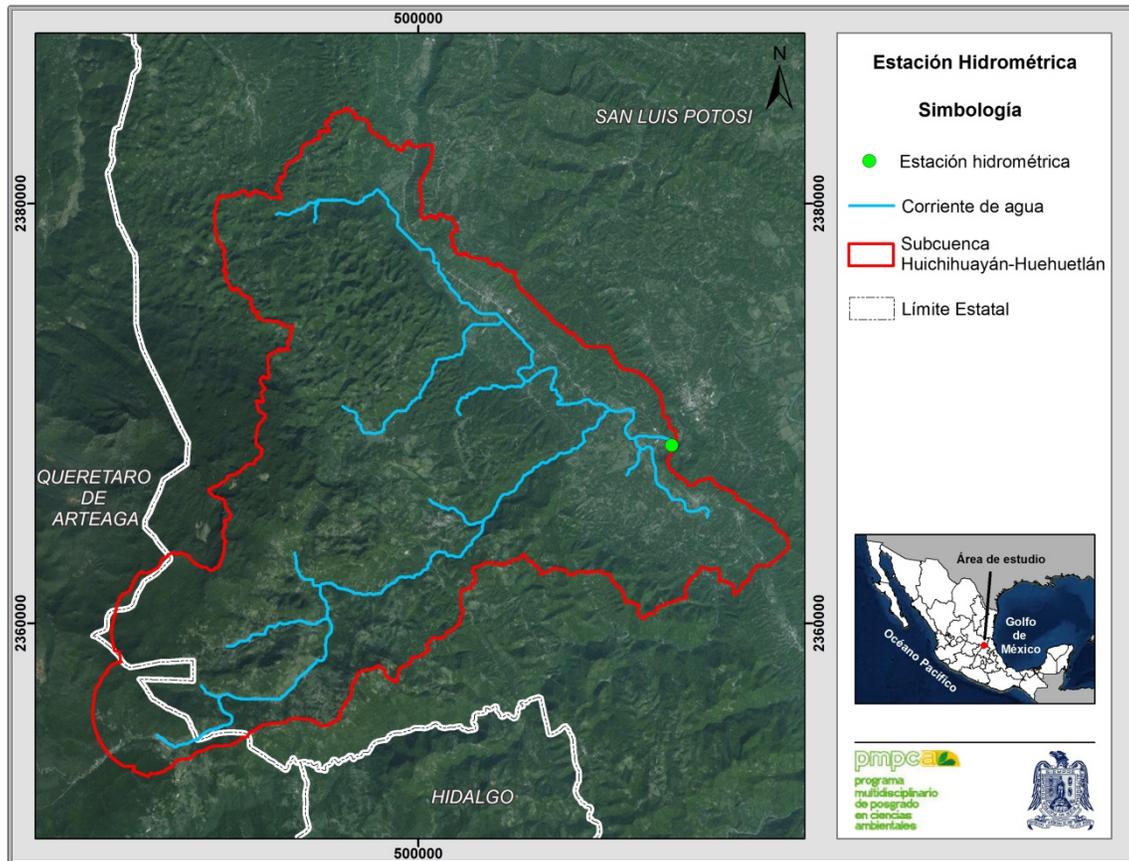


Figura 16: Estación Hidrométrica Requetemu.

Para comprobar la eficiencia del modelo hidrológico SWAT respecto a la escorrentía, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) el cual describe el grado de colinealidad entre datos medidos y simulados. El coeficiente varía de 0 a 1, donde a valores mayores, la varianza del error será menor, por lo tanto valores mayores a 0.5 son considerados aceptables (Moriasi et al., 2007) y el error medio absoluto (MAE) para conocer las diferencias en el promedio de los valores estimados por SWAT y los observados en la estación hidrométrica (Chai et al., 2014).

3.2.4. Proyección de la escorrentía y erosión bajo distintos escenarios de cambio de cobertura y precipitación.

Escenarios de cambio de uso del suelo y vegetación

Como ya se ha mencionado, con KINEROS2 es posible la proyección de escenarios a futuro. En este sentido, se crearon escenarios de vegetación y uso de suelo para periodos de retorno de 10 (2024), 25 (2039) y 50 años (2064). Estos escenarios se realizaron sólo con base en la tendencia en los cambios de cobertura y bajo el supuesto de que variables no presentarán cambios.

Se utilizó el programa Terrset, mediante la herramienta Land Change Modeler, el programa requiere dos mapas de vegetación y uso de suelo de distinta época como datos de entrada. Para este estudio se utilizaron los mapas de vegetación y uso del suelo de 1985 y 2014, descritos con antelación. Los cambios generados a través del tiempo son explicados con respecto a ciertas variables que pueden ser económicas, sociales y espaciales. Para esto, se utilizaron como variables el modelo digital de elevación, la pendiente y las principales vías de comunicación.

Por otra parte, KINEROS2 necesita valores como intercepción de la lluvia, porcentaje de cobertura vegetal, coeficiente de Manning y porcentaje de la cubierta con materiales impermeables, así como el grupo hidrológico de los suelos, todo esto por tipo de vegetación y uso de suelo. Como se mencionó, estos datos ya están integrados en KINEROS2; sin embargo, fue necesario reclasificar de la siguiente manera Mixed Forest (Cítricos, bosque de encino, Selva y bosque mesófilo de montaña), Grasslands/Herbaceous (Pastizal) y Cultived Crops (Agrícola).

Como punto final, para conocer los posibles cambios que pudiesen ocurrir, se identificaron las áreas de cambio para los periodos 2024-2039 y 2039-2064, mediante la sobreposición digital de los mapas reclasificados para Kineros2 de cada fecha. Dichos resultados se presentaron mediante matrices de cambio para cada periodo; además se calculó la tasa de cambio de uso del suelo y vegetación mediante la ecuación de la CONANP (CONANP, 2007):

Datos de precipitación

KINEROS2 utiliza diferentes periodos de retorno, y se basa en eventos de lluvia con diferente intensidad, profundidad de la lámina y frecuencia. Para este estudio se crearon tres escenarios con cuatro eventos de precipitación con diferentes características (duración y profundidad de lámina) para periodos de retorno de 10, 25 y 50 años (Tabla 7), obtenidos de mapas publicados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (<http://www.sct.gob.mx>).

Tabla 7: Periodo de retorno, duración y profundidad de la lámina de la precipitación para el área de estudio

Periodo de retorno (años)	Duración (h)	Profundidad (pulgadas)
10	0.30	2.40
10	1	3.54
10	2	4.88
10	4	5.20
25	0.30	2.71
25	1	4.01
25	2	5.59
25	4	6.14
50	0.30	2.91
50	1	4.33
50	2	6.06
50	4	6.77

La ejecución del modelo KINEROS2 requiere el mismo procedimiento de base que SWAT, por lo que se delimitó subcuenca y cauces a partir del MDE. Para la delimitación de las HRU se introdujeron los suelos de la base de datos del programa, mientras que para la vegetación y uso del suelo se utilizaron los escenarios de cambio de vegetación obtenidos en Terrset, para así incorporar las características de los eventos de precipitación por periodo de retorno para cada escenario y ejecutar el modelo KINEROS2.

Para la interpretación de los resultados se describirán de acuerdo a la zona funcional de la subcuenca.

4. RESULTADOS

4.1. Características morfométricas de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán

La subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán se considera grande pues tiene un área mayor a 250 km², con un orden de corriente 4, por lo que su respuesta a una tormenta suele ser rápida, con un tiempo de concentración de 7 h. El cauce principal de la subcuenca presenta una pendiente de 35%, y un rango altitudinal que va desde los 50 msnm hasta los 1600 msnm.

A continuación se muestran las características morfométricas de la subcuenca (Tabla 8), así como el perfil longitudinal del cauce principal (Figura 17).

Tabla 8: Características morfométricas de la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán

Parámetro	Valor
Tamaño	699.62 km ²
Forma	Oval-Oblonga (Kc=2.22)
Pendiente del cauce principal	35%
Tiempo de concentración	7 h
Orden de corriente	4
Densidad de corrientes	0.28 Cauces/km ²
Densidad de drenaje	D _d = 0.57 km/km ²

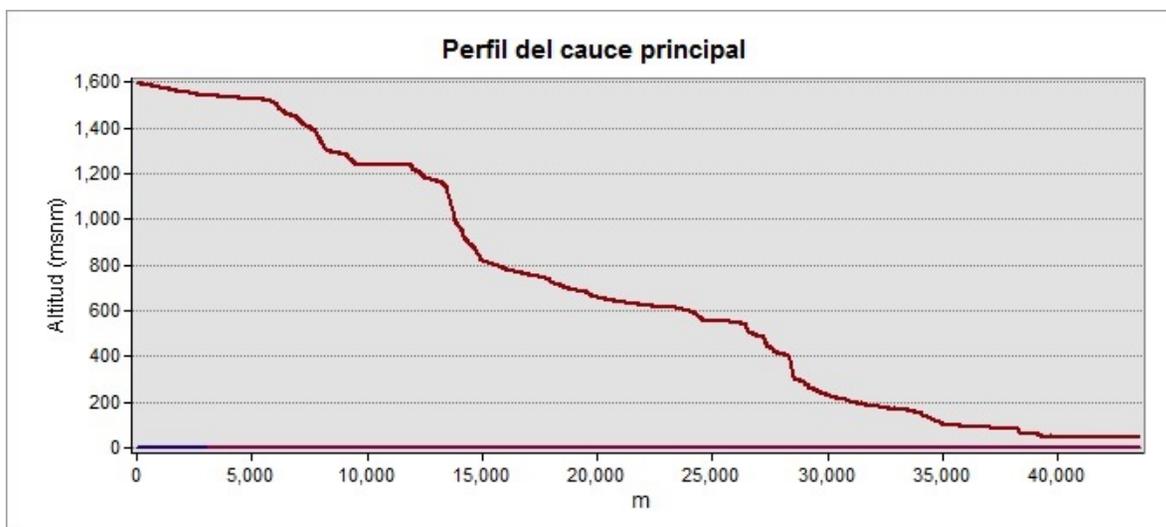


Figura 17: Perfil longitudinal del cauce principal en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

4.2. Vegetación y uso del suelo

Dentro de la subcuenca se tienen seis tipos de vegetación y uso de suelo; en la parte alta se puede encontrar el pastizal, bosque de encino, bosque mesófilo y algunas zonas agrícolas, mismas que han sido abandonadas y cuya transición se ha originado hacia el desarrollo de pastizales. En la parte media se desarrollan pastizales, bosques de encino y bosques mesófilo de montaña y pequeñas zonas agrícolas, mientras que en la parte baja de la subcuenca podemos encontrar zonas agrícolas, cítricos, pastizales y selva, en esta última se observó una disminución en su superficie. A partir de la validación del mapa de vegetación y uso de suelo (Figura 18) se obtuvo la fiabilidad y el coeficiente Kappa, con resultados aceptables para las clasificaciones realizadas (Tabla 9).

Tabla 9: Coeficiente Kappa y fiabilidad global

Año	Coeficiente Kappa	Fiabilidad global
1985	0.79	86%
2002	0.81	87%
2014	0.84	89%

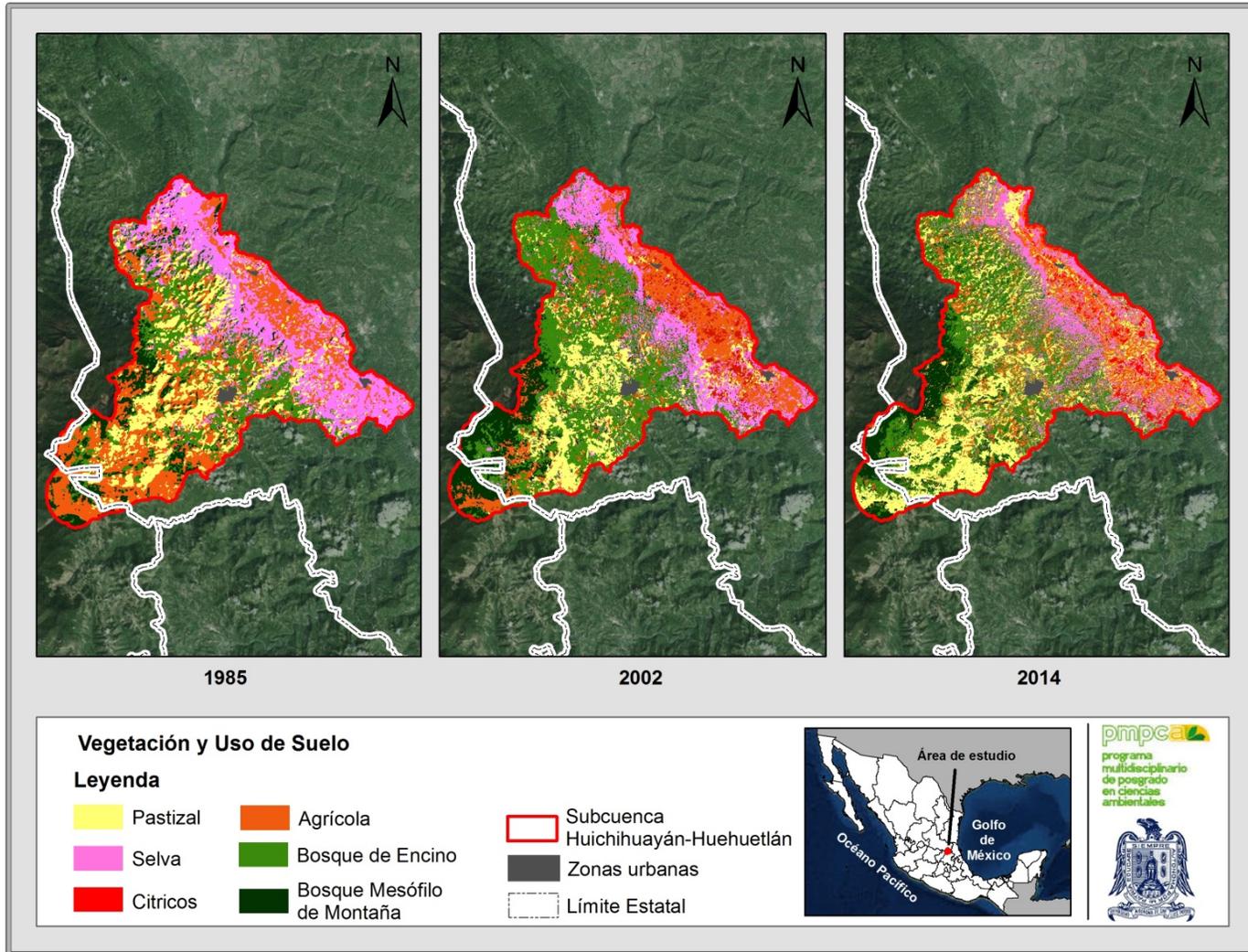


Figura 18: Vegetación y uso de suelo en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Como resultado de la reclasificación de los mapas de vegetación y uso del suelo a la equivalencia de SWAT, se obtuvieron los mapas que fueron la base entrada para la ejecución del modelo (Figura 19).

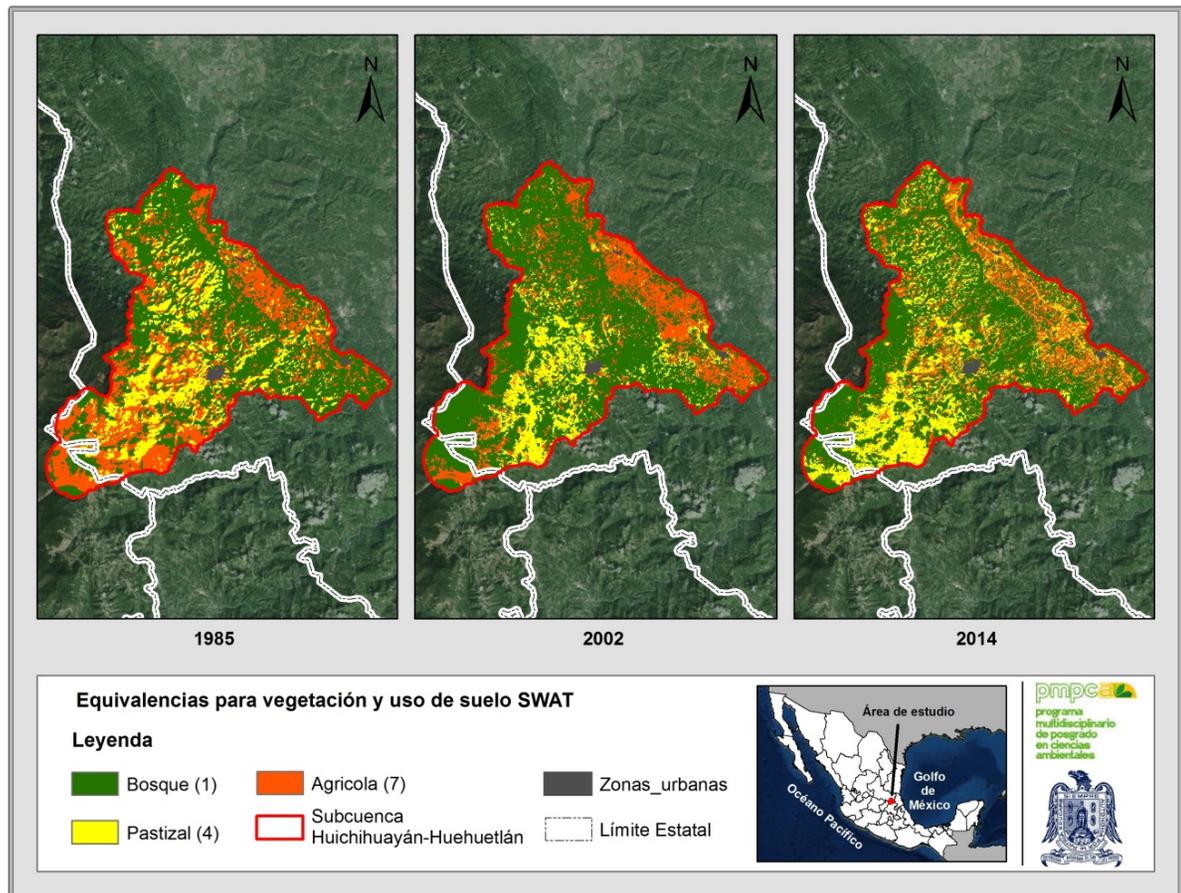


Figura 19: Equivalencias de vegetación y uso de suelo para SWAT.

Los cambios observados durante el periodo 1985-2002 (Tabla 10), indican que hubo una conversión de 38.9 km² de cobertura forestal a agrícola, y de 13.1 km² de forestal a pastizal; sin embargo, también se tuvieron cambios de 42 km² de pastizal y 77.6 km² de uso agrícola a forestal.

Tabla 10: Matriz de cambio para el periodo 1985-2002 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

km ²	2002			
1985	Vegetación y Uso de suelo	Forestal	Pastizal	Agrícola
	Forestal	182.039	13.078	38.912
	Pastizal	42.791	25.934	13.559
	Agrícola	77.607	27.030	41.448

Para el periodo 2002-2014 (Tabla 11), hubo un cambio de forestal a agrícola de 38.1 km² y de forestal a pastizal 36.2 km²; mientras que la conversión de pastizal a forestal fue de 10.8 km² y de agrícola a forestal fue de y 30.6 km² respectivamente.

Tabla 11: Matriz de cambio para el periodo 2002-2014 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

km ²	2014			
2002	Vegetación y Uso de suelo	Forestal	Pastizal	Agrícola
	Forestal	228.354	36.226	38.074
	Pastizal	10.897	39.335	15.675
	Agrícola	30.655	31.653	31.529

En cuanto a las tasa de cambio de uso de suelo, se determinó que durante el periodo 1985-2002 (Tabla 12) la vegetación forestal tuvo una recuperación de 1.52%, mientras que durante el periodo 2002- 2014 (Tabla 13) se tuvo una pérdida de 0.95 %.

Tabla 12: Tasa de transformación durante el periodo 1985-2002 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Periodo	Vegetación y Uso de suelo	Superficie tiempo 1 (km ²)	Superficie tiempo 2 (km ²)	Años	Tasa de cambio	Tasa de cambio %
1985-2002	Forestal	234.030	302.581	17	0.01523	1.52
	Pastizal	82.283	65.942	17	-0.01294	-1.29
	Agrícola	146.084	93.875	17	-0.02568	-2.57

Tabla 13: Tasa de transformación durante el periodo 2002-2014 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Periodo	Vegetación y Uso de suelo	Superficie tiempo 1 (km ²)	Superficie tiempo 2 (km ²)	Años	Tasa de cambio	Tasa de cambio %
2002-2014	Forestal	302.581	269.906	12	-0.0095	-0.95
	Pastizal	65.942	107.213	12	0.0413	4.13
	Agrícola	93.875	85.278	12	-0.0080	-0.80

4.3 Escorrentía y erosión hídrica en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán

Como resultado de la ejecución del modelo AGWA se subdividió la subcuenca en 36 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) Figura 20.

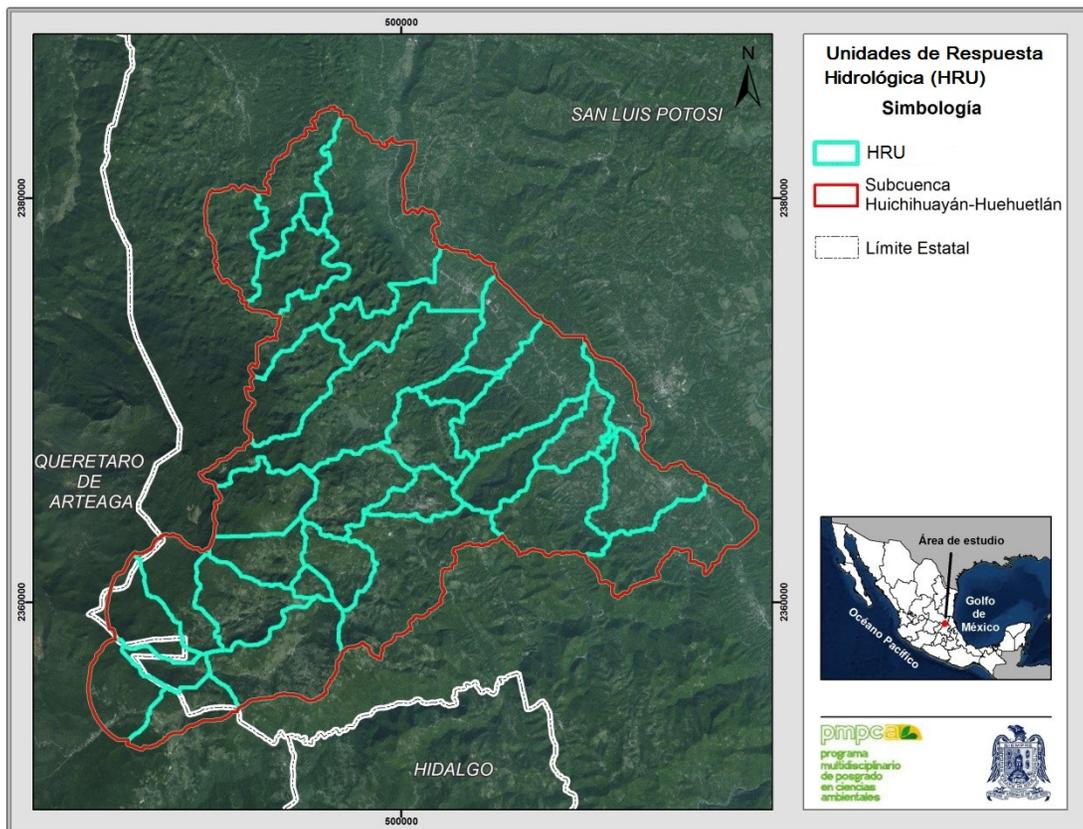


Figura 20: Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

4.3.1 Escorrentía

SWAT dio un estimado de la escorrentía superficial a nivel de HRU para cada año (figuras 21, 21 y 23). Durante 1985 se estimaron valores máximos de hasta 1400 mm. Los valores mínimos se registraron en la parte alta de la subcuenca, mientras que en el municipio de Axtla de Terrazas se registró mayor escorrentía, seguido por la parte centro del municipio de Xilitla, Aquismón y Huehuetlán.

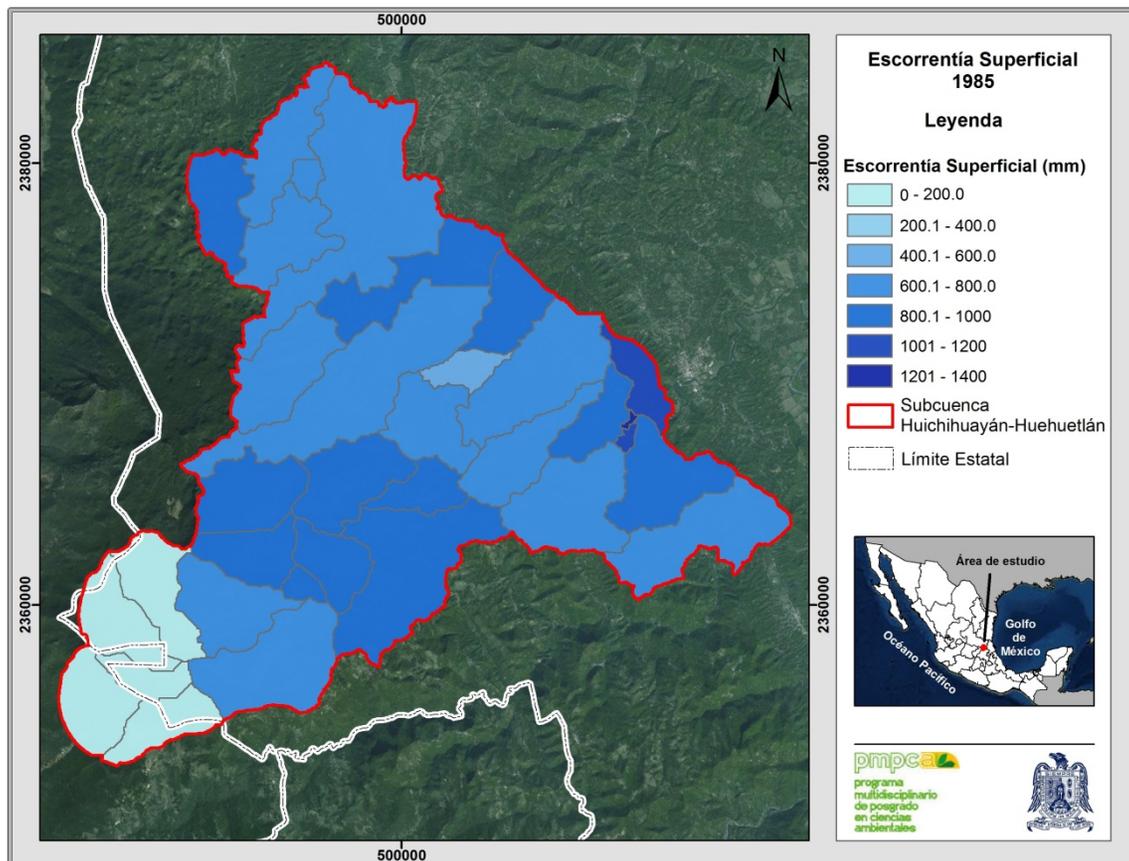


Figura 21: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 1985.

Los valores más bajos ocurrieron durante el año 2002, con una escorrentía superficial mínima de 23.28 mm al suroeste de la subcuenca, en localidades como Buenavista, La Mora y El Lobo, entre otras y un máximo de 800 mm en el centro del municipio de Xilitla y sureste de la subcuenca en el municipio de Axtla de Terrazas.

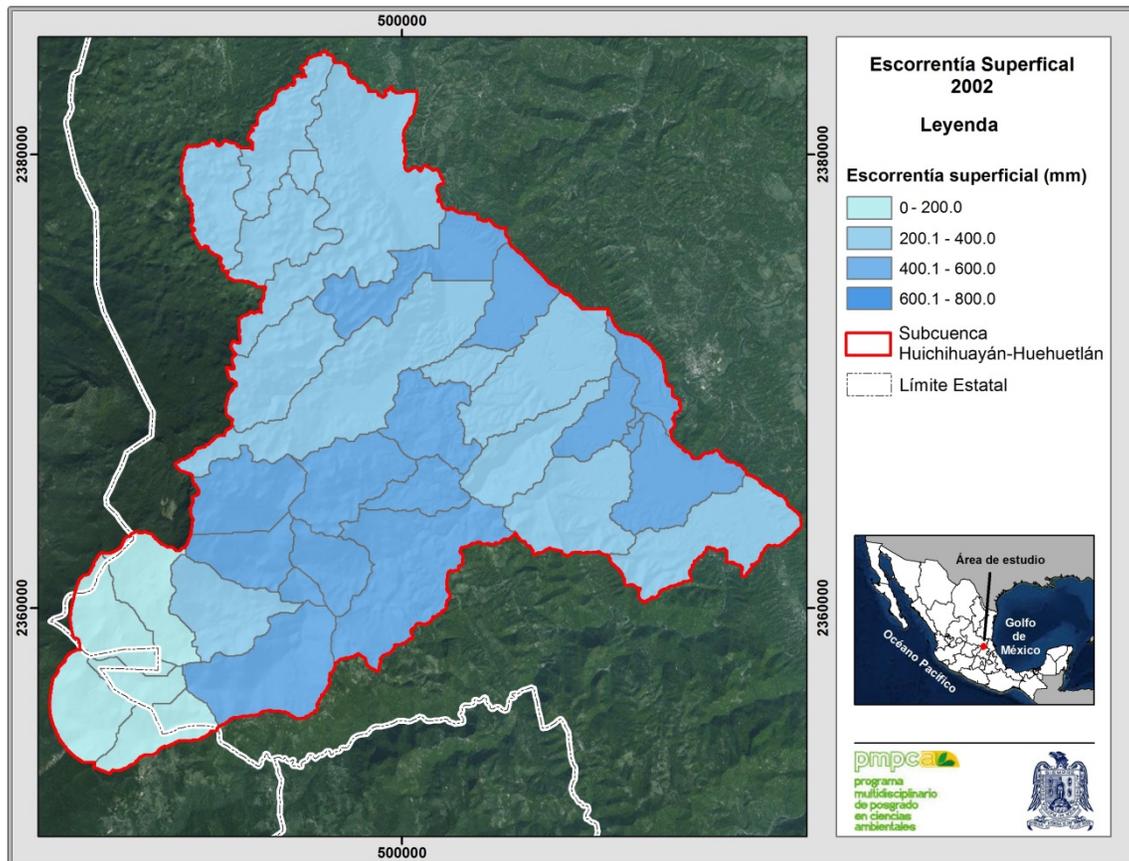


Figura 22: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 2002.

Durante 2014 se estimaron los valores más altos de escorrentía superficial, pues se alcanzaron hasta 1600 mm. Los valores mínimos, al igual que en años anteriores se observan en la parte alta de la subcuenca al suroeste de Xilitla y sureste de Landa de Matamoros, mientras que en el municipio de Axtla de Terrazas se

alcanzaron valores mayores a 1000 mm anuales. Las HRU del centro y norte de la subcuenca presentan valores medios durante los tres años de estudio.

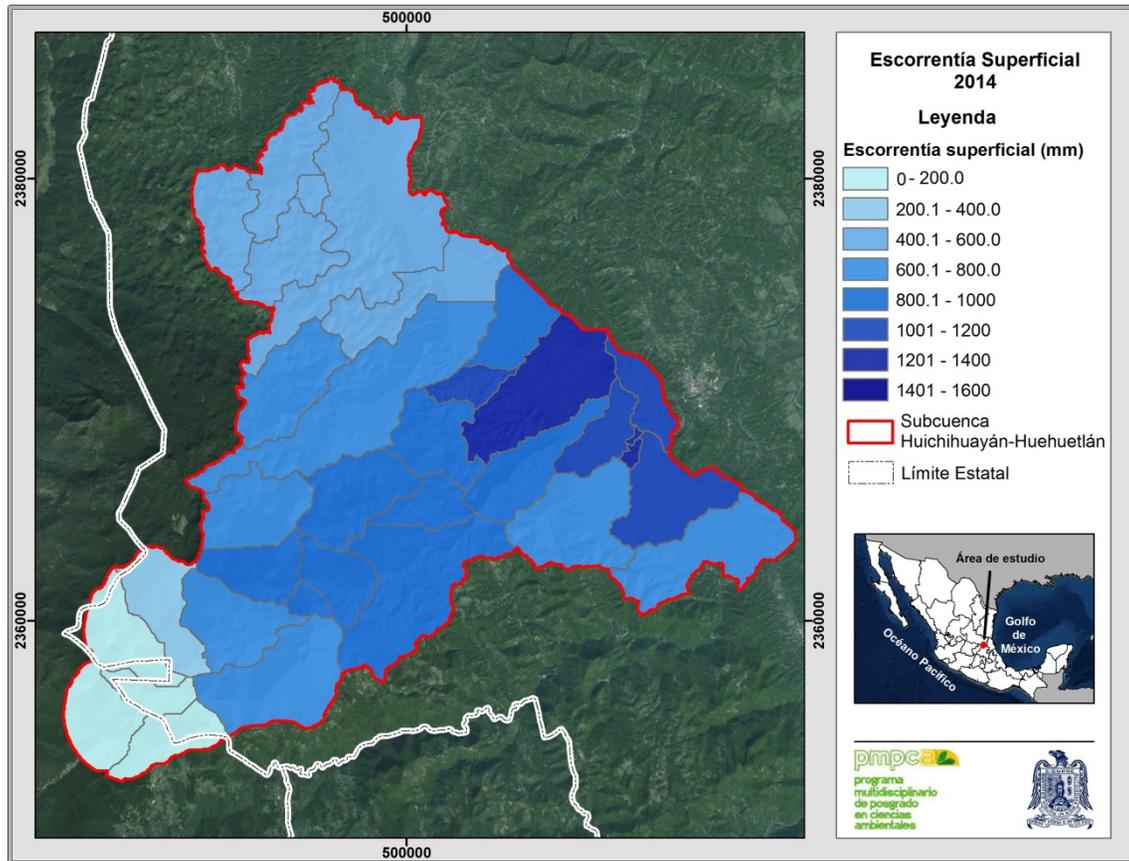


Figura 23: Escorrentía superficial estimada por HRU en el año 2014.

4.3.2 Erosión

Durante 1985 se estimó la mayor producción de sedimentos, los valores alcanzaron hasta 300 t/ha, en el municipio de Axtla de Terrazas, mientras que al suroeste y sureste de la subcuenca se observaron valores menores a 50 t/ha; estos valores

coinciden con la menor escorrentía superficial estimada para el mismo año, en la parte alta de la subcuenca. En la parte central y norte se observa que la producción de sedimentos oscila entre 50 y 200 t/ha, cantidades similares en la mayor parte de la subcuenca (Figura 24).

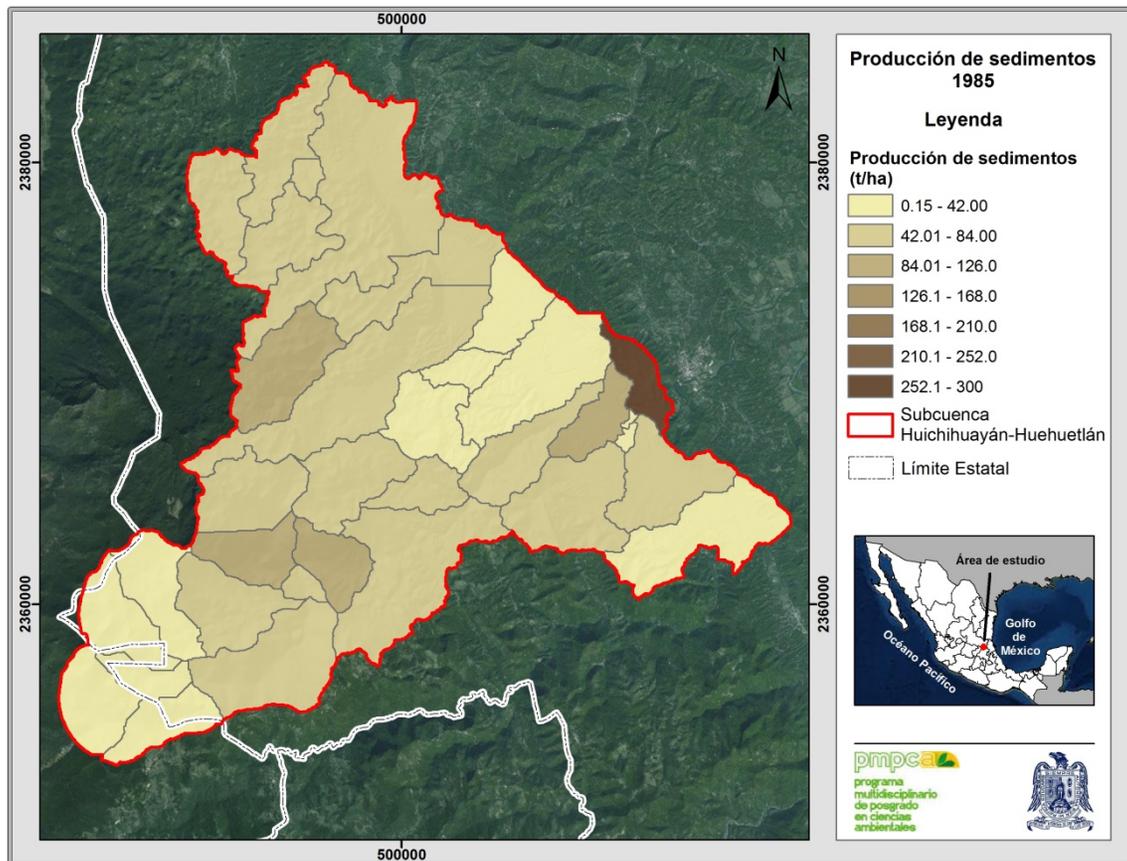


Figura 24: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 1985.

Durante 2002 se estimó la menor producción de sedimentos, pues los valores más altos alcanzaron las 20 t/ha, ubicándose en el municipio de Axtla de Terrazas. La parte centro y norte de la subcuenca mantuvieron valores medios al igual que en 1985; así mismo, en la parte suroeste y sureste se estimaron valores menores a 5 t/ha (Figura 25).

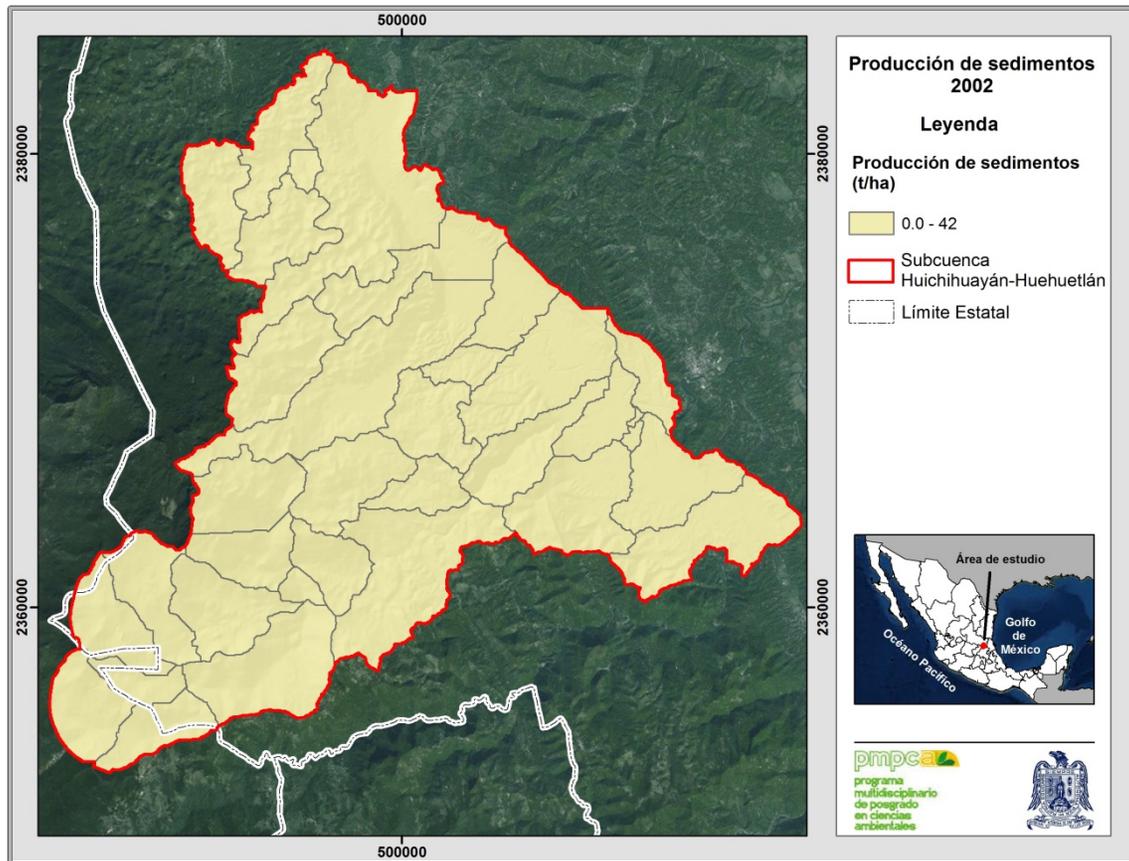


Figura 25: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 2002.

En 2014, la producción de sedimentos estimados alcanzó hasta 50 t/ha; este valor pertenece a la misma HRU que presentó los valores más altos en 1985 y 2002. Durante este año, la parte alta de la subcuenca produjo hasta 10 t/ha por HRU, así como algunas ubicadas en el centro, norte y una al sureste de la subcuenca. En la parte centro se ha mantenido una constante en valores medios durante los tres años de análisis (Figura 26).

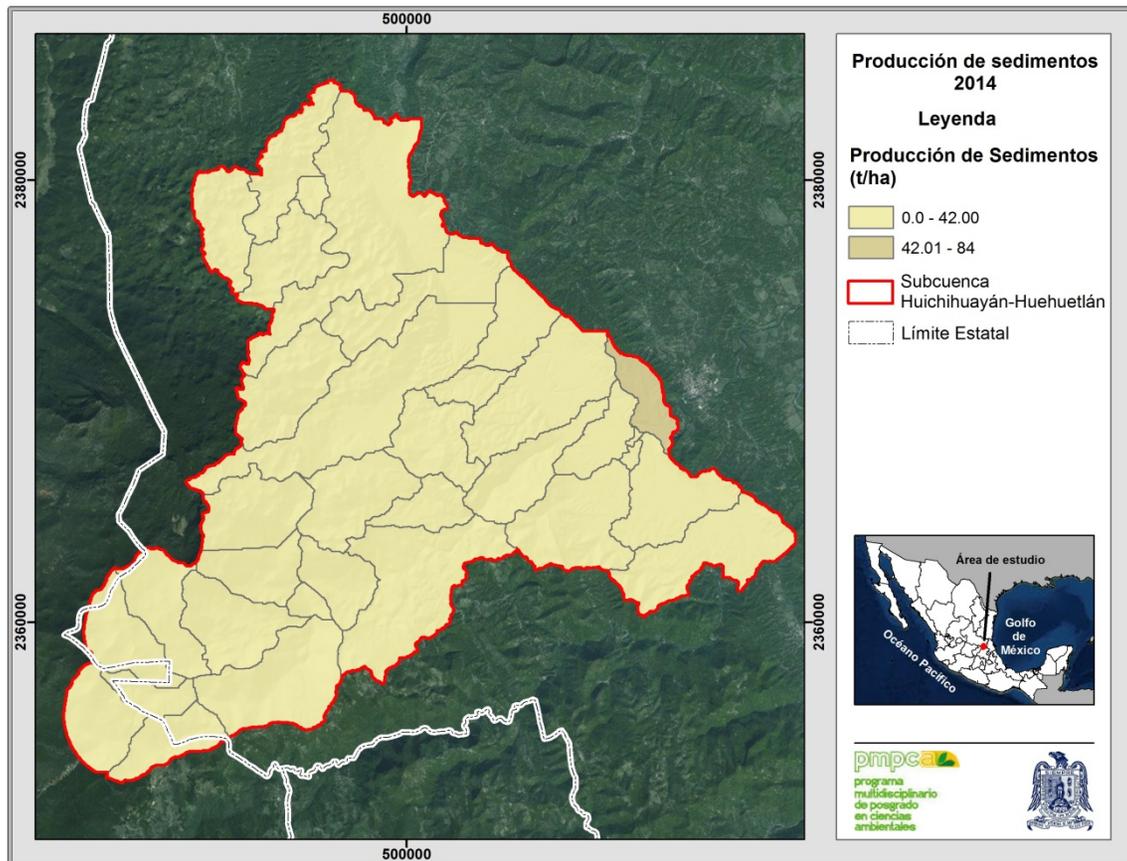


Figura 26: Producción de sedimentos estimados por HRU en el año 2014.

4.4. Validación del modelo SWAT usando datos de gasto medido en estaciones hidrométricas.

Los resultados obtenidos por SWAT fueron validados con datos de gasto mensual medidos de la estación hidrométrica Requetemu. El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.88 y 0.85 (Figura 27) para el periodo 1983-1987 y 2000-2004 respectivamente.

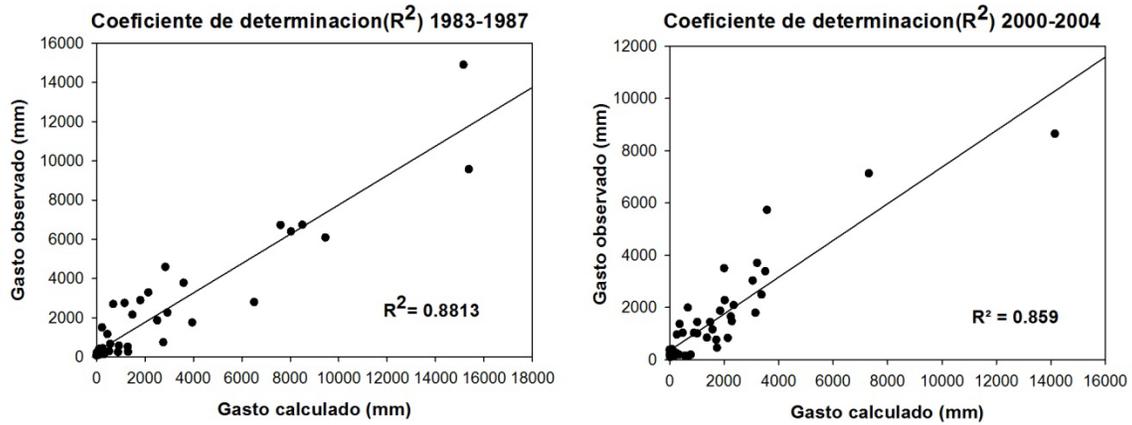


Figura 27: Coeficiente de determinación (R^2) de la escorrentía superficial calculada y observada.

En la figura 28 y figura 29 se muestra que la dinámica de la escorrentía simulada por SWAT sigue la misma tendencia al observado en la estación hidrométrica Requetemu, se presenta un error medio para el periodo 1983-1987 de 34.36%; para 2000-2004 fue de 17.28%.

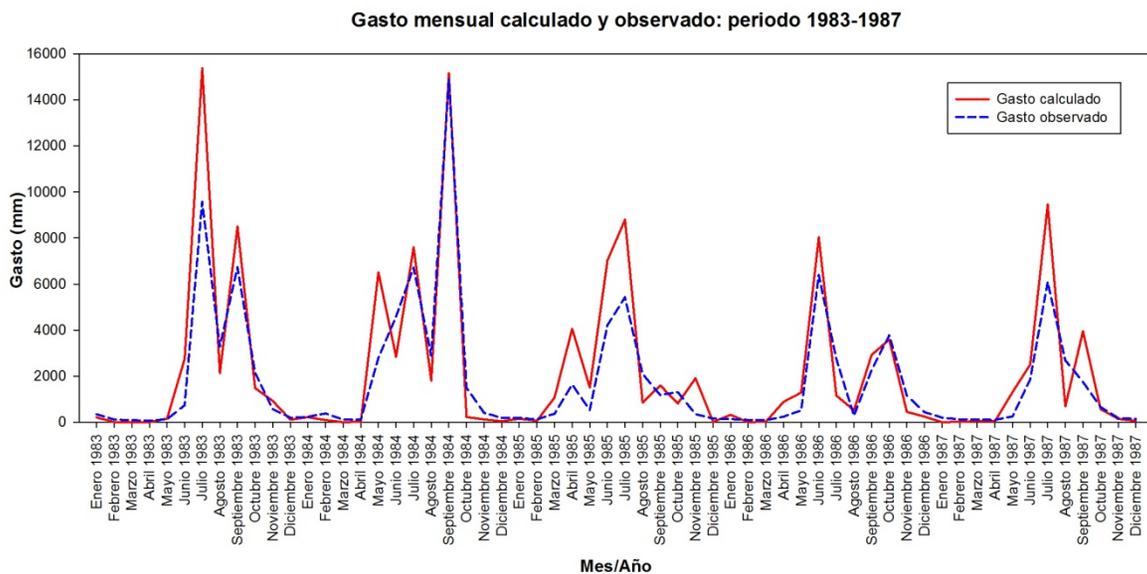


Figura 28: Gasto mensual calculado y observado: periodo 1983-1987.

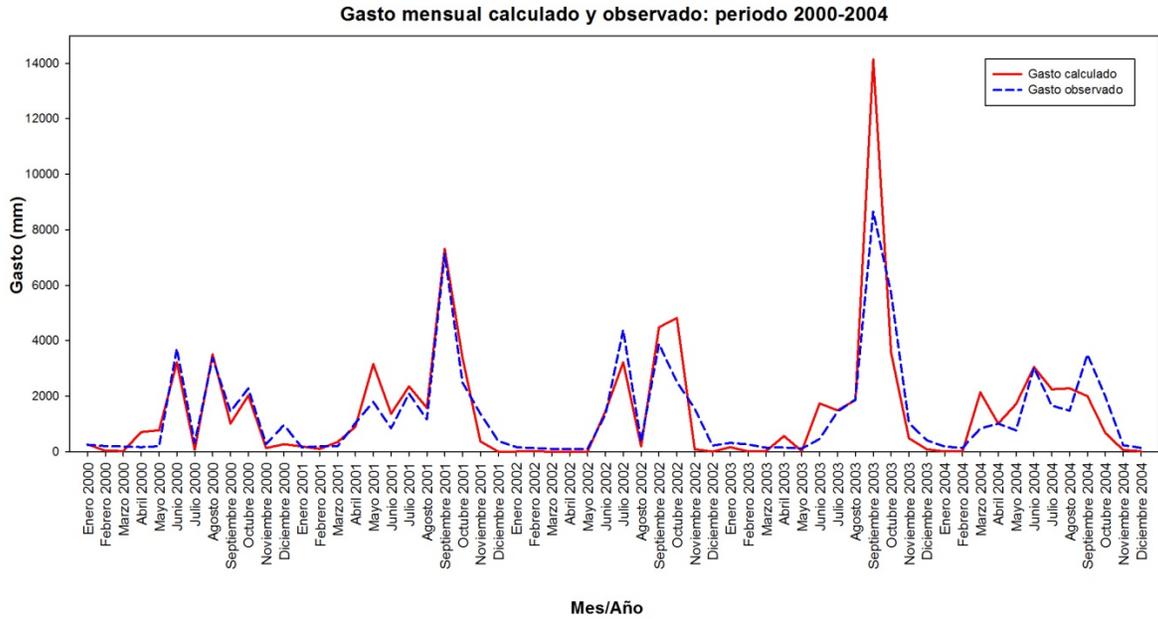


Figura 29: Gasto mensual calculado y observado: periodo 2000-2004.

Con respecto a la producción estimada de sedimentos se observó que la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán presentó una disminución considerable en la producción de éstos a través del tiempo, pues en 1985 se estimaron valores superiores a las 500 t/ha (Figura 30) y para 2000 y 2004 se estimaron valores inferiores, pues se registró una producción de sedimentos aproximada de 200 t/ha.

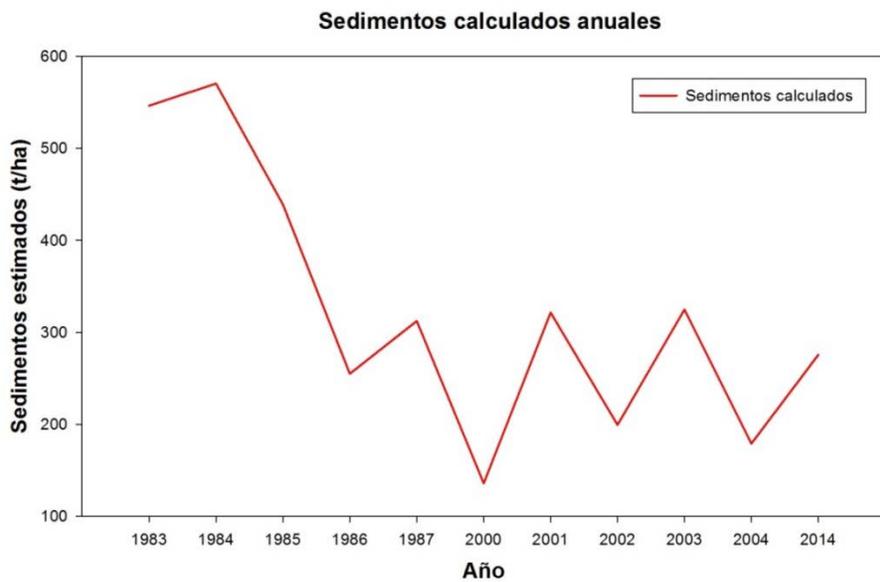


Figura 30: Sedimentos calculados anuales.

4.5. Escorrentía y erosión bajo distintos escenarios futuros de precipitación y cambio de uso del suelo y vegetación.

4.5.1. Vegetación

En la Figura 31 se observa que el bosque podría recuperarse principalmente en la parte baja-media de la subcuenca, lo cual se comprueba en la Tabla 14 y Tabla 15 correspondientes a matrices de cambio para los periodos 2024-2039 y 2039-2064, estos cambios se calcularon con base en la tendencia de los cambios que se han presentado a partir de 1985.

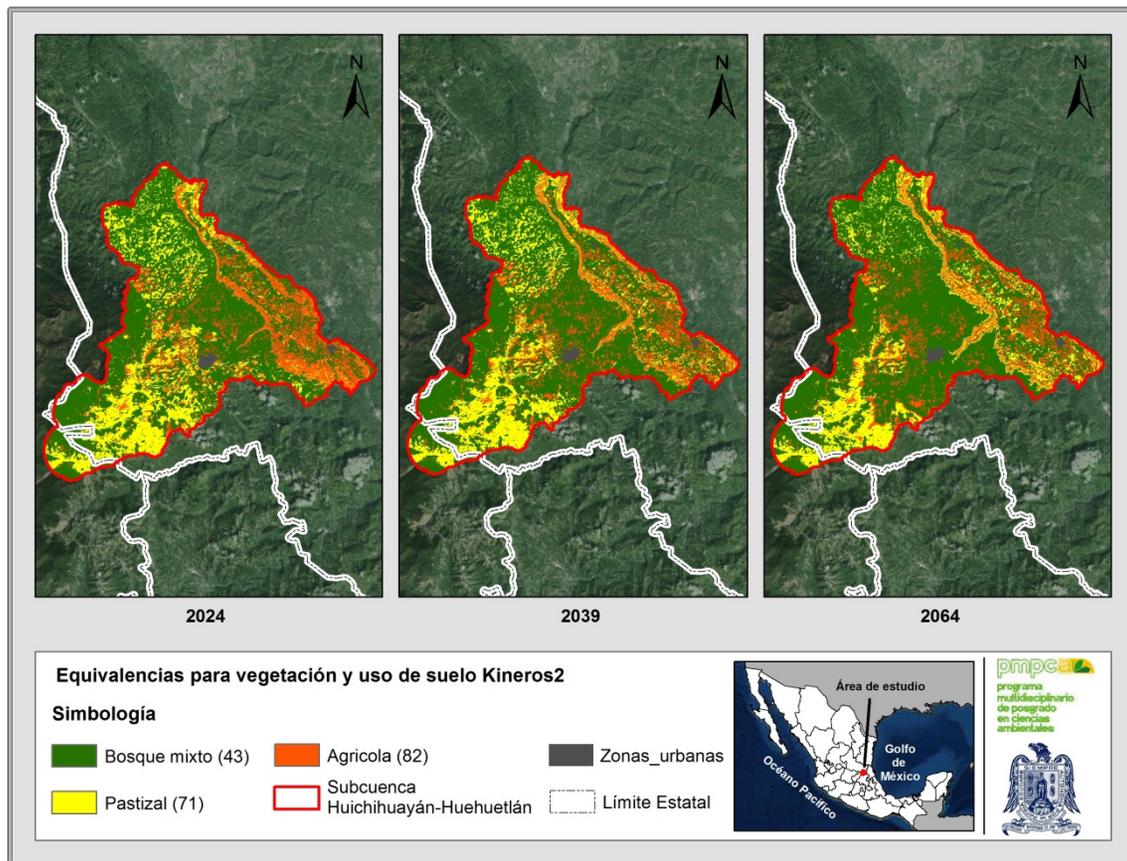


Figura 31: Escenarios de vegetación y uso de suelo a futuro para 10, 25 y 50 años.

Los cambios observados durante el periodo 2024-2039 (Tabla 14), indican que podría haber una conversión de 7.2 km² de cubierta forestal a agrícola; sin embargo también se tienen cambios de 13.25 km² de pastizal y 9.94 km² agrícola a forestal.

Tabla 14: Matriz de cambio para el periodo 2024-2039 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

km ²	2039			
2024	Vegetación y Uso de suelo	Forestal	Pastizal	Agrícola
	Forestal	267.42	5.21	7.23
	Pastizal	13.25	79.89	4.23
	Agrícola	9.94	10.26	64.97

Para el periodo 2039-2064 (Tabla 15) se espera que se presente una conversión de 5.9 km² de forestal a agrícola, y de 19.42 km² de pastizal y 9.2 km² de agrícola a forestal. A partir de ambas matrices se puede observar que la vegetación forestal tendrá cierta recuperación.

Tabla 15: Matriz de cambio para el periodo 2039-2064 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

km ²	2064			
2039	Vegetación y Uso de suelo	Forestal	Pastizal	Agrícola
	Forestal	276.95	7.69	5.97
	Pastizal	19.42	61.69	14.25
	Agrícola	9.27	13.47	53.68

En cuanto a las tasas de cambio durante el periodo 2024-2039 (Tabla 16) se observa una posible recuperación de 0.26 % de vegetación forestal, mientras que para el periodo 2039-2064 (Tabla 17) se estima una recuperación de 0.21%, mientras que para el pastizal y agrícola se presentaría una disminución en ambos periodos en el área correspondiente.

Tabla 16: Tasa de transformación durante el periodo 2024-2039 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Periodo	Vegetación y Uso de suelo	Superficie tiempo 1 (km ²)	Superficie tiempo 2 (km ²)	Años	Tasa de cambio	Tasa de cambio %
2024-2039	Forestal	277.119	287.962	15	0.0026	0.26
	Pastizal	99.446	96.185	15	-0.0022	-0.22
	Agrícola	85.832	78.250	15	-0.0061	-0.61

Tabla 17: Tasa de transformación durante el periodo 2039-2064 en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Periodo	Vegetación y Uso de suelo	Superficie tiempo 1 (km ²)	Superficie tiempo 2 (km ²)	Años	Tasa de cambio	Tasa de cambio %
2039-2064	Forestal	287.962	303.693	25	0.0021	0.21
	Pastizal	96.185	83.204	25	-0.0058	-0.58
	Agrícola	78.250	75.500	25	-0.0014	-0.14

4.5.2 Escorrentía

En la serie de figuras 32, 33 y 34 se muestra, a nivel de HRU, la escorrentía esperada si la vegetación coincidiese con la proyección obtenida por medio de Terrset. Para el escenario de 10 años (2024), con un periodo de retorno también de 10 años, se observó que un evento de lluvia de 2 h, con una intensidad de 62 mm/h, puede producir mayor cantidad de escorrentía superficial, y alcanzar hasta 80 mm. Se observó que las Unidades de Respuesta hidrológica de la parte alta de la subcuenca son las que presentarían mayor escorrentía.

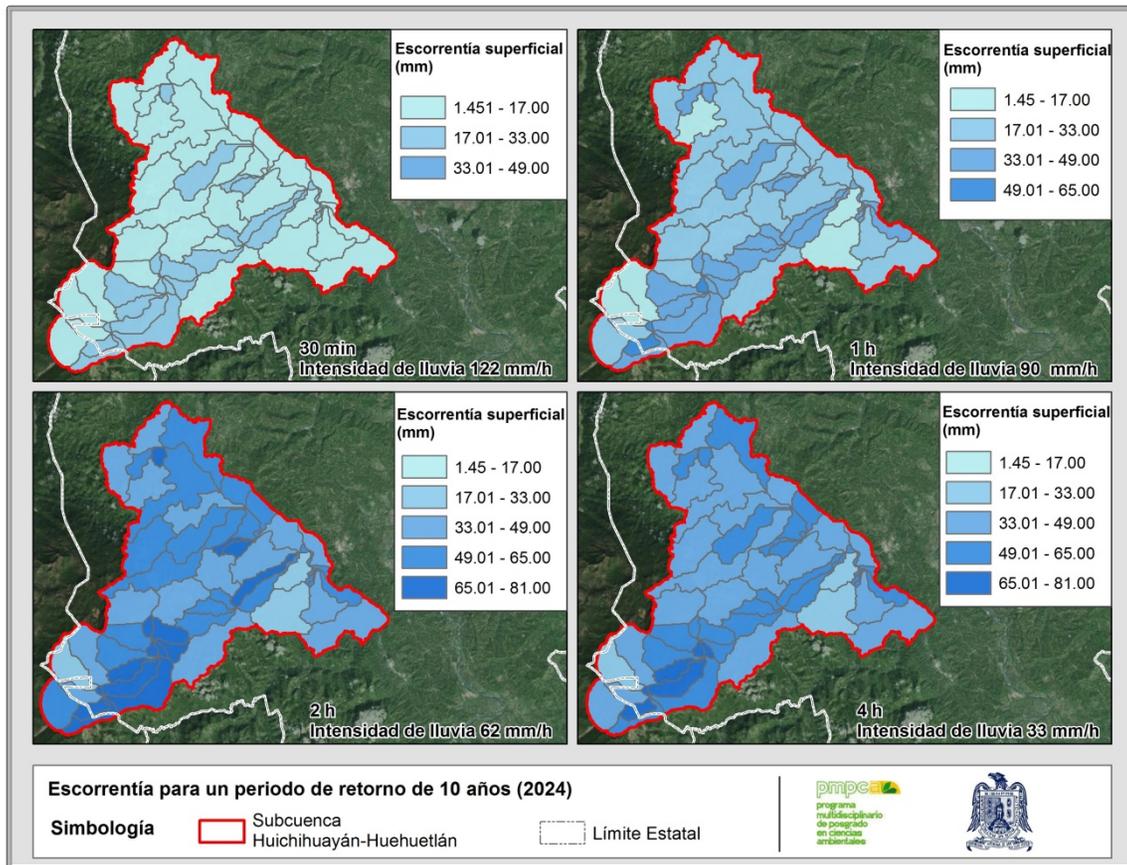


Figura 32: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 10 años con distinta intensidad y duración.

Para el escenario 2039 con un periodo de retorno de 25 años, se observó que un evento de lluvia de 2 h con una intensidad de 71 mm/h, puede producir hasta 80 mm de escurrimiento superficial, siendo las HRU de la parte alta donde se puede presentar dicha escorrentía. Al igual que en escenario 2024, la parte alta ubicada al suroeste del municipio de Xilitla pueden presentar los valores más altos de escorrentía.

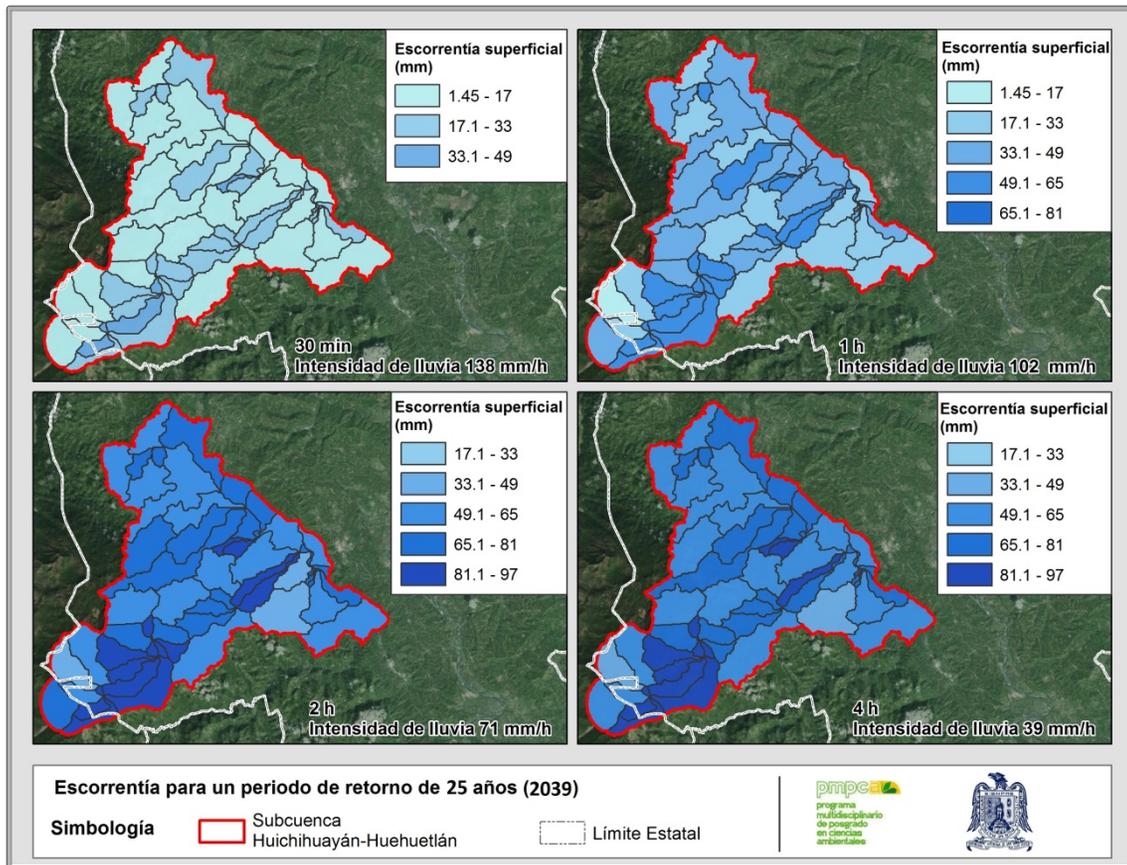


Figura 33: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 25 años con distinta intensidad y duración.

En el 2064 con un periodo de retorno de 50 años, se estimó un máximo de 113 mm de escorrentía superficial para un evento de lluvia con una duración de 2 h y una intensidad de 77 mm/h; sin embargo, a diferencia de los escenarios anteriores, este mismo valor se puede presentar en eventos de 4 h con intensidad de lluvia de 43 mm/h en un número mayor de HRU. Las Unidades de Respuesta hidrológica al suroeste de la subcuenca presentan los valores más altos en cuanto a escorrentía superficial.

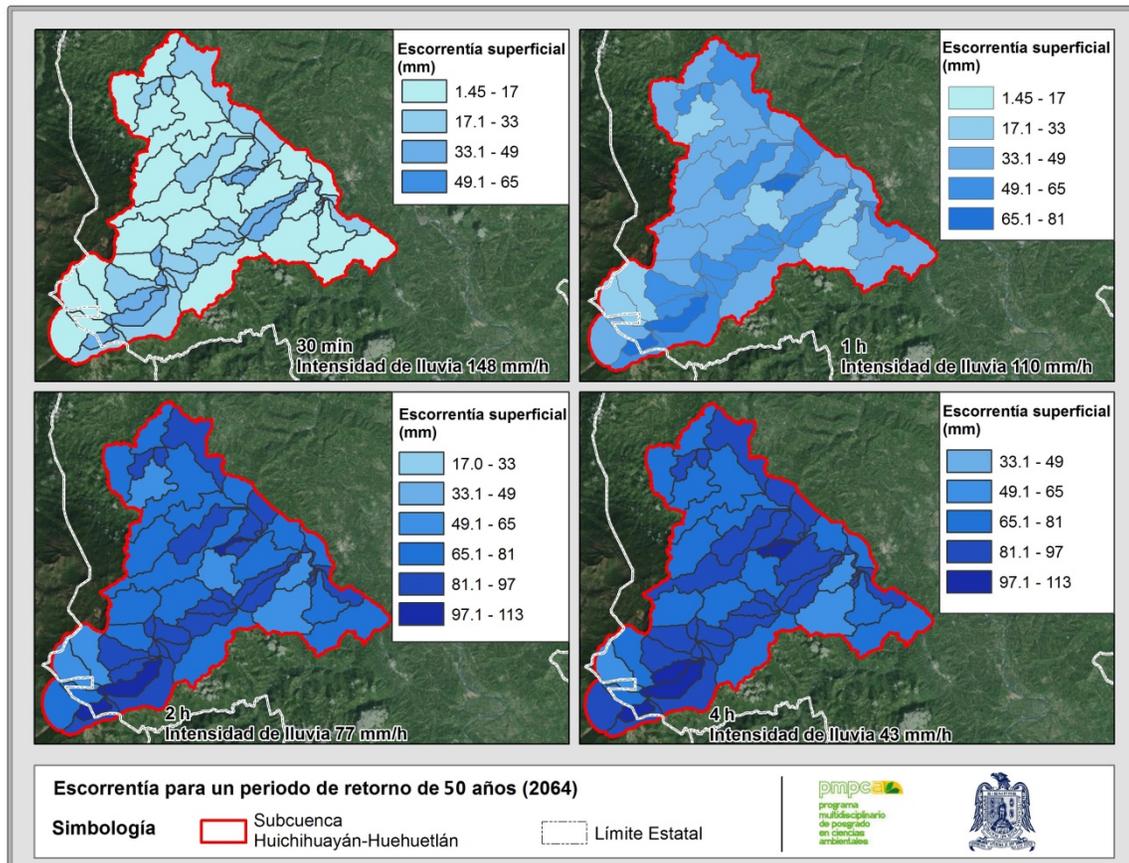


Figura 34: Escorrentía superficial estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 50 años con distinta intensidad y duración.

En general los resultados muestran que en las HRU al suroeste de la subcuenca son en las que se puede producir mayor escorrentía con 2 h de lluvia, de manera independiente a la intensidad con que se presente cada evento.

4.5.3 Erosión

En cuanto a la producción de sedimentos para el 2024 con un periodo de retorno de 10 años, se observó que se podrían alcanzar hasta 768 t/ha en eventos de lluvia con una duración de 2 h y una intensidad de 62 mm/h, esto en las HRU de la parte alta y media de la subcuenca (Figura 35).

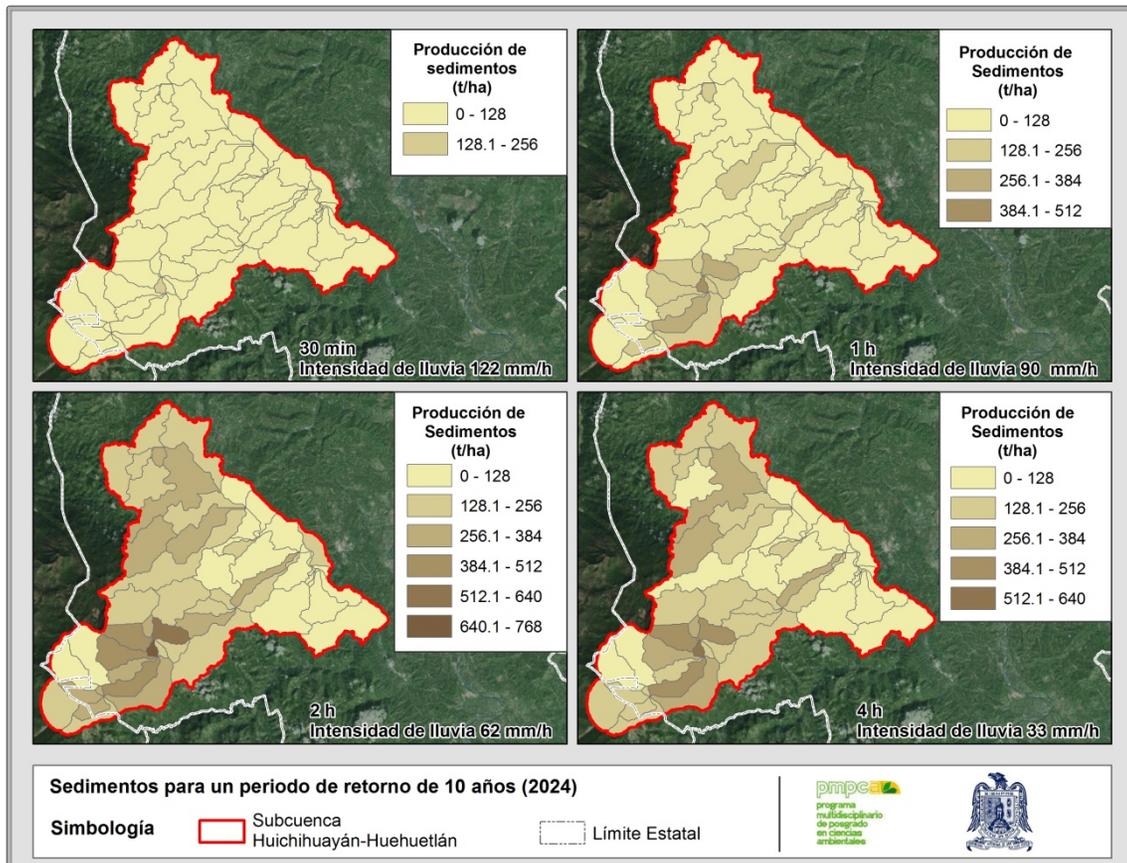


Figura 35: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 10 años con distinta intensidad y duración.

El escenario para el 2039, presentó valores altos de 768 t/ha en eventos de lluvia con duración de 2 y 4 h, y con intensidades de 71 y 39 mm/h respectivamente, son las HRU de la parte centro y suroeste en las que se puede presentar dichos valores. Este tipo de evento de lluvia, corresponde a un periodo de retorno de 25 años (Figura 36).

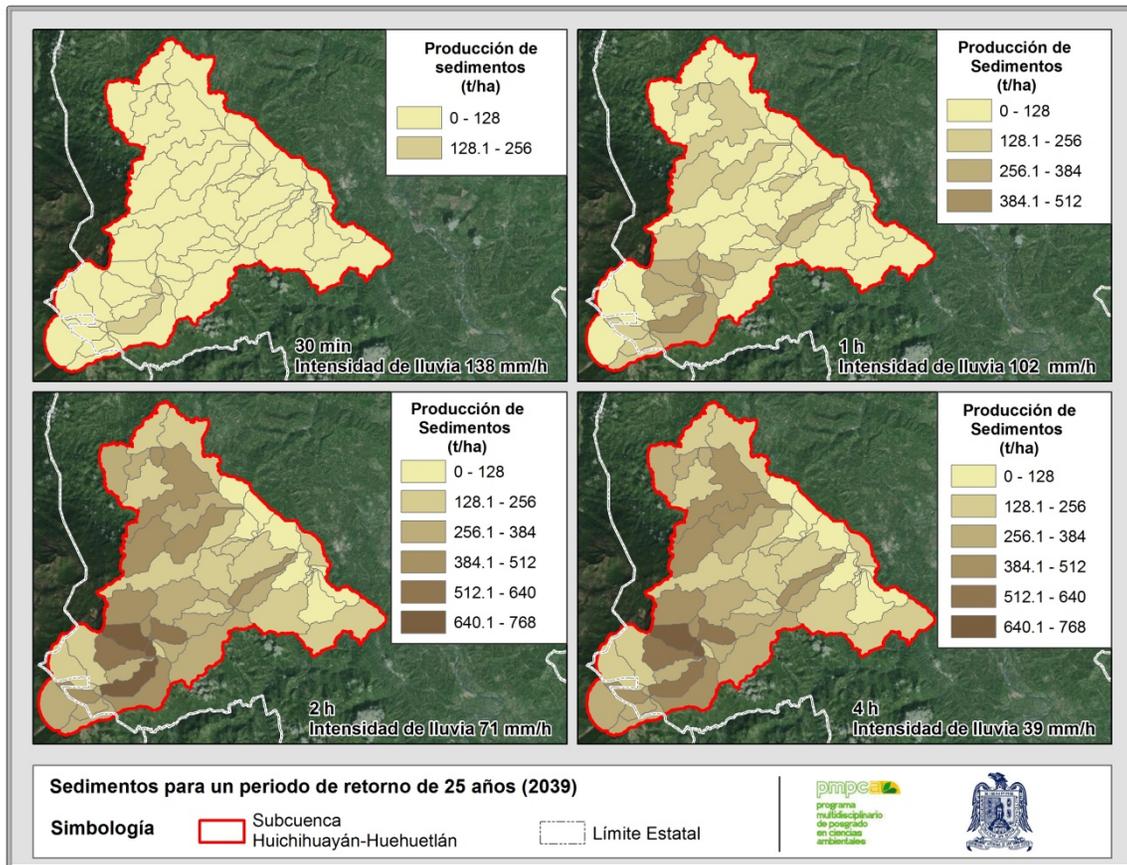


Figura 36: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 25 años con distinta intensidad y duración.

Para finalizar, en un escenario de 2064, con un periodo de retorno de 50 años, se estimó una producción de sedimentos de 900 t/ha en dos eventos de lluvia con duración de 2 y 4 h e intensidades de 77 y 43 mm/h respectivamente; sin embargo, se puede observar que en 4 h se tienen valores altos en un número mayor de HRU con respecto al de 2 h, la parte centro de la subcuenca, de manera específica en el municipio de Xilitla siguen presentándose los valores más altos en la producción de

sedimentos y conserva la misma tendencia que los escenarios anteriores (Figura 37).

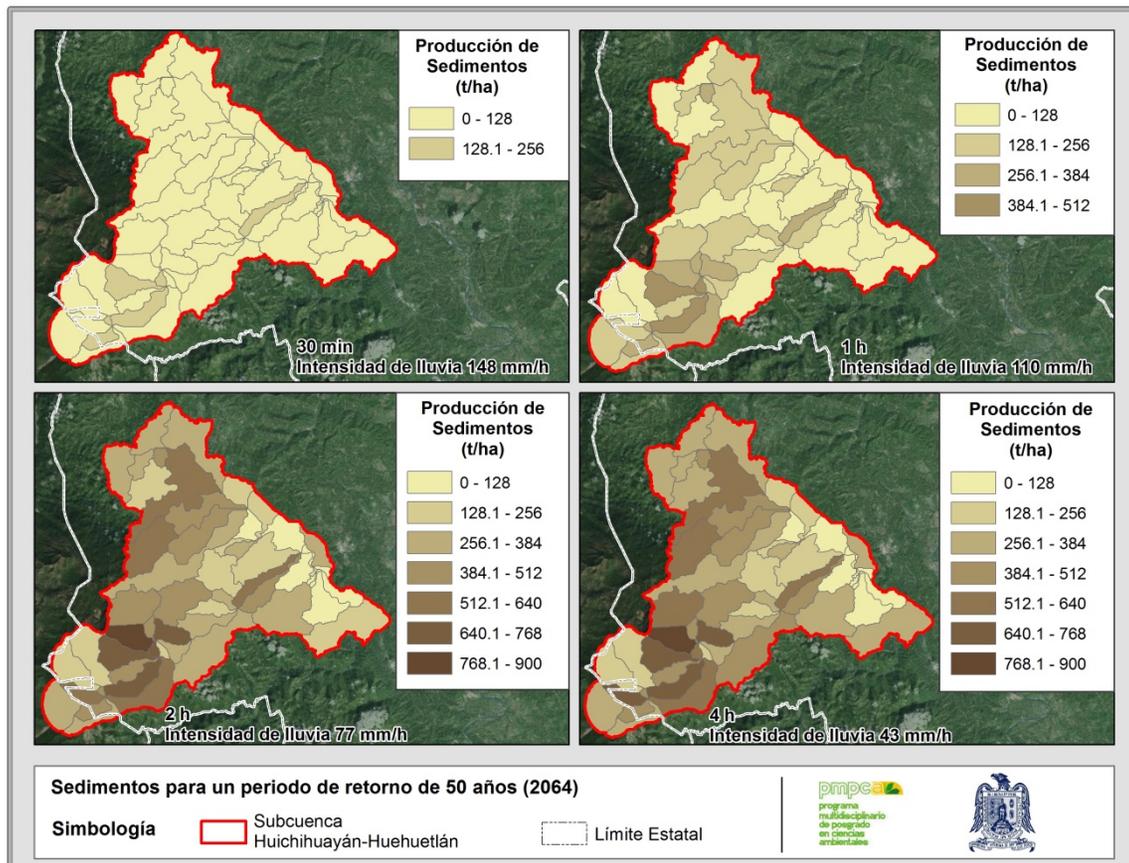


Figura 37: Producción de sedimentos estimada por HRU para escenario y periodo de retorno de 50 años con distinta intensidad y duración.

5. DISCUSIÓN

5.1. Escorrentía y erosión hídrica en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán.

Con los resultados de vegetación y uso de suelo de 1985, 2002 y 2014, se refleja el abandono de tierras agrícolas a través de los procesos de sucesión en pastizales o vegetación secundaria. En el caso de la vegetación secundaria, se ha favorecido el incremento de zonas con estrato arbóreo y se ha recuperado la vegetación forestal.

Estos resultados coinciden con los argumentos de los ejidatarios, quienes aseguraron que a partir de los años 80 comenzó el proceso de migración en la zona, lo cual ocasionó el cambio de zonas agrícolas que tenían sistemas de rotación de cultivos en superficies destinadas a maíz y frijol a potreros. Los entrevistados argumentaron que entre la década de los años 30 y 50 la producción agrícola era buena, sin embargo, desde hace 30 años han observado una disminución en su producción.

A partir de estos datos y observaciones, se infiere que los cambios en la escorrentía y erosión están relacionados con los cambios en la vegetación y precipitación como lo presentan Santacruz (2011), Belmonte et al. (1999), Figueroa et al. (2011) y Mendoza et al. (2002), entre otros. De acuerdo con las matrices de cambio en la vegetación y uso de suelo, se observó que a partir del 2002 hubo un cambio de forestal a agrícola, es decir desmontes; sin embargo, también existen zonas con cambios de pastizal o agrícola a forestal, lo que da origen a una recuperación de la vegetación leñosa, al ocurrir la sucesión secundaria. Estos cambios pueden estar relacionados con la disminución en la escorrentía y erosión, de manera principal en la zona noroeste de la subcuenca, donde se aprecia mayor infiltración.

La vegetación en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán tuvo cierta recuperación en el estrato arbóreo, reflejada en la disminución de la erosión, situación similar a lo ocurrido en otros lugares del país que presentan climas de tipo tropical húmedo en la Sierra Madre Oriental, tal es el caso del municipio de Pisaflores, Hidalgo o en espacios con climas semiáridos como en Murcia al sureste de España, (Avwunudiogba, 2012; Belmonte et al., 1999). Sin embargo y a pesar de dicha tendencia, no se debe dejar de lado que las características geomorfológicas y de cobertura vegetal también inciden en el grado de erosión, estos factores se pueden observar principalmente en la parte media de la subcuenca donde algunas zonas

con cobertura vegetal arbórea sobre pendientes abruptas presentan valores altos de erosión, como en zonas de pastizal y/o uso agrícola tal como lo menciona Huerta et al. (2014).

Sin embargo, los cambios en la escorrentía estimada también pueden estar asociados a la variabilidad de la precipitación y el tipo de suelo, como lo señala Braud et al. (1999). A partir del 2002 se observó la recuperación de la vegetación, en la zona noroeste de la subcuenca; esto puede causar la disminución de la escorrentía y erosión al existir mayor infiltración y protección del suelo, mientras que en la parte media-alta de la subcuenca se presentaron valores altos en la escorrentía y erosión debido a la presencia de pastizales y algunas zonas agrícolas. En la figura 38 se muestra que durante 2002 las precipitaciones alcanzaron los 2000 mm anuales, mientras que durante 1985 y 2009, se registraron valores cercanos o mayores a los 3000 mm anuales.

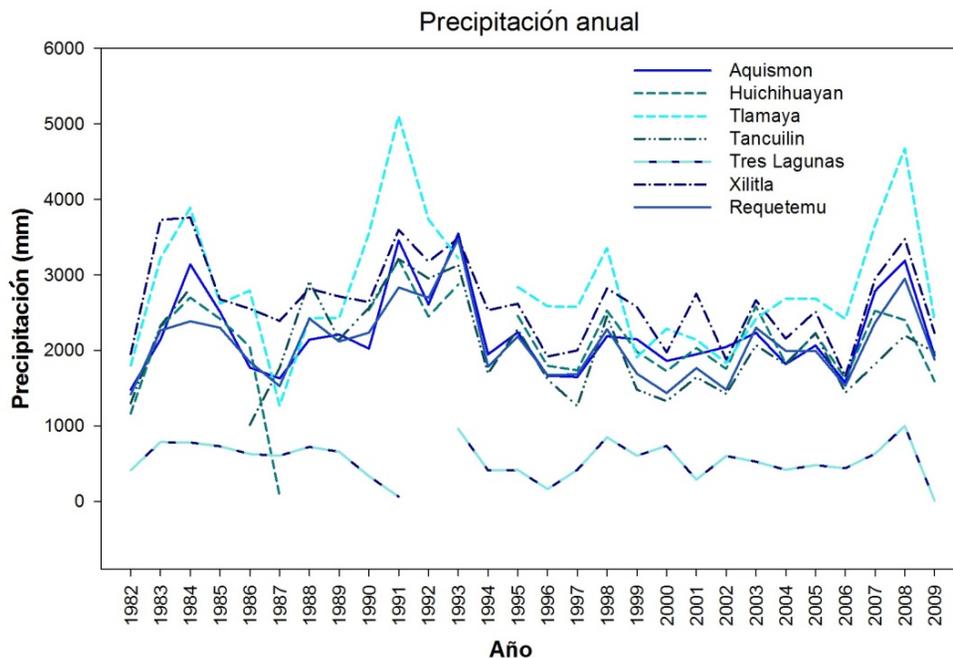


Figura 38: Precipitación anual. (fuente: <http://smn.conagua.gob.mx/>)

Se observa también una correlación entre escorrentía y sedimentos, pues al suroeste de la subcuenca, se obtuvieron valores directamente proporcionales; en estas HRU se observan grandes extensiones cubiertas por pastizal y algunas zonas agrícolas. Asimismo, se observó una disminución de sedimentos de 1985 a 2014, lo cual puede ser originado por la recuperación en la vegetación arbórea.

Los resultados obtenidos por SWAT son similares a los obtenidos en el Ordenamiento Ecológico de San Luis Potosí realizado en 2008 (Disponible en: <http://evirtual.uaslp.mx/Ambiental/Proyectos>), donde se reporta una tasa de erosión moderada a muy alta en la subcuenca. El modelo SWAT estimó valores máximos de hasta 300 t/ha/año durante 1985, estos valores pueden explicarse por precipitaciones cercanas o superiores a 3000 mm anuales, asociados al uso de suelo, que consistía en zonas agrícolas, en la parte alta y baja de la subcuenca. Estos resultados muestran que la erosión en la subcuenca se encuentra por encima de los límites permisibles de erosión que no deben rebasar las 6.7 t/ha/año (Becerra, 1999). Sin embargo, se observó una disminución en la erosión durante 2014, pues se alcanzaron máximos de 50 t/ha/año, y aunque se presentaron precipitaciones superiores a los 3000 mm, también se tuvo una conversión de zonas agrícolas a pastizales.

El modelo hidrológico SWAT ha sido utilizado en diversas regiones donde ha tenido resultados satisfactorios (Ortiz et al., 2010; Ramírez, 2015; Santhi et al., 2001; Schuol et al., 2006; Torres et al., 2004). La aplicación de este modelo da a conocer una aproximación de la realidad en cuencas grandes para entender la problemática que se puede presentar en cada una de ellas, donde no se cuenta con suficientes datos aforados, como es el caso del área de estudio y de muchas más zonas en México.

Sin embargo, esta aproximación de la realidad en las diferentes cuencas puede verse afectada por la falta de datos climatológicos e hidrométricos los cual limitan la ejecución y validación de modelos hidrológicos, principalmente en cuencas pequeñas. Por ejemplo, pueden afectar la correlación entre caudales medidos y estimados, debido a la insuficiencia de estaciones hidrométricas cercanas a la

cuenca, a la carencia de mediciones de caudales y la discontinuidad en los registros de las estaciones meteorológicas, tal fue el caso de Guzmán et al. (2004).

En este sentido la escala de trabajo es un factor importante para la obtención de información meteorológica (Pérez et al., 2006), pues es factor determinante para la exactitud del modelo (Kraemer et al., 2011) de manera especial en cuencas pequeñas, donde no se cuenta con información suficiente dentro o cercanas a ella.

5.2 Validación del modelo SWAT usando datos de gasto medido en estaciones hidrométricas.

El modelo hidrológico SWAT en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán sirve para entender de manera aproximada el funcionamiento hidrológico en zonas de difícil acceso debido a pendientes abruptas, pero además donde no se cuenta con análisis de suelos detallados, datos de aforo en los ríos para la validación de sedimentos y registros completos de temperatura. Sin embargo, a pesar de las limitantes en los parámetros de entrada los resultados estimados son aceptables y se asemejan a otros estudios similares (Caciano et al., 2007; Ortiz et al., 2010; Ramírez, 2015; Salas et al., 2014; Torres et al., 2005).

Los resultados calculados por SWAT tienen una adecuada eficiencia en la estimación de los valores de escurrimiento superficial calculados con respecto a los observados en la estación hidrométrica ($R^2=0.88$, 0.85 y 0.91 para 1985, 2002 y 2014 respectivamente), y son similares a los obtenidos por otros autores que han utilizado el modelo SWAT en distintas condiciones (Tabla 18); dichos valores son aceptables cuando los valores de R^2 es mayor a 0.5, pues la varianza del error es menor (Moriassi et al., 2007).

Tabla 18: Coeficiente de determinación para escurrimiento superficial obtenidos por otros autores empleando el modelo SWAT

Autor	Cuenca	Coefficiente de determinación (R²)
Torres et al. (2004)	Cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México	0.94
Torres et al. (2005)	Cuenca del río Laja, Guanajuato, México	0.95
Ramírez (2015)	Cuenca del río Copalita, Oaxaca, México	0.75
Caciano et al. (2007)	Cuenca del río Sextin, Durango	0.69 - 0.87
Salas et al. (2014)	Cuenca del río mixteco, Oaxaca	0.83
Benavides et al. (2008)	Cuenca Tapalpa, Jalisco	0.85
Zhang et al. (2007)	cuenca del río Luohe, China	0.70
Grey et al. (2014)	Cuenca del Gran Río, Jamaica	0.67

La escorrentía superficial simulada por SWAT fue en general sobrestimada; se considera que la magnitud del error estimado puede deberse a los siguientes factores:

- **Clima:** Los datos de temperatura de las estaciones hidrométricas presentaron insuficiencia en las mediciones diarias; además no se tienen estaciones en la parte sur de la subcuenca ni registros de radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío. Por otro lado, las estaciones existentes sólo presentan información hasta 2011.
- **Suelos:** No se contó con información detallada de suelos para el área de estudio, por lo que se ejecutó con la base de datos proporcionada por el modelo correspondiente a la FAO, pues requiere factores como porosidad, grupo hidrológico, profundidad máxima de enraizamiento, textura, profundidad, densidad aparente, capacidad de retención, contenido de carbono, conductividad hidráulica, etc.
- **Vegetación y uso de suelo:** se usó la base de datos proporcionada por el modelo para las características específicas por tipo de vegetación, en virtud de no contar con información detallada de otros parámetros de la vegetación como profundidad de raíces, permeabilidad, altura de la planta, cobertura,

coeficiente C, coeficiente de Manning (índice de rugosidad sobre la superficie), manejo de cultivos, etc.

A partir de la calibración del modelo con datos de precipitación diaria medidos en las estaciones climatológicas, se comprueba que la información meteorológica es un factor determinante en la exactitud del modelo (Kraemer et al., 2011) y se considera que un mejor ajuste del modelo se pudo haber logrado mediante la utilización de información edafológica detallada correspondiente a la zona de estudio. De acuerdo con Braud et al. (1999), la precipitación y tipo de suelo son factores que influyen de forma directa en la escorrentía, más que la variabilidad de la vegetación. Sin embargo, el resultado obtenido es alentador para este estudio a pesar de que no se contó con un análisis de suelo detallado.

Por otro lado, debido a la inexistencia de datos de aforo diario de sedimentos en la subcuenca no fue posible la validación de los datos estimados por SWAT. Este problema existe en gran parte del país donde no se tienen registros de aforos y concentración de sedimentos (Sánchez et al., 2014). Sin embargo, se observó el mismo patrón que en la escorrentía superficial, ya que la cantidad de sedimentos disminuyó de forma considerable desde 1983 hasta 2014 (300 t/ha/año hasta 50 t/ha/año), situación relacionada al cambio en la vegetación y uso de suelo y a la disminución de precipitación durante el periodo de estudio ya que, de acuerdo con Morgan (2009), los cambios en la cubierta vegetal y el uso de suelo pueden acelerar o disminuir la erosión.

El modelo SWAT estima de forma razonable los parámetros hidrológicos, los cuales pueden usarse como herramienta para la toma de decisiones en el manejo integrado de cuencas; sin embargo, se recomienda la calibración y validación del modelo. Para ello es necesario considerar lo siguiente:

- Mejorar y aumentar las estaciones climatológicas e hidrométricas con datos diarios y actualizados, además de medir parámetros como radiación solar, punto de rocío, humedad relativa, medición de caudales y sedimentos diarios.

- Realización de estudios detallados de suelos para el área de estudio, lo que proporcionará mayor precisión al modelo.
- Contar con mapas de vegetación y uso de suelo detallado y actualizado, así como las características fisonómicas del tipo de vegetación, de cultivos y planes de manejo para estudios en zonas agrícolas.
- Proporcionar la información generada en estudios para nuevas investigaciones (por ejemplo: suelos, datos de infiltración, etc.).

5.3 Escorrentía y erosión bajo distintos escenarios futuros de precipitación y cambio de uso del suelo y vegetación.

Los cambios en la vegetación y uso de suelo, así como la variabilidad en las condiciones climáticas son factores importantes en los cambios hidrológicos que se pueden presentar en las cuencas hidrográficas (Qi et al., 2005), por lo que es de suma importancia generar escenarios a futuro. En diversos estudios (Gleick, 1989; Guo et al., 2008; Li et al., 2009; Tan et al., 2015) se ha demostrado que la variabilidad climática influye en la hidrología superficial de manera más significativa que el cambio de uso de suelo.

A partir de lo anterior se generaron escenarios en la vegetación con tendencia en los cambios de uso de suelo y vegetación, suponiendo que otras variables no presentan cambios significativos para los años 2024, 2039 y 2064, y con los periodos de retornos de lluvia de 10, 25 y 50 años, con distinta intensidad y frecuencia. A pesar de la recuperación de los bosques, la escorrentía superficial aumentaría entre 1.45 mm/h hasta 110.00 mm/h como consecuencia de la variabilidad en las intensidades de la lluvia y se podrán observar los valores más altos en lluvias con duración de 2 h. Las zonas de mayor escorrentía se presentan en las HRU de la parte media-alta durante los tres escenarios, debido a que se mantendrán zonas de pastizal con pendientes pronunciadas.

En comparación con la escorrentía estimada para 1985, 2002 y 2014, se observó que para el escenario 2024 con periodo de retorno de 10 años se podrían alcanzar los valores mínimos de dichos años 45.51, 23.28 y 79.95 mm anuales, mientras que

para 2039 y 2064 éstos se podrían rebasar. Esto significa que la escorrentía aumentaría de forma considerable, puesto que los escenarios a futuro son predicciones con máximo de cuatro horas de duración de la lluvia, lo que significa que los valores máximos anuales se alcanzarían en un máximo de 2 h bajo las intensidades y frecuencias presentadas con los periodos de retorno.

En cuanto a la producción de sedimentos, durante los años 1985, 2002 y 2014 se estimaron valores máximos de hasta 300 t/ha; estos valores incrementarán a pesar de la recuperación en la vegetación en los escenarios a futuro, pues se prevé un aumento hasta 900 t/ha, con los valores más altos en las HRU del noroeste y suroeste en el municipio de Xilitla. Se estimó que durante los tres escenarios de vegetación y uso de suelo allí prevalecerán los pastizales en zonas con fuertes pendientes. Estas magnitudes elevadas son de suma importancia, pues debe considerarse que son valores estimados tan solo en 4 horas máximo; sin embargo, son periodos de retorno que se pueden presentar cada 10, 25 y 50 años, con distintas intensidades que pueden afectar de manera significativa el grado de erosión, a pesar de la recuperación en la vegetación.

De acuerdo con Gleick (1989), los cambios climáticos tienen importantes efectos sobre el balance hídrico, pues los gases de efecto invernadero tienen impactos sobre el equilibrio de la atmosfera, lo que altera el momento y la magnitud de la escorrentía y la humedad de suelos, los niveles en los lagos, la calidad del agua y, por consiguiente, la producción de sedimentos. Estos cambios conllevan problemáticas ambientales y socioeconómicas que se deben considerar en futuros planes de manejo de cuencas, por lo que en diversas regiones se han realizado estudios bajo distintos escenarios en la variabilidad climática y/o vegetación y uso de suelo (Fonseca et al. (2011); Henríquez et al. (2006); Qi et al. (2009); Yuan et al. (2015)) con resultados similares a los obtenidos en el presente estudio, en términos de incrementos en la escorrentía con dependencia de la variabilidad en la lluvia.

En la mayoría de los casos de estudio donde se empleó el modelo SWAT o KINEROS2 se han obtenido resultados satisfactorios (Ramírez, 2015; Torres et al., 2004). Los modelos hidrológicos son una herramienta para la implementación de

planes de manejo en cuencas. AGWA es una herramienta accesible y gratuita que contiene bases de datos que apoyan el ingreso de los parámetros de entrada que requieren SWAT y KINEROS2, lo que disminuye el costo para la integración de las variables de entrada y garantiza su eficiencia.

A partir de las aproximaciones espaciales de escorrentía y sedimentos en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán se abre una oportunidad para el manejo ambiental actual y futuro que contribuya a la disminución de erosión hídrica en la región. Con esto es posible priorizar las Unidades de Respuesta Hidrológica en las que se presenta mayor escorrentía y erosión, es decir, donde se conjuntan áreas con uso de suelo agrícola en pendientes pronunciadas y eventos de precipitación intensa. Así, es importante recordar que las acciones que se lleven a cabo en las partes altas se verán reflejadas en las partes más bajas de la subcuenca (Cotler et al., 2009), pues son en las partes altas donde pueden ocurrir remoción de masas, desbordamientos e inundaciones, además de los problemas ecológicos, ambientales y económicos que representa la erosión hídrica.

El manejo ambiental requiere de un conocimiento en el funcionamiento de la cuenca, por lo que se deben identificar y analizar las causas que producen los procesos de degradación (erosión, disponibilidad de agua, pérdida de vegetación), con el fin de priorizar zonas críticas. Una forma de alcanzar esto es mediante el manejo de las zonas funcionales de una cuenca: cabecera, captación-transporte y emisión. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán se contribuye en la delimitación de zonas prioritarias para la elaboración de programas de manejo y restauración, que controlen y disminuyan la erosión hídrica en la subcuenca.

6. CONCLUSIONES

Dentro de la subcuenca la escorrentía y la erosión representan un problema ambiental, pues se tienen índices de erosión muy altos, debido al uso del suelo agrícola y de pastizal en zonas con pendientes abruptas, en una región donde se tienen precipitaciones que oscilan alrededor de los 3000 mm. De continuar con la tendencia histórica identificada en el cambio de uso de suelo, se podría esperar que en el futuro los valores en escorrentía y erosión alcancen los valores máximos anuales en un tiempo de 2 h de duración de las tormentas.

El modelo SWAT permitió modelar de manera aceptable la escorrentía en la subcuenca Huichihuayán-Huehuetlán, lo que explicó entre el 88 y 91% de la variabilidad en el gasto.

Tanto el modelo hidrológico SWAT como KINEROS2, determinan el balance hídrico y la disponibilidad de agua en la región, mismos que sirven como herramienta para la planificación y manejo de cuencas tanto instrumentadas como no instrumentadas.

El uso de modelos espaciales da una aproximación a las condiciones reales de un sistema hidrológico; además de poder efectuar proyecciones a futuro basadas en la modificación de alguna variable del sistema. Sin embargo, para poder validar los resultados de estos modelos es necesario contar con datos reales, suficientes y continuos, ésta es una limitante parcial pues en algunas cuencas no se cuentan con las mediciones suficientes o incluso son inexistentes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M. I., Wiegand, T., Azócar, G. D., Wiegand, K., y Vega, C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*, 12(1), 13.
- Almorox, A. J., López, B. F., y Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. métodos de estimación* (Vol. 4): Editum.
- Alvarado, C. M., Colmenero, R. J. A., y Valderrábano, A. M. d. I. L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317-326.
- Aparicio, M. F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. *Editorial Limusa, México*.
- Aranda, D. F. C. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*: UASLP.
- Avwunudiogba, A. (2012). Soil erosion and geomorphic sensitivity under slash-and-burn agricultural systems, Sierra Madre Oriental, Eastern Mexico.
- Avwunudiogba, A. (2012). *Soil erosion and geomorphic sensitivity under slash-and-burn agricultural systems, Sierra Madre Oriental, Eastern Mexico*.
- Basayigit, L., y Dinc, U. (2010). Prediction of soil loss in lake watershed using GIS: a case study of Egirdir Lake, Turkey. *Journal of Natural and Environmental Sciences*, 1(1), 1-11.
- Becerra, M. A. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*: Universidad Autónoma Chapingo.
- Belmonte, S. F., Romero, D. M. A., y López, B. F. (1999). Efectos sobre la cubierta vegetal, la escorrentía y la erosión del suelo, de la alternancia cultivo-abandono en parcelas experimentales. *Investigaciones geográficas*, 22, 95-107.

- Benavides, S. J. d. D., González, G. M. d. J., López, P. C., y Valdez, L. J. R. (2008). Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales. *Madera y bosques*, 14(2), 05-28.
- Bocco, G., Mendoza, M., y Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, 18-36.
- Braud, I., Fernandez, P., y Bouraoui, F. (1999). Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. *Journal of Hydrology*, 216(3), 155-171.
- Bravo, E. M., Mendoza, C. M. E., y Medina, O. L. E. (2009). Escenarios de erosión bajo diferentes manejos agrícolas en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Investigaciones geográficas*, 73-84.
- Caciano, R. T., Rodríguez, J. M., Navarrete, J. B., y Cohen, I. S. (2007). CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO SEXTIN EN DURANGO, MEXICO SWAT: CALIBRATION AND VALIDATION ON SEXTIN RIVER WATER-SHED IN DURANGO, MEXICO. *chapingo*, 6, 91-101.
- Cerda, J., y Villarroel del, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 54-58.
- CONANP. (2007). Protocolo para la evaluación del Uso del Suelo y Vegetación en Áreas Naturales Protegidas Federales de México. *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D. F.*, 56.
- CONAPO. (2010). Índice de marginación por localidad 2010. *Consejo Nacional de Población*.
- Cotler, H., y Caire, G. (2009). *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*. México, D.F.
- Cotler, H., López, C., y Martínez-Trinidad, S. (2007). ¿ Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. 13 pp.
- Chai, T., y Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250.
- De Metauco, A. I. G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(38), 311-330.
- Descroix, L., Viramontes, D., Anaya, E., Barral, H., Plenecassagne, A., Luis, J., . . . Macias, L. (2004). Agua amenazada por la degradación de los recursos vegetales. *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México*, 195-210.
- FAO, I. G. d. T. W. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. *Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*(103).
- Figuerola, J. M. L., Ibáñez, C. L. A., Arteaga, R. R., Arellano, M. J. L., y Vázquez, P. M. (2011). Cambio de uso de suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45, 531-544.
- Fonseca, D. M., Mello, C. R. d., y Naghettini, M. (2011). Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. *Cerne*, 17(4), 481-488.
- Fuentes, J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. *INECOL. Publicación especial*.
- García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana).
- Garrido, A., Pérez, J., & Enríquez, C. (2010). Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización. Instituto de Ecología de México Press, México*, 14-17.

- Gaspari, y Bruno, J. (2003). Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *Ecología austral*, 13, 109-120.
- Gaspari, Delgado, M., y Denegri, G. (2009). Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 43-51.
- Gleick, P. H. (1989). Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*, 27(3), 329-344.
- Grey, O. P., Webber, D. F. S. G., Setegn, S. G., y Melesse, A. M. (2014). Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT Model) on a small tropical island (Great River Watershed, Jamaica) as a tool in Integrated Watershed and Coastal Zone Management. *Revista de Biología Tropical*, 62, 293-305.
- Guo, H., Hu, Q., y Jiang, T. (2008). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 355(1), 106-122.
- Guzmán, E., Bonini, J., y Matamoros, D. (2004). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica Caso de estudio: Cuenca del Río Chaguana. *Revista Tecnológica*, 17(1).
- Henríquez, C., y Azócar, G. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 61-74.
- Hibbert, A. R. (1965). *Forest treatment effects on water yield*: Citeseer.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I., y Barrera, F. (2001). Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. *Cien. Inv. Agr*, 28(1), 7-14.
- Hooke, J., y Sandercock, P. (2017). *Combating Desertification and Land Degradation: Spatial Strategies Using Vegetation*: Springer.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo*: Reverte.
- Huerta, F. P., y Loli, F. O. (2014). Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche. *Ecología Aplicada*, 13, 15-22.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011). Métodos para la determinación del tiempo de concentración (Tc) de una cuenca hidrográfica: Universidad Politécnica de Valencia. Pág.
- INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I (Subprovincias fisiográficas). *Página Web*: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>.
- INEGI. (2002). Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. (1 ed., pp. 136): Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2002). Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México*.
- INEGI. (2004). Guía para la interpretación de cartografía Edafología., 27.
- INEGI. (2014). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y de vegetación: Escala 1: 250 000 : serie V*: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Kraemer, F. B., Chagas, C. I., Vázquez Amábile, G., Palacín, E. A., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., y Massobrio, M. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Cien. Suelo*, 29, 75-82.
- Leon, L. F. (2009). MapWindow interface for SWAT (MWSWAT). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Application. WASWAC Special Publ*, 4.

- Li, Z., Liu, W.-z., Zhang, X.-c., y Zheng, F.-l. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377(1), 35-42.
- López, V. M., Poesen, J., Navas, A., y Gaspar, L. (2013). Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*, 102, 62-73.
- Lugo-Hubp, J. (1990). El relieve de la República Mexicana. *Boletín del Instituto de Geología*, 9(1), 82-111.
- Mas, J. F., Sorani, V., y Alvarez, R. (1996). ELABORACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DEFORESTACIÓN Investigaciones Geográficas (Mx), octubre, especial 5 Universidad Nacional Autónoma de México Distrito Federal, México.
- Maya, Y. (2011). Diagnóstico ambiental de suelos erosionados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 169-179.
- Méndez, G. J., Návar, C. J. d. J., y González, O. V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones geográficas*(65), 38-55.
- Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., y Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, 92-117.
- Morgan, R. P. C. (2009). *Soil erosion and conservation*: John Wiley & Sons.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Niehoff, D., Fritsch, U., y Bronstert, A. (2002). Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, 267(1), 80-93.
- Ortiz, R. A., Mendoza, C. M., y Bravo, E. M. (2010). Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la Cuenca del lago de Cuitzeo. *Instituto Nacional de Ecología: Distrito Federal, México*.
- Pando, M. M., Gutiérrez, G. M., Maldonado, H. A., Palacio, P. J. L., y Estrada, C. A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones geográficas*, 23-36.
- Pérez, M. O., Delfín, A. C. A., Fregoso, A., Avalos, H. C., y Zamora, M. E. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta ecológica*(78), 47-66.
- PRADO, W. L. d., y VEIGA, M. d. (1993). Erosión de suelos en America Latina Tema 2 : Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm#Tema%20%20:%20Erosi%C3%B3n%20y%20p%C3%A9rdida%20de%20fertilidad%20del%20Suelo>
- Qi, C., y Grunwald, S. (2005). GIS-based hydrologic modeling in the Sandusky watershed using SWAT. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 169-180.
- Qi, S., Sun, G., Wang, Y., McNulty, S., y Myers, J. M. (2009). Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. *Transactions of the ASABE*, 52(3), 739-749.
- Ramírez, C. H. (2015). Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del pacífico sur.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., y Porter, J. P. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33.

- Rivera, T. F., Pérez, N. S., Ibáñez, C. L. A., y Hernández, S. F. R. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46, 101-105.
- Salas, A. V., Pinedo, Á. C., Viramontes, O. O. A., Báez, G. A. D., y Quintana, M. R. (2011). Morfometría de la cuenca del río Nazas-Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(1), 34-42.
- Salas, M. R., Ibáñez, C. L. A., Arteaga, R. R., Martínez, M. M. R., y Fernández, R. D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1), 1-15.
- Sánchez, C. I., Bueno, H. P., Esquivel, A. G., y Velásquez, V. M. A. (2014). Simulación de procesos hidrológicos en cuencas poco instrumentadas.
- Sandoval, B. F. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión.
- Santacruz, L. (2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del Río Cahoacán, Chiapas, México. *Chiapas, México. Rev. Agua-LAC*, 3(1), 45-54.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., y Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.
- Schuol, J., y Abbaspour, K. (2006). Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Advances in geosciences*, 9, 137-143.
- SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/index.html
- SEMARNAT. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. (pp. 31).
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., Duan, Z., y Ling, L. (2015). Impacts of land-use and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 873-889.
- Tayupanta, J. R. (1993). *La erosión hídrica: proceso, factores y formas*: INIAP Archivo Historico.
- Torres, B. E., Fernández, R. D., Oropeza, M. J. L., y Mejía, S. E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca " El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437-444.
- Torres, B. E., Mejía, S. E., Cortés, B. J., Palacios, V. E., y Exebio, G. A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México.
- Uri, N. D., y Lewis, J. A. (1998). The dynamics of soil erosion in US agriculture. *Science of the total environment*, 218(1), 45-58.
- Uribe, G. S., Francisco, N. N., y Turrent, F. A. (2002). Pérdida de suelo y nutrientes en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia*, 36(2), 161-168.
- Vázquez, A. V. (1986). La erosión y conservación del suelo en México. Realidades y perspectivas. *Terra*, 4(2), 158-172.
- Vega, M. A. C., Quines, V. C., y Guevara, E. (2015). Validación de modelos del proceso lluvia-escurrentía. *Revista INGENIERÍA UC*, 22(3), 89-104.
- Velázquez, A., Mas, J., Gallegos, J. R. D., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., . . . Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*(62), 21-37.
- Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*.
- Yuan, Z., Chu, Y., y Shen, Y. (2015). Simulation of surface runoff and sediment yield under different land-use in a Taihang Mountains watershed, North China. *Soil and Tillage Research*, 153, 7-19.

Zhang, X., Srinivasan, R., y Hao, E. (2007). Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 901-910.

ANEXOS

Anexo 1

Nombre:

Localidad:

1. ¿Qué tipo de vegetación predomina en el área? (en base a la imagen de google Earth impresa)
2. ¿Ha observado algún tipo de erosión en la zona o en parcelas? (imágenes de erosión)



3. Si ha observado algún tipo de erosión ¿en qué zonas de la cuenca lo ha observado?
4. Si ha observado erosión ¿en qué tipos de vegetación o uso del suelo?
5. ¿Le afecta la erosión en su productividad agrícola, citrícola o ganadera?
6. Desde que recuerda, ¿ha aumentado o disminuido la erosión en la zona?
7. ¿Llevan a cabo acciones para proteger el suelo?

