



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

LA COBERTURA VEGETAL Y SU RELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, EN UNA ZONA FORESTAL

DANIEL CASTILLO GARCÍA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **LA COBERTURA VEGETAL Y SU RELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, EN UNA ZONA FORESTAL**, realizada por el estudiante: **DANIEL CASTILLO GARCÍA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


Dra. Antonia Macedo Cruz

ASESOR


Dr. Martín A. Bolaños González

ASESOR


M.C. Angelica Yuridia Villegas Romero

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, julio de 2022

LA COBERTURA VEGETAL Y SU RELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, EN UNA ZONA FORESTAL

Daniel Castillo García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo dentro de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), área perteneciente al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, estableciendo lotes de escurrimiento bajo seis coberturas arbóreas diferentes, bosque de coníferas mixto, bosque de oyamel, bosque de aile, pastizal, pino con alto porcentaje de cobertura arbórea, y pino con bajo porcentaje de cobertura arbórea; con el fin de evaluar la influencia de las características del suelo, tipo de dosel forestal y porcentaje de cobertura herbácea, sobre la producción de escurrimientos y la generación de sedimentos en cada evento de lluvia en el periodo de lluvias durante el otoño de 2020. Se observó que la precipitación y el escurrimiento tienen una relación significativa en cada uno de los tipos de vegetación, el mejor ajuste lineal se encontró con las variables de precipitación y escurrimiento en la vegetación de pastizal, cuyo coeficiente de correlación fue de 0.90. Existe una correlación significativa ($P < 0.05$) entre el escurrimiento y los sólidos totales disueltos en la cobertura arbórea de bosque mixto de coníferas, pastizal, asociadas a densidades aparentes del suelo de $0.79 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ para conífera y $0.74 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ para pastizal, ambos considerados como texturas francas. La relación entre el escurrimiento y la intensidad de lluvia fue significativa para la cobertura de bosque mixto de coníferas y bosque de oyamel. Solo en pastizal se observó una relación directamente proporcional entre los sólidos totales disueltos y la intensidad y cantidad de precipitación; donde se observó que a mayor intensidad y a mayor precipitación de lluvia hay menor arrastre de sedimentos.

Palabras clave: erosión, coníferas, correlación significativa, intensidad de lluvia.

LAND COVER AND ITS RELATIONSHIP WITH THE RUNOFF COEFFICIENT AND SEDIMENT PRODUCTION, IN A FORESTRY AREA

Daniel Castillo García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The present work was carried out within the Estacion Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), an area belonging to the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park, establishing runoff plots under six different tree covers, mixed coniferous forest, fir forest, aile forest, grassland, pine forest with a high percentage of tree cover, and pine with a low percentage of tree cover. In order to evaluate the influence of soil characteristics, type of forest canopy and percentage of herbaceous cover, on runoff production and sediment generation in each rainfall event in the autumn rainy season of 2020. It was observed that precipitation and runoff have a significant relationship in each arborea covert. The best linear association was with the variables of precipitation and runoff, whose correlation coefficient was 0.90. There is a significant correlation ($P < 0.05$) between runoff and total dissolved solids in the tree cover of coniferous forests, grasslands, associated with bulk densities of $0.79 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ for coniferous textures and $0.74 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ and loam. The relationship between runoff and rainfall intensity was significant for the mixed coniferous and fir forest cover. Only in the grasslands was a direct relationship between total dissolved solids and precipitation observed, as well as in relation to the intensity of the rain, where it is observed that the greater the intensity and the greater the precipitation, the less sediment drag.

Key words: erosion, conifers, rainfall intensity, significant correlation.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el financiamiento para el desarrollo de la investigación

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo por abrirme las puertas y permitirme crecer más profesionalmente y a mi posgrado Hidrociencias por brindarme el aprendizaje y adquirir más conocimiento.

Al DR. ISIDRO VILLEGAS ROMERO

Al Consejo Particular, por su dirección y asesoría constante durante la investigación

CONSEJERA: DRA. ANTONIA MACEDO CRUZ

ASESOR: DR. MARTIN BOLAÑOS GONZALEZ

ASESOR: MC. ANGELICA YURIDIA VILLEGAS MACEDO

Al personal encargado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) perteneciente al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, por las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo de campo.

Al personal de los laboratorios de RASPA y de Ciencias Ambientales de Hidrociencias.

DEDICATORIAS

Al Dr. Isidro Villegas Romero por ser una persona con muchos proyectos en mente y seguir sus ideales a pesar de todas las piedras que hubo en el camino siempre fue una persona con aspiraciones y entusiasmo de enseñar, gracias a él se inició esta investigación.

A mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han dado en cada paso de mi vida.

A mi esposa e hijos por siempre estar a mi lado, en todos los buenos y malos momentos que hemos pasado juntos.

A mi amigo Sergio Morales Salazar por ser un hombro y oído con el que siempre he contado.

*No hay buenos vientos, ni buenos mares, para
quien no sabe que rumbo tomar...*

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIAS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xii
1 INTRODUCCION	1
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1 Objetivo General	4
2.2 Objetivo Especifico.....	4
2.3 Hipótesis	4
3 REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ)	5
3.2 La cobertura arbórea y herbácea en el balance hidrológico	9
3.3 Clasificación de la cobertura vegetal.....	11
3.4 La intensidad de lluvia.....	11
3.5 Definición de Escurrimiento Superficial	12
3.6 Métodos de cálculo del coeficiente de escurrimiento	13
3.7 Propiedades físicas y químicas del suelo	15
4 MATERIALES Y METODOS.....	16
4.1 Clasificación de la cobertura vegetal.....	18
4.2 Justificación del número de lotes de escurrimiento	19
4.3 Recolección de datos de precipitación.....	20
4.4 Mantenimiento de lotes de escurrimiento.....	21
4.5 Toma de datos de escurrimiento y sedimento.....	23
4.6 Muestreo edafológico.....	24
4.7 Análisis de laboratorio	25
4.8 Cálculo de intensidad de lluvia.....	36
4.9 Cálculo del Coeficiente de Escurrimiento.....	36
4.10 Análisis de datos	37

5	RESULTADOS	39
5.1	Coeficiente de escurrimiento.....	39
5.2	Tipo de vegetación, Cobertura herbácea y Escurrimiento	40
5.3	Relación entre lluvia y escurrimiento.....	50
5.4	Caracterización del suelo	54
6	CONCLUSIONES	59
7	LITERATURA CITADA	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de las estaciones meteorológicas y distribución de lotes de muestreo en cada tipo de cobertura.....	17
Figura 2 Estación meteorológica automática	20
Figura 3 Mantenimiento de lotes de muestreo, para su funcionamiento.	22
Figura 4 Recolección de muestras de escurrimiento.....	24
Figura 5 Distribución de muestreo de suelo	25
Figura 6 Extracción de la muestra de suelo	25
Figura 7 Preparación de mezclas para medición	26
Figura 8 Medición de pH de las muestras de escurrimiento.....	27
Figura 9 Lavado, Secado y Pesado de las capsulas de porcelana	28
Figura 10 Muestra de Sedimentos y Evaporación de Escurrimientos.	28
Figura 11 Agitando la mezcla durante un minuto.	29
Figura 12 Toma de lectura de datos con ayuda del Hidrómetro.....	29
Figura 13 Pesado de la muestra de suelo.....	30
Figura 14 Compactación de la muestra.....	30
Figura 15 Platos de Porcelana para la evaluación de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.....	31
Figura 16 Aplicación de presión atmosférica.....	32
Figura 17 Secado de las muestras cuando están en equilibrio	32
Figura 18 Pesado y preparado de la mezcla.....	33
Figura 20 Pesado y agregado de Dicromato de Potasio	34
Figura 19 Lectura de pH para cada muestra de suelo	34
Figura 21. Agregado de ácido sulfúrico.....	35
Figura 22 Proceso de titulación.....	35
Figura 23 Resultados de titulación con sulfato ferroso.....	36
Figura 24 Comportamiento del escurrimiento y de la precipitación (evaluada con la estación meteorológica automática) en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (•) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la	

regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo); *:0.5 (significativo).	45
Figura 25. Comportamiento del escurrimiento y de la producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo).....	46
Figura 26 Comportamiento de la intensidad de lluvia en 0.5 h y el escurrimiento en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo).....	47
Figura 27 Comportamiento de la intensidad de lluvia en 0.5 h y producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo).....	48
Figura 28 Comportamiento de la precipitación y producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Dónde:**:0.01 (altamente significativo).	49
Figura 29 Comportamiento de la cobertura herbácea y las variables de: escurrimiento (A), sólidos totales disueltos (STD) (B), pH (C), densidad aparente (D), materia orgánica (E) de los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México. Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple.	50

Figura 30 Comportamiento del escurrimiento (mm) por tipo de vegetación durante el periodo del 01 de septiembre al 09 de octubre de 2020, en la estación experimental Zoquiapan, México.....	52
Figura 31 Volumen de escurrimiento (m ³) registrado en los lotes de escurrimiento establecidos por tipo de vegetación de la estación experimental Zoquiapan, México. Letras iguales no son significativamente diferentes (Prueba de Kruskal-Wallis, $P < 0.05$). Dónde: conífera (BC), oyamel (BO), aile (BA), pastizal (BP), pino con alto porcentaje de cobertura (BPA) y pino con bajo porcentaje de cobertura (BPB).	58

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Tipo de vegetación de los lotes de escurrimiento	18
Cuadro 2 Coordenadas geográficas de la estación meteorológica.	21
Cuadro 3. Tipo de vegetación, identificador y porcentaje de cobertura herbácea en cada lote de escurrimiento.	23
Cuadro 4 Análisis de muestras de laboratorio.....	26
Cuadro 5. Valores del coeficiente de escurrimiento calculados por cobertura arbórea.....	39
Cuadro 6 Caracterización general de los lotes de escurrimiento	40
Cuadro 7 Valores observados de precipitación con la estación meteorológica automática (PMA), en la estación experimental Zoquiapan, México.....	51
Cuadro 8 Matriz de correlación entre las variables de precipitación (PMA, evaluada con la estación meteorológica automática), escurrimiento (ESC), pH y sólidos totales disueltos (STD) de los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México.....	53
Cuadro 9 Estadísticos básicos de las propiedades físicas y químicas de los suelos que presentan los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México.....	56

1 INTRODUCCION

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes, del cual dependen múltiples actividades de desarrollo (George *et al.*, 2016). La cobertura edáfica y las conversiones del uso del suelo se deben a las actividades socioeconómicas, que conducen a cambios en aspectos biofísicos y en factores ambientales (Overmars *et al.*, 2005). Los movimientos en masa y los procesos de erosión, por ejemplo, el escurrimiento y la producción de sedimentos, se enmarcan en ambientes dinámicos, donde los suelos y las coberturas vegetales evolucionan a partir de las exigencias impuestas por el medio (Obregón y Lara, 2013).

La distribución de las coberturas vegetales, así como la producción de sedimentos, depende de las relaciones existentes entre características edáficas, climáticas de la región y las características intrínsecas de las especies vegetales (Sosa *et al.*, 2006). Los estudios relacionados con los cambios progresivos en la cobertura vegetal y de uso de suelo, han cobrado importancia en la investigación ambiental, ya que han permitido evaluar las tendencias espacio-temporales de procesos como la deforestación y degradación ambiental, provocadas por actividades humanas (Osuna-Osuna *et al.*, 2015).

El impacto de las gotas de lluvia sobre diferentes superficies ocasiona un cambio en comportamiento del escurrimiento superficial. Por otra parte, la interceptación de la lluvia por el dosel del cultivo u otra cubierta vegetal también reduce el escurrimiento superficial (Bingner *et al.*, 1992, citado por Vallejo *et al.*, 2010). La cobertura vegetal provee de varios servicios ambientales a la población, entre ellos se destacan la belleza paisajística dada por la gran diversidad de flora y fauna, variedad de formas geológicas que lo hacen atractivo como lugar de esparcimiento y recreación (Aguirre-Padilla, 2018).

El escurrimiento y la producción de sedimentos sufren modificaciones a lo largo del año en función de la estacionalidad de las tormentas y de la variación en el uso del suelo (Ares, 2014). El uso de las coberturas vegetales es sumamente importante ya que reducen la erosión del suelo, sobre todo en terrenos de fuertes pendientes (Loch, 2000). La magnitud del proceso erosivo del suelo, menciona Santacruz (2011), se incrementa

por efecto de los cambios de uso de suelo, reconociendo el papel clave que juega la cobertura vegetal en el proceso erosivo de la lluvia; en bosques este cambio se estima hasta 9 veces sobre el 100% en incremento sobre la pérdida natural de suelo, la que se puede reducir hasta 60% mediante buenas prácticas y obras de conservación (Huerta-Olague et al., 2018). Las medidas correctivas de los movimientos en masa y los procesos de erosión se enmarcan en ambientes dinámicos, donde los suelos y las coberturas vegetales evolucionan a partir de las exigencias edafoclimáticas.

Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la generación de escurrimientos y la producción de sedimentos, en eventos de lluvia de diferente intensidad, en zonas forestales, con relación al tipo de cobertura vegetal y las características físicas y químicas del suelo. Es importante mencionar que una de las tareas básicas fue la búsqueda de una relación simple entre la precipitación y el escurrimiento, ya que el escurrimiento es un factor determinante en el proceso de erosión hídrica. La diferencia entre los escurrimientos superficiales y la precipitación está sujeta a la capacidad de intercepción de la vegetación (López-Lambraño et al. 2017).

La mejor forma de evitar la degradación y erosión de los suelos es la conservación, restitución o aumento de la cubierta vegetal. La vegetación tiene una función decisiva en la generación, protección y conservación del suelo, permitiendo la fijación del suelo, el descenso de la evaporación de la superficie del suelo, el aumento del contenido de materia orgánica, etc. Además, la cubierta vegetal tiene otros efectos que se derivan dentro del ciclo hidrológico (Serrato et al., 1999), la cantidad y distribución de precipitación y, por tanto, en relación con las características particulares del suelo, influyen en la cantidad de escurrimiento superficial y la producción de sedimentos.

La consecuencia más importante de la intercepción de la lluvia por parte de la cubierta vegetal es la pérdida de recursos hídricos, que se ocasiona por efecto del almacenaje de agua en la cubierta, la cual regresa a la atmósfera por evaporación (Serrato et al., 1999). Por otro lado, no siempre el aumento de cubierta vegetal o la sustitución de una cubierta de matorral por otra arbórea, implica una disminución de los procesos erosivos. La intercepción de la lluvia por la vegetación, a parte de otros efectos, modifica la distribución espacial de la lluvia que alcanza el suelo, repercutiendo en la distribución de

la humedad edáfica (Durocher, 1990; Belmonte Serrato et al., 1996) y alterando la energía cinética de la lluvia. Gestionar el agua y el suelo ha sido importante en el transcurso de la historia de la humanidad, y en la actualidad esa importancia se remarca porque estos recursos se encuentran sometidos a fuertes presiones climáticas y/o antropogénicas (Wilkinson y McElroy, 2007).

2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo General

Evaluar la generación de escurrimientos y la producción de sedimentos, en eventos de lluvia de diferente intensidad, en zonas forestales, con relación al tipo de cobertura vegetal y las características físicas y químicas del suelo.

2.2 Objetivo Especifico

Analizar la relación lluvia-escurrimiento, bajo diferentes tipos de vegetación de bosque templado, que permita valorar la importancia hidrológica del ecosistema.

Analizar la relación escurrimiento-producción de sedimentos, bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal, para valorar su función protectora del suelo ante el proceso erosivo.

Analizar la relación entre escurrimiento y producción de sedimentos bajo diferentes porcentajes de cobertura herbácea, para determinar la influencia de esta en el proceso erosivo.

2.3 Hipótesis

La producción de escurrimientos y sedimentos tienen una relación inversamente proporcional con el tipo de vegetación y el porcentaje de cobertura del suelo.

El tipo de vegetación, el porcentaje de cobertura vegetal y las propiedades del suelo, influyen en la magnitud de la producción de escurrimientos y la producción de sedimentos.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ)

El Parque Nacional Zoquiapan está ubicado entre los límites del Estado de México y Puebla. Comprende parte de los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlamanalco, en el Estado de México; Tlahuapan y San Salvador El Verde, en el estado de Puebla. Se localiza en la región montañosa conocida como la Sierra Nevada, aproximadamente entre las coordenadas 19° 13' 10" y 19° 18' 45" de Latitud Norte y entre los meridianos 98° 37' 39" y 98° 51' 58" de Longitud Oeste. (Zavala, 1981).

La microcuenca Zoquiapan se ubica al sur de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) pertenece al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, la cual, tiene una superficie de 1,624.23 ha y se encuentra ubicada en la parte Oeste de la subcuenca del Río Atoyac – San Martín Texmelucan (94.9%) y en menor proporción en la subcuenca del Lago de Texcoco y Zumpango (5.1%). Los municipios que comprenden esta superficie son Ixtapaluca, Chalco, Tlamanalco y Tlahuapan (Melo y Oropeza, 1982). La importancia de la Estación radica en el suministro de recursos naturales para la población y forma parte importante del amortiguamiento de impactos ocasionados por el hombre y sus centros urbanos como lo es el municipio de Ixtapaluca y zonas aledañas.

Clima

Zavala (1981) reporta que el tipo de clima registrado en un período de 20 años, en la estación meteorológica de Río Frío, es: C (w"2) (w)(b') ig. C(w); clima templado, subhúmedo, con lluvias en verano, con temperatura del mes más frío inferior a 18° C, pero superior a -3°C; la precipitación del mes más húmedo, en la mitad del año en la que se encuentra el verano, es 10 veces mayor que la del mes más seco; la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y la precipitación anual es mayor que la que constituye el límite de los climas secos B y menor que el límite de los climas C(m). Esta notación C(w), así como algunas otras, son modificaciones hechas por García (1973) al Sistema de Clasificación Climática de Koppen, para adaptarlo a las condiciones de México.

C (w"2) (w)(b'): con verano fresco y largo, con temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, y temperatura del mes más caliente entre 6.5°C y 22°C.

i: Isotermal, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales menor de 5°C.

g: marcha de la temperatura tipo Ganges o gangético (el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano).

Los climas C(w) se localizan en la mayor parte de las montañas del centro y sur de México, y en la porción Sur de la Altiplanicie Mexicana en donde la precipitación orográfica aumenta en verano por los movimientos convectivos del aire y por la influencia de los ciclones tropicales. También se encuentra en las porciones Norte y Centro de la Sierra Madre Occidental y Norte de la Oriental (Blanco-Zavala, 1981).

Una característica de este tipo de clima es que abarca grandes zonas montañosas, en las cuales la temperatura y precipitación cambian en distancias relativamente cortas y producen importantes variantes climáticas en lo referente al grado de humedad.

Geología

La zona de estudio se localiza al norte de las faldas del Iztaccíhuatl; el cual, junto con el Popocatepetl, el Ajusco y Zempoala, nacen durante el origen y formación del fracturamiento Humboldt, a fines del terciario superior. De todos los afloramientos, los más abundantes del área de trabajo son los de origen volcánico. Tal es el caso de las rocas volcánicas que, en ocasiones, se encuentran fuertemente intemperizadas y erosionadas, y los derrames lávicos (basaltos y andesitas) que predominan por su gran extensión. La andesita Iztaccíhuatl es la roca más abundante de todo el Parque Zoquiapan. Los depósitos de talud y conos aluviales representan los materiales más jóvenes del área. El Papayo es un representante de la formación que constituye el derrame del Chichinautzin, que es uno de los cuellos volcánicos por donde se efectuaron las emisiones de lava. Procesos tectónicos, fenómenos volcánicos, glaciaciones, conos aluviales, taludes y erosión por corrientes de agua, produjeron las geoformas que predominan actualmente en el área (Meritano, 1975).

Edafología

La clase de suelo dominante se deriva de erupciones volcánicas, que se denomina suelo andosol o “polvillo” (INEGI, 2000). Tiene características especiales si se compara con otros suelos, como ser rico en materia orgánica, muy ácido, retener el fósforo por el alófono, muy suelto, muy permeable y frágil, y con alta capacidad de retención de agua (Paredes et al., 2003).

Estos suelos evitan tasas elevadas de erosión por la alta capacidad de retención de agua que presenta; sin embargo, se observa que son productoras de sedimentos y contaminantes cuando los suelos están desprovistos de vegetación. Viramontes et al. (2006) determinaron que los suelos andosoles son resistentes a la erosión cuando no son perturbados por la preparación del suelo, pero pueden llegar a ser muy frágiles en condiciones de degradación.

Los suelos de la Estación Zoquiapan, fueron clasificados como Andosoles móllicos (Rey, 1975). Este mismo autor también realizó un levantamiento a nivel descriptivo, en donde utilizó términos geomorfológicos, describiendo principalmente dos tipos de suelos: suelos sobre circo glacial en embudo (CE) y suelos sobre meseta volcánica (MV).

Suelos sobre Circo Glacial en Embudo (CE). Estos suelos se encuentran en la parte Sur de la Estación Zoquiapan; presentando un relieve fuertemente inclinado. Su drenaje se cataloga de moderadamente bien drenado y su profundidad va hasta 100 cm sin impedimento para las raíces. Son suelos derivados de cenizas volcánicas, sobre las cuales la acción climática y la vegetación han influido para dar origen a dos perfiles de suelo bien diferenciados: uno sustenta vegetación de pino (*Pinus* sp.) principalmente, y otro oyamel (*Abies* sp.).

Suelos sobre Meseta Volcánica (M.V). Estos suelos se presentan en la parte norte. El relieve es fuertemente inclinado, son suelos profundos y moderadamente bien drenados. Estos suelos, asimismo se derivan de cenizas volcánicas a las cuales los factores clima y vegetación les han conferido una evolución poco avanzada.

De acuerdo con Lomas et al. (2005), la clasificación de los tipos de suelo, se establece como suelo de tipo Andosol. En la parte superior de la microcuenca existe una diferenciación en los horizontes secundarios, que ocasiona en parte, la distribución de pastizal como tipo de vegetación principal.

En resumen, los suelos de Zoquiapan tienen una buena aireación; buen drenaje; consistencia friable y ligeramente pegajosos; pH cercano a la neutralidad; buena disponibilidad de nutrientes; contenido de materia orgánica que disminuye con la profundidad; buena retención de humedad; ambiente favorable para microorganismos; buena disponibilidad de nitrógeno y baja concentración de fósforo en forma asimilable.

Flora

El área en su totalidad se encuentra establecida como ANP de la Región Centro y Eje Neovolcánico por medio de la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) como zona de conservación de recursos forestales. A lo que corresponde a la vegetación dentro de la Estación, la clasificación más utilizada es la de Miranda y Hernández X. (1963). Las zonas dominadas por los árboles quedan bajo la denominación de pinares y bosque de abetos, y la zona dominada por plantas herbáceas es denominada como pastizal. Los pinares se encuentran generalmente en lugares con suelo poco profundo y poca humedad. Por arriba de los 3,500 m, cuando no existe bosque de abeto u oyamel (*Abies religiosa*). En los lugares sin pendiente, en donde hay un drenaje deficiente, se presentan los pastizales.

La vegetación está caracterizada principalmente por los llamados bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión y que de acuerdo con Leuseor, 1945 y Little, 1962; citados por Rzedowski (1978), los pinares de *P. hartwegii*, *P. ayacahuite* y *P. pseudostrobus* representan comunidades clímax. El bosque de *Abies* tiene su origen a partir de la biota que arribó por el lado norte del país. El bosque de *Alnus firmifolia* o de *Aile* constituye una etapa sucesional para *Pinus* y principalmente *Abies religiosa* y presenta ocasionalmente *Salix oxylepis*, *Arbutus glandulosa* y *Buddleia parviflora*. En cuanto a los pastizales como estrato herbáceo existen especies de *Muhlenbergia quadridentata*, *M. macroura*, *Festuca tolucensis*, *F. hephaestophila*, y *Lupinus* spp., entre

otras especies (Zavala, 1984). Su desarrollo suele presentarse en las cimas de las cumbres más altas, los que son comunidades producto de una perturbación en el bosque original llamados pastizales antropógenos y forman parte del proceso de sucesión, y los que se encuentran en los valles donde las inundaciones son periódicas debido a una deficiencia en el drenaje (Lomas et al., 2005).

3.2 La cobertura arbórea y herbácea en el balance hidrológico

Las medidas correctivas de los movimientos en masa y los procesos de erosión se enmarcan en ambientes dinámicos, donde los suelos y las coberturas vegetales evolucionan a partir de las exigencias impuestas por los tratamientos. Los cambios que sufre el suelo por intemperismo debido al secado excesivo, y la ausencia de recursos para la vegetación (agua, nutrientes, espacio, carencia de materia orgánica), son factores que dificultan el arraigo, el establecimiento y el crecimiento de la vegetación (Velázquez et al., 2001).

El impacto de las gotas de lluvia sobre diferentes superficies ocasiona un cambio en comportamiento del escurrimiento superficial. La intercepción de la lluvia por el dosel del cultivo u otra cubierta vegetal también reduce el flujo superficial (Bingner et al., 1992). La cobertura vegetal provee de varios servicios ambientales a la población. Entre ellos se destacan la belleza paisajística dada por la gran diversidad de flora y fauna, variedad de formas geológicas que lo hacen atractivo como lugar de esparcimiento y recreación. A su vez la vegetación forma parte del hábitat de varias especies que allí se reproducen y desarrollan o lo utilizan durante la migración. Además, evita la erosión y pérdida de suelo e incrementa la infiltración, siendo todo el sistema un importante regulador de flujos de aguas superficiales disminuyendo la escorrentía que afecta a la urbanización ubicada aguas abajo (Vich et al., 2012).

Kirkby (2002), señala que las escorrentías y erosión procedentes de buenos pastizales o de bosques son pequeñas, a menudo representan menos del 5 y del 1%, de las pérdidas en un suelo desnudo. Indica que las escorrentías y la erosión aumentan rápidamente sobre suelos con menos del 70 % de cubierta vegetal, menciona que las pendientes rara vez están totalmente desprovistas de vegetación a menos que la tierra

sea de labranza excepto en las regiones áridas; la tierra desnuda y arable es la más susceptible a la erosión hídrica y se pueden perder grandes cantidades de suelo con una tormenta o durante una estación lluviosa.

Blanco y Leyva (2007), mencionan que la densidad de plantas, la etapa de crecimiento de cada cultivo y el nivel de fertilidad del suelo influyen en la escorrentía y la erosión del suelo. Ríos et al. (2007), señalan que las probabilidades de erosión son mayores en una cubierta de cultivos, con respecto a las praderas y bosques, a consecuencia de la preparación del terreno para siembra, lo cual hace que se disgregue fácilmente las partículas. Urbano (1997), indica que la eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, sobre todo, de la altura y continuidad de la vegetación, y de la densidad de cobertura del suelo.

Lima (2003), menciona que generalmente se acepta que la vegetación debería cubrir por lo menos el 70 % de la superficie del terreno para dar una protección adecuada contra la erosión. Morgan (1997), indica que la cobertura vegetal actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Benefius citado por Tito (1996), señala que probó que la cubierta vegetal juega un papel regulador fundamental dentro de un sistema hidráulico, en la pérdida de suelo y la consiguiente disminución del poder de retención de agua pluvial.

Salm, citado por Miranda (1995), indica que las plantas retienen el material transportado por el viento y el agua, presentando los lugares sin vegetación una fuerte erosión hídrica y eólica como consecuencia de los fuertes vientos del altiplano. Lima (2003), menciona que las plantas gracias a su transpiración secan el suelo y, por lo tanto, este puede volver a almacenar mayores volúmenes de agua de lluvia y evitar la formación de volúmenes considerables de agua sobrantes. Lozano (1984), señala que la finalidad de la vegetación es doble; en primer lugar, ofrece al suelo una protección física frente a la escorrentía, pero también reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del canal y por ello disminuye la capacidad erosiva de aquella.

3.3 Clasificación de la cobertura vegetal

De acuerdo con Rzedowski (2006) dentro de la microcuenca la vegetación que se encuentra es el bosque templado de coníferas, donde podemos encontrar principalmente la especie de *Pinus hartwegii*. El bosque de pino se diferencia en la zona por la densidad en que sus individuos se desarrollan; en la parte baja de la zona, los árboles se encuentran aislados y sin presencia de coberturas herbáceas importantes. Al aumentar la altitud, la disposición de renuevo clasifica estas superficies como de densidad alta, pero sin llegar a tener un buen crecimiento en diámetro y altura. El bosque de *Abies religiosa* se desarrolla en la parte media de la microcuenca, localizado de manera puntual en laderas con bajo porcentaje de pendiente y cercano a corrientes de agua intermitentes. De igual manera, la cobertura de *Alnus sp.*, *Quercus sp.* y pastizales se distribuyen en menor proporción en la parte media.

3.4 La intensidad de lluvia

La precipitación es un agente erosivo mediante la energía cinética ocasionada por las gotas de lluvia al impactar sobre el suelo; las cuales compactan y forman una costra incipiente, desagregan las partículas del suelo y su desplazamiento por saltación, donde se puede producir un transporte de suelo debido a la erosión por salpicadura (Hudson, 1995 & Morgan 2005 citados por Angulo 2013).

Es por esto que la erosión producida por el impacto de las gotas de lluvia se requiere conocer la cantidad de energía cinética con la que las gotas impactan, las cuales dependen de factores meteorológicos y climáticos. Además, el efecto erosivo del impacto de las gotas dependerá de las propiedades físico-químicas del suelo. Para la estimación de la erosividad de las precipitaciones se utilizan diversos modelos (Almoza et al., 2008).

Con ese objetivo, W. H. Wischmeier (1959) citado por Jordan (2000) propuso un índice de erosividad de la lluvia para ser utilizado por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), conocido como factor R. Este índice se deduce a partir del producto de la energía cinética liberada por la lluvia (E) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos (I30) de la tormenta.

Para determinar el valor de I30 se realiza a través de los datos de lluvia obtenidos de la estación automática, en el que se consideraron los primeros 30 minutos de cada evento de lluvia el cual es la máxima cantidad de lluvia. De esta precipitación total (mm) se divide entre 30 minutos.

$$i_k = \frac{(\Delta V_k)}{(\Delta t_k)} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

i_k = Intensidad de lluvia en 30 minutos

ΔV_k = Precipitación (mm) en 30 minutos

Δt_k = Intervalo de tiempo de la evaluación

3.5 Definición de Escurrimiento Superficial

El balance hídrico del suelo se basa en el principio de la conservación de la materia, siendo así que el agua que entra al suelo, conocida como precipitación, debe ser igual al agua que se almacena más el agua que sale de él (evapotranspiración y la descarga hacia los acuíferos). Los factores que influyen en el balance hídrico del suelo son parámetros meteorológicos, geográficos y geológicos (Alvarado y Barahona, 2017).

El escurrimiento superficial puede cuantificarse mediante la medición directa del flujo en estaciones de aforo, pero implica un alto costo económico, porque requiere infraestructura y demanda recursos humanos. Una estrategia viable para disminuir costos y tiempo es predecir mediante modelos de simulación, los cuales estiman con bajo sesgo, y permiten la planificación de obras para controlar los escurrimientos superficiales. Los modelos disminuyen la infraestructura para medir componentes hidrológicos, reducen la inversión económica y recursos humanos (Francisco-Nicolás et al., 2010).

Es importante mencionar que una de las tareas básicas de los modeladores ha sido la búsqueda de una relación simple entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q). De este modo, se han desarrollado diferentes modelos, entre los que destaca el número de curva

(Marin Sosa et al., 2017). El movimiento del agua en el suelo se realiza de acuerdo con sus características hidráulicas (capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, entre otras), que tienen relaciones, a su vez, con sus características físicas (estructura, textura, porosidad, contenido de materia orgánica, etcétera) (Viramontes et al., 2006).

Una técnica empleada en campo para medir la respuesta hidrológica del sistema suelo-vegetación es el uso de lotes experimentales de escurrimiento. Los lotes son porciones delimitadas del terreno, en las cuales se mantienen fijas las condiciones del suelo y cobertura de la vegetación, a fin de obtener una respuesta homogénea del sistema ante eventos de precipitación natural. Los lotes son por lo común de dimensiones reducidas, pero representativas de la escala de observación usada. En este tipo de experimentos, la interacción de factores, y la respuesta hidráulica del suelo y de la vegetación inciden en los patrones de la relación lluvia-escurrimiento del sistema como un todo (Paz-Pellat et al., 2013).

3.6 Métodos de cálculo del coeficiente de escurrimiento

La respuesta hidrológica dentro de una cuenca o parcela experimental, coincide con un gran número de factores, por lo que es importante considerar la enorme variabilidad espacial y temporal (efecto de escala) de las propiedades hidráulicas de los suelos y de los patrones asociados a la precipitación que hacen compleja la tarea de modelar la relación precipitación-escurrimiento (Paz et al., 2017).

Los métodos para calcular las relaciones lluvia-escurrimiento son tan numerosos y diversos que se pueden clasificar de acuerdo con la información que utilizan para el cálculo del escurrimiento (Domínguez, et al., 2016), de tal forma que se agrupan en tres grandes grupos:

Modelos empíricos. Sólo utilizan las principales características físicas promedio y proporcionan el gasto pico. Este grupo incluye las fórmulas empíricas que se han obtenido relacionando mediciones simultáneas de lluvia y de escurrimiento con las características de las cuencas. Entre este tipo de métodos están los de envolventes y el método racional.

Modelos de caja negra. Requieren de registros simultáneos de precipitación y escurrimiento, pues se calibran con los datos de ingreso y salida de la cuenca, sin considerar explícitamente las características físicas de la cuenca. Se basan en el concepto de hidrograma unitario, y permiten predecir la forma del hidrograma de la avenida, no sólo el gasto máximo.

Modelos conceptuales. También denominados matemáticos o de parámetros distribuidos. Para su aplicación se debe de disponer, además de los registros simultáneos de precipitación y escurrimiento, de las características detalladas de la cuenca.

Por supuesto, los métodos son más complejos conforme más parámetros requieren para su uso, lo que implica que la precisión es mayor; sin embargo, requieren más datos y de mejor calidad.

Chow (1994) definió el coeficiente de escurrimiento como la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación en una tormenta. Sin embargo, a causa de la variabilidad de la intensidad de precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada, por lo que también puede definirse como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca, en un periodo de tiempo dado:

$$C = \frac{Q}{P} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

Q = Escurrimiento anual (mm)

P = Precipitación anual (mm)

El coeficiente de escurrimiento es la variable menos precisa del método racional. Su uso en la fórmula implica una relación fija entre el escurrimiento y la precipitación de la cuenca, lo cual no se cumple en realidad. La capacidad de infiltración varía por las condiciones de humedad precedentes a la tormenta, además disminuye a medida que la

lluvia continúa. Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

3.7 Propiedades físicas y químicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo: están condicionadas por la masa total del suelo y reflejan su comportamiento físico. Son aquellas que están relacionadas con la organización estructural de un suelo, que son utilizadas en su descripción o determinadas en el laboratorio y que equivalen a su arquitectura (Ortiz, 1990).

- **Propiedades físico químicas:** muestran los fenómenos relacionados con la superficie de las partículas sólidas y de la interfase sólido-liquido.

- **Propiedades químicas:** son las que dependen de la parte más íntima del suelo como es su propia composición química.

El concepto de calidad del suelo fue definido por Doran y Parkin (1994) como la capacidad específica del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o alterado, para sostener la vida, la producción de plantas y animales y como soporte de vivienda (Barrezueta-Unda et al., 2017)

Textura. La textura tiene como función la retención y transporte de agua y se refiere a la proporción de los componentes inorgánicos del suelo, arena, limo y arcilla. Esta propiedad influye en la fertilidad y la capacidad de retención de agua, aireación y contenido de materia orgánica (FAO, 2016). Un alto porcentaje de arcilla dispersa en agua indica que la solución del suelo es sódica, los poros del suelo se cierran y se forma una capa superficial sellada, lo cual afecta a la infiltración y aumenta el riesgo a erosión; además, refleja la facilidad de compactación del suelo (López et al., 2011).

Densidad aparente. La densidad aparente del suelo es la relación entre el volumen total de sólidos del suelo y su masa (Alvarado y Forsythe, 2005). Es utilizada como indicador de calidad del suelo, con la que se puede determinar alteraciones producidas por las actividades antrópicas como uso de arado, maquinaria pesada, cultivos, pudiendo indicar el grado de compactación del suelo y las limitaciones.

Capacidad de Campo. También conocido como límite máximo, es el contenido de agua presente en un suelo luego de drenar libremente durante 1 a 3 días posteriores a una lluvia o riego intenso. Después de este tiempo la humedad de la superficie del suelo está a la capacidad de campo. La tensión en kilopascal (kPa) es aproximadamente de 33 (Ortiz, 1990).

Agua al Punto de Marchitamiento. También conocido como límite mínimo, es el contenido de agua de un suelo retenida tan firmemente que las plantas no pueden extraerla, causándoles una marchitez irreversible. En este estado se admite, en general, que el agua está retenida con potenciales matriciales mayores a 1500 kPa (Ortiz, 2010).

Humedad aprovechable. Es el volumen de agua, el cual se obtiene entre la diferencia del volumen de la capacidad de campo menos el volumen del punto de marchitamiento (Ortiz, 2010).

pH. Es una forma de expresar la concentración de ión hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ión hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total, si no la capacidad de la solución para formar compuestos según su concentración de iones (Ortiz, 2010).

Materia orgánica. Si bien la hojarasca es aporte orgánico para el suelo, es sedimento orgánico en las estructuras hidráulicas y es un inconveniente por la frecuente colmatación que sufren los canales y el arraigo de las especies vegetales invasoras que disminuyen la eficiencia hidráulica de la estructura (Ortiz, 2010).

4 MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en una microcuenca de 172.31 ha ubicada al noreste del Parque Nacional Zoquiapan, ubicado entre los límites del Estado de México y Puebla (Figura 1). Comprende parte de los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlamanalco, en el Estado de México; Tlahuapan y San Salvador El Verde, en el estado de Puebla. Se localiza en la región montañosa conocida como la Sierra Nevada,

aproximadamente entre las coordenadas 19° 13' 10" y 19° 18' 45" de Latitud Norte y entre los meridianos 98° 37' 39" y 98° 51' 58" de Longitud Oeste (Zavala, S.B., 1981).

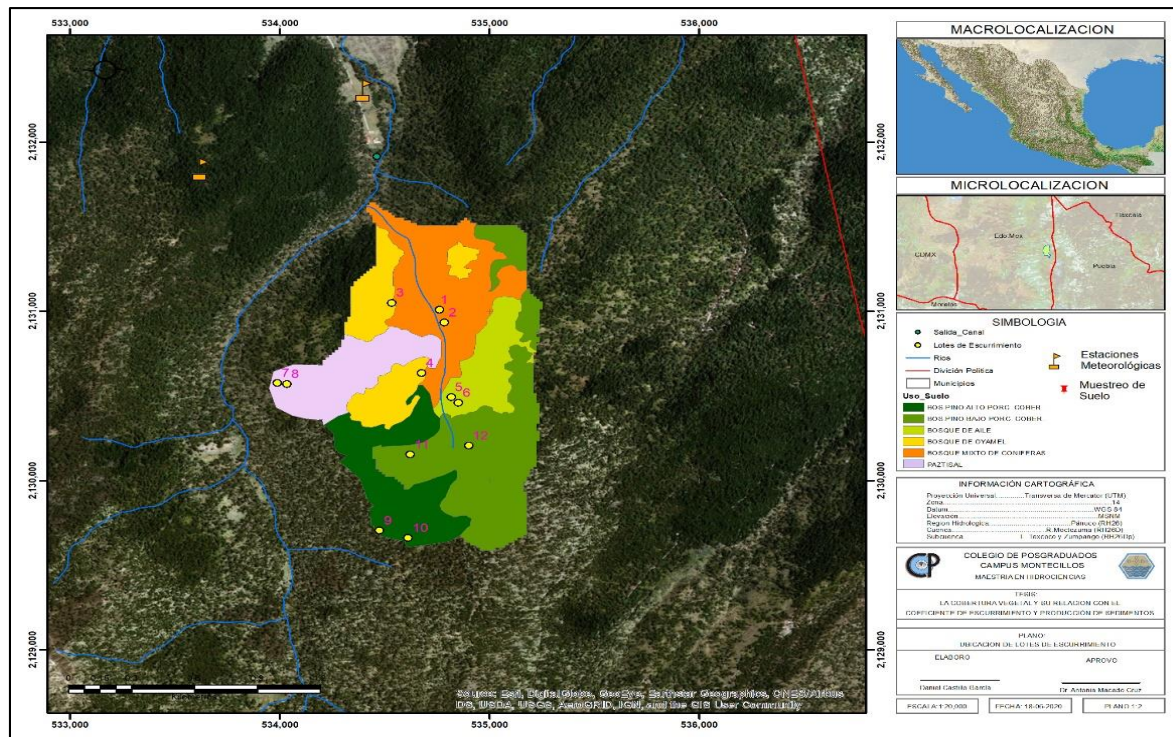


Figura 1 Ubicación de las estaciones meteorológicas y distribución de lotes de muestreo en cada tipo de cobertura.

Zavala, S.B., (1981) reporta que el tipo de clima registrado en un período de 20 años, en la Estación Meteorológica de Río Frío, es: C (w"2) (w)(b') ig. C(w); clima templado, subhúmedo, con lluvias en verano, con temperatura del mes más frío inferior a 18° C, pero superior a -3°C; la precipitación del mes más húmedo, en la mitad del año en la que se encuentra el verano, es 10 veces mayor que la del mes más seco; la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y la precipitación anual es mayor que la que constituye el límite de los climas secos B y menor que el límite de los climas C(m). La vegetación está caracterizada principalmente por los llamados bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión y que de acuerdo con LeSueur (1945) y Little (1962) citados por Rzedowski (1978), los pinares de *P. hartwegii*, *P. ayacahuite* y *P. pseudostrobus* representan comunidades clímax. En cuanto a los pastizales como estrato herbáceo existen especies de *Muhlenbergia quadridentata*, *M. macroura*, *Festuca toluensis*, *F. hephaestophila*, y *Lupinus* spp., entre otras especies (Zavala, 1984).

La metodología consistió en dos etapas 1) Fase de campo y 2) Fase de laboratorio y análisis de datos. La fase de campo consistió en el establecimiento de lotes de escurrimiento; así como en la medición de variables como la precipitación, escurrimiento, sedimentos totales y muestras edafológicas; y la fase de laboratorio en donde se analizaron las muestras de escurrimiento y edafológicas.

4.1 Clasificación de la cobertura vegetal

Con la finalidad de realizar una correcta observación de los usos de suelo y vegetación distribuidos en la microcuenca, se llevaron a cabo recorridos de campo para delimitar las zonas con vegetación similar. Las coordenadas geográficas se registraron por medio de un GPS marca Garmin Etrex 10. En las unidades hidrológicas en la microcuenca, el *Pinus hartwegii* es la especie de mayor distribución en la parte alta, media y baja de la zona. En el Cuadro 1 se observa el tipo de vegetación en los que se ubicaron los lotes de escurrimiento.

Las seis unidades hidrológicas se delimitaron con base en el tipo de vegetación y la cobertura vegetal (especie y densidad forestal), mediante el uso de una imagen satelital SPOT 7, con fecha del 5 de julio del 2018 (SIAP, 2018), y levantamiento en campo. También se consideró el tipo de suelo, pero resultó ser uniforme en el área de estudio, por lo que no tuvo mayor influencia respecto a la delimitación de las unidades hidrológicas. El procesamiento y clasificación se desarrolló con apoyo del software ArcMap®.

Cuadro 1 Tipo de vegetación de los lotes de escurrimiento

Lote	Tipo de vegetación	Identificador
1 – 2	Bosque mixto de coníferas	C1
3 - 4	Bosque de oyamel	C2
5 - 6	Bosque de aile	C3
7 - 8	Pastizal	C4
9 - 10	Bosque de pino con alto porcentaje de cobertura	C5

4.2 Justificación del número de lotes de escurrimiento

Para conocer el tamaño de muestra y si existe una adecuada confiabilidad de los datos, obtenidos por los lotes y las pruebas de suelo, se aplicó un diseño de muestreo aleatorio. De acuerdo con Berenson, *et al.* (2001). Los métodos para la determinación del tamaño muestral de una proporción son similares a los empleados para estimar la media poblacional.

La fórmula para calcular el tamaño de la muestra con distribución normal es la siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

n= tamaño de la muestra,

N= tamaño de la población,

Z= nivel de confianza correspondiente a la distribución de Gauss,

p= probabilidad de éxito o proporción esperada,

q= probabilidad de fracaso (1-p),

d= precisión (error máximo admisible en términos de proporción) (Murray y Larry, 2005).

El tamaño de la población, en el caso de los lotes de escurrimiento, correspondió a el área de estudio delimitada por una microcuenca dentro del EFEZ, dicha microcuenca se clasifico con seis tipos de cobertura como se describe en el apartado 5.1 con una superficie de 172.31 ha, equivalentes a 1 723 099.56 m²; esto último se dividió entre los 7 m² que comprenden cada lote, obteniendo 246,157 lotes podrían establecerse en la

superficie de muestreo, y de los cuales se seleccionará un porcentaje, equivalente al tamaño de la muestra, necesarios para obtener un error máximo del 15%, con una certidumbre del 85%.

Sustituyendo en la (Ecuación 3 con 85% de confiabilidad y 15% de error, se obtiene:

$$n = \frac{246,157.08 \times 1.44^2 \times 0.85 \times 0.15}{0.15^2 \times (246,157.08 - 1) + 1.44^2 \times 0.85 \times 0.15} = 11.75 \approx 12 \quad (\text{Ecuación 4})$$

El método de muestreo para determinar los 12 de 246,157 lotes en la superficie de estudio fue aleatorio distribuido por afijación simple.

4.3 Recolección de datos de precipitación

Se recolectó información de la precipitación del 01 de septiembre al 09 de octubre de 2020; mediante una estación meteorológica, ubicada al noroeste de la microcuenca. La estación meteorológica automática, identificada por la clave EMZ-02, es de marca Davis Instruments, modelo Vantage Pro2 Plus inalámbrica, cuenta con una consola Envoy y datalogger WeatherLink para recepción y almacenamiento de datos (Figura 2).



Figura 2 Estación meteorológica automática

Esta tiene un panel fotovoltaico de 7 watts y batería de 6 voltios y 1.4 amperes para alimentar constantemente de energía a la consola. La estación se encuentra ubicada en

la parte noroeste (EMZ-02) de la microcuenca, las coordenadas UTM, de su instalación se presenta en el

Cuadro 2.

Cuadro 2 Coordenadas geográficas de la estación meteorológica.

Estación	Coordenada este	Coordenada norte	Altitud (m)
EMZ-02	534 402	2 131 840	3 524

La recolección de datos se realiza por una conexión de cable USB a una computadora, lo cual, necesariamente se efectúa de forma manual cada 15 días. Durante la investigación, la estación EMZ-01 presentó problemas de discontinuidad de información debido a la falta de batería, por lo que se optó por utilizar los datos de la estación EMZ-02, instalada en la parte noroeste de la microcuenca.

4.4 Mantenimiento de lotes de escurrimiento

Durante el muestreo de los tipos de cobertura vegetal donde se identificaron las condiciones en las que se encontraban los lotes de escurrimiento, dado el vandalismo en la zona, se tuvo que dar mantenimiento a varios de los lotes de escurrimiento. Cada lote de escurrimiento contó con una superficie de 7 m² aproximadamente. En la desembocadura de cada lote se establecieron baldes de recolección para el escurrimiento y sedimentos almacenados.



Figura 3 Mantenimiento de lotes de muestreo, para su funcionamiento.

El mantenimiento consistió en colocar los lados faltantes de cada lote (Figura 3), que son tablas envueltas en plástico, enterradas a una profundidad de 15cm, para evitar que el agua salga del lote o que ingrese agua al interior de éste. En la boquilla del lote se colocó una lámina para conducir el agua, producto del escurrimiento superficial, al depósito, que consistió en un bote de 20 litros de capacidad.

Finalmente, se establecieron dos lotes de escurrimiento por tipo de vegetación, haciendo un total de doce, que constituyen un instrumento metodológico importante para medir la cantidad de escurrimiento que se produce en cada evento de lluvia. Los criterios para la distribución de los lotes de escurrimiento fue el tipo de vegetación, los cuales se instalaron en la parte noreste de la microcuenca tomando en consideración los caminos de acceso y principalmente los límites territoriales de la EFEZ. Las coberturas identificadas fueron Bosque mixto de coníferas, Bosque de oyamel, Bosque de aile, Pastizal, Bosque de pino con alto porcentaje de coberturas, Bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura. Así mismo, se obtuvo el promedio del porcentaje de la cobertura herbácea de cinco muestras, que consistieron en fotografías tomadas al azar en cada uno de los lotes (Cuadro 3), clasificadas con la aplicación Canopeo, desarrollada por la Universidad Estatal de Oklahoma en el año 2015 (Gamba *et al.*, 2020).

Cuadro 3. Tipo de vegetación, identificador y porcentaje de cobertura herbácea en cada lote de escurrimiento.

Lote	Tipo de vegetación	Identificador	Cobertura herbácea (%)
1 – 2	Bosque mixto de coníferas	C1	57.32 %
3 - 4	Bosque de oyamel	C2	51.51 %
5 - 6	Bosque de aile	C3	59.00 %
7 - 8	Pastizal	C4	41.51%
9 - 10	Bosque de pino con alto porcentaje de cobertura	C5	27.42%
11 - 12	Bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura	C6	35.54%

4.5 Toma de datos de escurrimiento y sedimento

Esta etapa consistió en la medición en campo de cada una de las variables necesarias, para su posterior análisis. Se registró el volumen escurrido en cada evento de lluvia, se recolectó una muestra que fue etiquetada para su identificación y posterior análisis en laboratorio. El muestreo se realizó en los seis diferentes tipos de vegetación y porcentajes de coberturas, para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca.



Figura 4 Recolección de muestras de escurrimiento.

En cada lote de escurrimiento se llevó a cabo la recolección de datos de escurrimiento y sedimentos, entre el 01 de septiembre hasta el 09 de octubre de 2020. Cada escurrimiento fue medido diariamente con ayuda de un vaso de precipitados, y se almacenó un litro de cada muestra para ser llevado a laboratorio (Figura 4).

4.6 Muestreo edafológico

El muestreo edafológico consistió en la toma de cuatro muestras compuestas de suelo por tipo de vegetación, cada muestra se compuso de cinco muestras simples levantadas dentro de una circunferencia de 1000 m^2 , es decir, se levantaron veinte muestras simples por cobertura (Figura 5). La extracción del suelo se realizó a 30 cm de profundidad, retirando la cubierta vegetal con ayuda de una pala, posteriormente las cinco muestras simples se mezclaron para formar una muestra compuesta, de la cual solo se tomó aproximadamente 1kg de material, el cual fue colocado en una bolsa de plástico transparente, previamente etiquetada con el número de sitio. Cada muestra fue secada a la intemperie, para poder ser llevadas posteriormente a laboratorio (Figura 6).

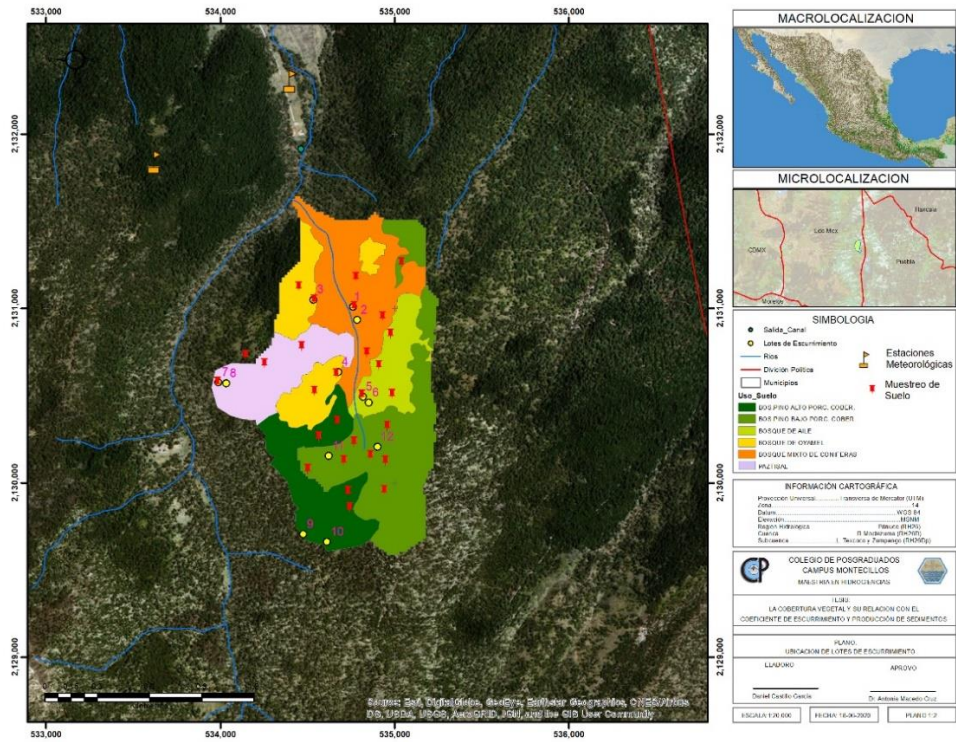


Figura 5 Distribución de muestreo de suelo



Figura 6 Extracción de la muestra de suelo

4.7 Análisis de laboratorio

La caracterización técnica se realizó a partir de la colecta de muestras y a la determinación de las propiedades que se muestran en el Cuadro 4, físicas [densidad

aparente (método de la parafina), el tamaño de partícula de acuerdo con Van Reeuwijk (2003), capacidad de campo, punto de marchitez permanente y humedad aprovechable] y químicas [pH en una relación suelo: agua 1:1, materia orgánica (Método de Walkley y Black)]. Para el análisis de laboratorio de las muestras de escurrimiento y de suelo, se determinaron los siguientes parámetros (Figura 7 y 8).

Cuadro 4 Análisis de muestras de laboratorio

Análisis de Escurrimiento y Sedimentos	Análisis de muestras de Suelo
pH	Capacidad de Campo
	Punto de Marchitez Permanente
Solidos Totales Disueltos	Densidad Aparente
	pH
	Textura



Figura 7 Preparación de mezclas para medición

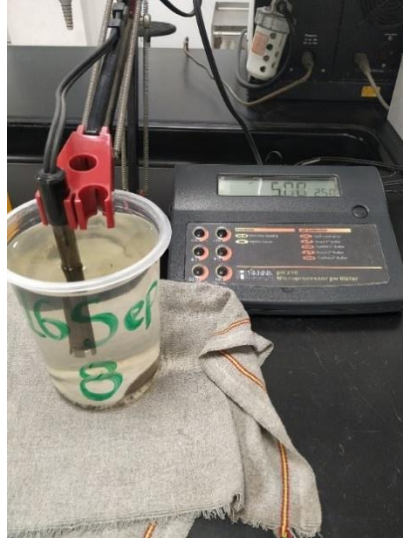


Figura 8 Medición de pH de las muestras de escurrimiento.

Cabe mencionar que para el análisis de CC y PMP, se contó con el apoyo del personal y del equipo de laboratorio de RASPA. Para la obtención de las demás variables de escurrimiento, sedimento y suelo, se contó con el apoyo del personal y del equipo de laboratorio de Ciencias Ambientales de Hidrociencias.

Sólidos Disueltos. En el agua que se encuentra en la naturaleza se pueden encontrar varias impurezas de forma suspendida o disuelta. En la cuantificación de los niveles de impurezas, el término sólido en suspensión describe las partículas en suspensión presentes en una muestra de agua. Prácticamente, estas partículas se definen por su imposibilidad de ser separadas de la muestra de aguas usando un filtro. Las partículas más pequeñas, incluyendo aquellas que contengan cargas iónicas, se refieren como sólidos disueltos (Figura 9 a la Figura 14). En el agua potable es importante tomar en cuenta ambas concentraciones de sólidos disueltos y en suspensión. El contaminante más común del mundo es la tierra en forma de TSS (siglas en inglés de total suspended solids, sólidos totales en suspensión).

Cálculo de TSS

$$TSSmg/L = \left(\frac{\text{Peso promedio despues de evaporar} - \text{Peso promedio ntes de tomar la muestra} \left(\frac{1000mg}{g} \right)}{\text{Volumen de muestra de agua en L}} \right)$$



Figura 9 Lavado, Secado y Pesado de las capsulas de porcelana



Figura 10 Muestra de Sedimentos y Evaporación de Esgurrimientos.



Figura 11 Agitando la mezcla durante un minuto.

Por cada grado Celsius se aplica una corrección de 0.36 divisiones del hidrómetro (por encima de 20 ° C se suma y por debajo de 20 ° C se resta).



Figura 12 Toma de lectura de datos con ayuda del Hidrómetro



Figura 13 Pesado de la muestra de suelo.



Figura 14 Compactación de la muestra

Capacidad de campo. La capacidad de campo (CC) de un suelo representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad, después de un riego o lluvia que ha humedecido todo el suelo. En este punto el drenaje interno es insignificante. Al igual que el punto de saturación, también se ve afectado por el tipo y contenido de arcillas y materia orgánica. En términos de tensión, el valor de capacidad de campo se obtiene, generalmente, cuando se aplica al suelo una

tensión de 1/3 de atmósfera (-33 KPa), utilizando el procedimiento de las membranas de presión (Figura 15 a Figura 23).

Punto de marchitez permanente. El punto de marchitamiento permanente (PMP) se define como la cantidad de agua del suelo en el que las hojas de las plantas que en él crecen se marchitan y no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera casi saturada de agua durante una noche. En la práctica, se utiliza este concepto para indicar el límite inferior del intervalo de agua disponible en el suelo. El valor de este parámetro se puede obtener aplicando al suelo una tensión de -1500 kPa.

Humedad Aprovechable. La cantidad de agua fácilmente accesible o humedad aprovechable es el agua retenida en un suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La CC representa el límite superior o 100% de disponibilidad de la humedad del suelo. El PMP es el límite inferior de esta disponibilidad o 0%. Los suelos de textura fina tienen límites más amplios de agua disponible que los suelos de textura gruesa.



Figura 15 Platos de Porcelana para la evaluación de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.



Figura 16 Aplicación de presión atmosférica



Figura 17 Secado de las muestras cuando están en equilibrio

Cálculos

Para determinar CC y PMP se empleó la siguiente formula:

$$H_2O (\%) = 100 (M_{S+W} - M_s) / (M_s - M_c)$$

Donde

H₂O = contenido de agua gravimétrica

M_{S+W} = Peso del suelo + agua + recipiente de aluminio s+W

M_S = Peso del suelo + recipiente de aluminio

M_C = Peso del recipiente de aluminio



Figura 18. Pesado y preparado de la mezcla



Figura 19 Pesado y agregado de Dicromato de Potasio



Figura 20 Lectura de pH para cada muestra de suelo



Figura 21. Agregado de ácido sulfúrico

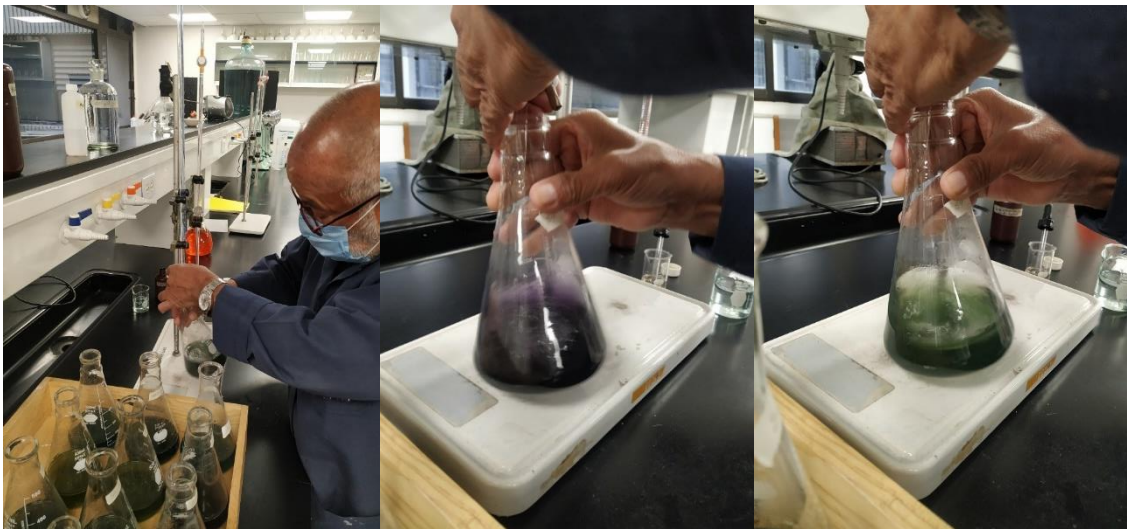


Figura 22 Proceso de titulación



Figura 23 Resultados de titulación con sulfato ferroso

4.8 Cálculo de intensidad de lluvia

Para determinar el valor de I30 se realiza a través de los datos de lluvia obtenidos de la estación automática, donde se realizó un análisis de datos en el que se consideraron los primeros 30 minutos de cada evento de lluvia. De esta precipitación total (mm) se divide entre 30 minutos, obteniendo la intensidad de la lluvia en mm/hr durante los primeros 30 minutos, sustituyendo los valores de cada evento de lluvia en la (Ecuación 1 para cada cobertura, se obtienen las gráficas de la Figura 26, en el que se representa la correlación que existe entre la intensidad de lluvia y el escurrimiento superficial para cada cobertura.

4.9 Cálculo del Coeficiente de Escurrimiento.

Siguiendo el Método Racional citado por Chow (1994), se calculó el coeficiente de escurrimiento por cobertura arbórea, como la relación entre el escurrimiento (Q) y la

Precipitación (P), $C = \frac{Q}{P}$ (Ecuación 2. Para la variable de

Precipitación se utilizaron los valores registrados por la estación Meteorológica automática en cada evento de lluvia, cabe mencionar que los datos de precipitación fueron registrados en pulgadas (in) por la configuración de la estación. Para el caso del escurrimiento, en cada evento de lluvia se recolecto y registro el escurrimiento por lote de muestreo, aclarando que por cada una de las seis coberturas arbóreas que se determinaron, se colocaron dos lotes de muestreo, dicho registro de escurrimiento se

obtuvo en mililitros, por lo que se tuvo la necesidad de hacer la transformación a lámina de lluvia, mediante un cálculo sencillo en el cual, se sabe que la superficie de cada lote de muestreo es de siete metros cuadrados y también se sabe que en una superficie de un metro cuadrado corresponde a un milímetro de lluvia, de esta forma solo basta con hacer una relación y obtenemos el valor del escurrimiento en lámina de lluvia, por cada lote de muestreo en cada evento de lluvia.

Posteriormente que tenemos ambas variables en milímetros, hacemos la relación entre escurrimiento y precipitación y obtenemos el coeficiente de escurrimiento por lote de muestreo, para finalmente hacer un promedio entre cada par de lotes por cobertura y obtener el coeficiente de escurrimiento por cobertura arbórea en cada evento de lluvia. De esta manera tenemos un Cuadro 5, en el que se muestran los valores máximos, mínimos, promedio y mediana del coeficiente de escurrimiento por cobertura arbórea.

4.10 Análisis de datos

La asociación entre las variables de precipitación, escurrimiento, pH y sólidos totales disueltos (STD) se determinó calculando la correlación entre cada par de variables para cada uno de los tipos de vegetación. Estos análisis de correlaciones fueron el producto de valores observados de cada variable (escurrimiento, pH y STD) en cada tipo de vegetación, mismos que se analizaron en conjunto con la precipitación que se observó mediante la estación meteorológica automática (PMA) durante el periodo del 01 de septiembre al 09 de octubre de 2020.

También, se realizó un análisis de regresión lineal simple para describir el comportamiento del escurrimiento en cada vegetación en función de la precipitación. Para generar el modelo de regresión lineal se consideró como variable dependiente el escurrimiento y como variable independiente a la precipitación.

Por otro lado, con los datos obtenidos de las características físico-químicas de los suelos de los sitios de muestreo en cada vegetación, se calculó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Finalmente, se utilizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para analizarlos con los datos del volumen de escurrimiento registrados en cada uno de los lotes establecidos por tipo de vegetación. El diseño

experimental fue completamente al azar con doce repeticiones, y los tipos de vegetación fueron los tratamientos.

Todos los análisis de correlación, regresión lineal simple, análisis de varianza, los estadísticos básicos (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación) y la prueba de Kruskal-Wallis se realizaron con el programa informático R versión 4.1.2 (R Core Team, 2020) y RStudio versión 1.3.1093 (RStudio Team, 2020).

5 RESULTADOS

5.1 Coeficiente de escurrimiento

Se obtuvieron los valores del coeficiente de escurrimiento por cobertura arbórea para cada evento de lluvia ocurrido en el periodo de análisis, mediante el método racional (Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores del coeficiente de escurrimiento calculados por cobertura arbórea.

Día	PP (mm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
4	1.02	0	0	0	0.1	0.1	0.1
8	2.29	0	0	0	0	0	0
9	1.78	0.4	0	0	0	0	0
10	6.60	0	0.1	0.3	0	0.1	0.1
11	10.16	0	0	0	0	0	0
12	13.72	0.2	0.1	0.2	0	0.1	0.1
16	6.10	0	0	0	0	0	0
17	2.54	0	0	0	0	0	0
18	19.56	0.1	0	0.1	0	0	0
19	13.46	0.1	0.1	0	0	0	0
21	6.86	0	0	0	0	0	0
22	3.56	0	0	0	0	0	0
23	5.59	0	0	0	0	0	0
26	13.72	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0.1
28	9.65	0	0	0	0	0	0
29	1.27	0	0	0	0	0	0
MAX	19.56	0.40	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10
MIN	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PROM	7.37	0.06	0.03	0.04	0.01	0.03	0.03
MEDIANA	6.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Considerando que el coeficiente de escurrimiento representa la lámina escurrida del total de precipitación por evento, se observa que en todas las coberturas no rebasa del 10% al 40% de escurrimiento, así mismo se observa que estos valores no son diferentes estadísticamente de acuerdo a los promedios. En este caso podemos inferir que estos valores son causados por la variabilidad espacial y temporal de las variables hidrológicas como la intensidad, precipitación, que están en función del esquema general de circulación atmosférica y de un conjunto de factores locales como la orografía, el efecto

del viento en la superficie, pendiente y orientación del terreno (Álvarez, 2011 citado por Aragón-Hernández, *et al.* 2019).

5.2 Tipo de vegetación, Cobertura herbácea y Esguerrimiento

En esta investigación, las características de la vegetación mostraron alta varianza, por lo tanto, se discretizó en unidades homogéneas, denominadas lotes de esguerrimiento, para cada cobertura: bosque mixto de coníferas, bosque de oyamel, bosque de aile, pastizal, bosque de pino con alto porcentaje de cobertura y bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura. La cobertura herbácea obtuvo el valor más alto en el bosque de aile con 59 %, seguida del bosque mixto de coníferas con 57.32%; mientras que la más baja correspondió a bosque de pino con alto porcentaje de cobertura arbórea. Los tipos de vegetación restantes oscilaron entre 27.42% y 51.51% de cobertura herbácea (Cuadro 6). Estos resultados están en concordancia con Obieta y Sarukhán (1981) y Olivares (2008) quienes concluyen que existe una relación inversa entre el porcentaje de cobertura del dosel y la producción de herbáceas bajo el mismo.

Cuadro 6 Caracterización general de los lotes de esguerrimiento

Lote	Tipo de vegetación	Identificador	Cobertura herbácea (%)
1 – 2	Bosque mixto de coníferas	C1	57.32 %
3 - 4	Bosque de oyamel	C2	51.51 %
5 - 6	Bosque de aile	C3	59.00 %
7 - 8	Pastizal	C4	41.51%
9 - 10	Bosque de pino con alto porcentaje de cobertura	C5	27.42%
11 - 12	Bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura	C6	35.54%

Por otra parte, para tratar de entender la relación del comportamiento del esguerrimiento con las demás variables (precipitación, sólidos totales disueltos, intensidad de lluvia en 0.5 hr) que intervienen en sus procesos, se realizaron gráficas de correlación entre cada una de las variables mencionadas en la metodología.

En la Figura 24 se observa la relación del escurrimiento y la precipitación, en cada tipo de vegetación, donde se detectó una alta asociación de la precipitación con el escurrimiento, con 1 y 5 % de probabilidad de error, esta relación nos indica que a mayor precipitación mayor será el escurrimiento. De acuerdo con estas correlaciones, el bosque mixto de coníferas y aile son coberturas que generan mayor escurrimiento superficial lo que puede ser causado por la composición de la cobertura superficial, ya que como se observa en el cuadro 6, son los tipos de vegetación con mayor porcentaje de cobertura herbácea, acompañada de una gran cantidad de hojarasca de aile y encino caracterizadas por su alto contenido de lignina, generando una acumulación de agua en los primeros minutos de la lluvia que sella el suelo arcilloso de la zona por sus altos contenidos de ceniza volcánica, formando una capa que impide la penetración de la lluvia hacia el suelo en forma de infiltración; Por el contrario los que generan menor escurrimiento en relación con cada evento de lluvia son las coberturas de pastizal, debido a su tipo de desarrollo (amacollado), pueden proteger el suelo de la erosividad porque reducen la velocidad de caída de las gotas de lluvia disminuyendo la severidad de su impacto (Omoro y Nair, 1993; Beer *et al.*, 1998) en cambio las coberturas de pino de alto y bajo porcentaje de cobertura, los cuales además de contar con cobertura arbórea comparte las características propias del pastizal, en donde se puede aplicar el concepto de intercepción del arbolado, en el cual no se observó algún resultado positivo en la reducción del escurrimiento; es así que la interacción planta-suelo que se establece en las formaciones boscosas difiere considerablemente de la que ocurre en las formaciones herbáceas (Hernández y Sánchez, 2012). Se constata que los árboles y el mantillo son reguladores del escurrimiento al funcionar como una pantalla protectora contra la erosión. Además, el mantillo impide la formación de una costra superficial y genera una buena estructura del suelo que facilita la infiltración (Viramontes *et al.*, 2002).

Como se observa en la Figura 25, existe una correlación significativa ($P < 0.05$) entre el escurrimiento y los sólidos totales disueltos (STD) en las coberturas de bosque mixto de coníferas (Figura 25A) y pastizal (Figura 25D). Donde en el bosque de mixto de coníferas se presenta una correlación positiva lo que significa que a mayor escurrimiento mayor arrastre de sedimentos; continuando con el análisis de la gráfica anterior, se puede entender que a partir de la acumulación de grandes cantidades de agua en la cobertura

herbácea, se forma un sello en la parte superficial del suelo, siendo que la escorrentía comienza sobre las áreas superficiales, la cantidad y tamaño del material transportado aumenta con la velocidad de la escorrentía; generando que el escurrimiento sea agresivo en canalillos arrastrando consigo una mayor cantidad de sedimentos y materia orgánica disponible. Contrario a la descripción, el pastizal presentó una correlación negativa siendo que, a mayor escurrimiento, menor arrastre sedimentos; por lo que podemos inferir que el tipo de cobertura superficial del suelo influye en el arrastre de sedimentos, siendo que en el bosque mixto de coníferas hay mayor presencia de material disponible (hojarasca y residuos orgánicos). Flores *et al.* (2016), afirma que el comportamiento de intercepción de lluvia se debe a las características dasométricas y la proporción del follaje, lo que a su vez genera que el impacto de la gota de la lluvia no cause el desprendimiento de partículas de suelo; siendo una de las razones por las que el escurrimiento no explica la producción de sedimentos, en ningún tipo de cobertura. Sin embargo, además de la vegetación y escorrentía, la tasa de erosión del suelo de un área también depende en gran medida de la clase de suelo y características topográficas (Francisco-Nicolás *et al.* 2010). Concordando con Durán *et al.* (2014), quien describió el impacto de la erosión fue menor en zonas con pastizal y matorral, debido a que proporcionan una estabilidad al suelo mediante sus sistemas radiculares e intercepción y reducción de la energía de las gotas de lluvia por su masa foliar.

En la Figura 26 se correlaciona la intensidad de la lluvia en 0.5 hr y el escurrimiento superficial por cada evento de lluvia, donde observamos que a mayor intensidad de lluvia mayor escurrimiento; estas correlaciones solo fueron significativas para las coberturas de: Pino de alto porcentaje de cobertura ($R^2=0.61$), Pino de bajo porcentaje de cobertura ($R^2=0.47$), Oyamel ($R^2=0.36$) y Bosque mixto de coníferas ($R^2=0.27$).

Una explicación a estos resultados es que el bosque de Pino de alto porcentaje de cobertura, presente en el área de estudio, es un área de regeneración con el sistema de árboles padre en donde se tiene un alto porcentaje de cobertura, pero el tamaño del área de copa es reducido, esto aunado al bajo porcentaje de cobertura herbácea (Cuadro 6), explica los resultados de este análisis de intensidad de lluvia y escurrimiento, esta relación va disminuyendo en los tipos de vegetación de Pino de bajo porcentaje de

cobertura y Oyamel en donde el arbolado es mayo tamaño y poseen un porcentaje de cobertura de copa amplia, derivada de un sistema foliar denso que se constituya en una barrera contra la precipitación (Sosa *et al.* 2006) de igual manera el tamaño, la estructura y la dinámica del sistema radical de los árboles son factores importantes (Hertel *et al.* 2003).

Por otra parte, en el bosque de aile y en el pastizal no presenta correlación entre las variables; donde los valores de R^2 fueron muy bajos de 0.11 y 0.24; siendo atribuible al alto porcentaje de cobertura herbácea presente en ambos ecosistemas, a pesar de no contar con una cobertura arbórea en el caso del pastizal, este genera una cubierta protectora del suelo ante el impacto de la lluvia; así mismo el bosque de aile presenta hojas anchas y planas, en contraposición a las coníferas que tienen hojas aciculares; dado que la cobertura vegetal tiene la función de interceptar las gotas de lluvia por medio de las copas de los árboles impidiendo así que impacten directamente en el suelo, aumentando la precipitación interna que pasa entre los espacios vacíos de las hojas, copas, escurrimiento por las hojas ramas y troncos llegando al suelo con disminuida energía, para luego infiltrarse y tornarse en agua disponible (Ordoñez *et al.* 2016).

En la Figura 27 se observa el comportamiento entre la intensidad de lluvia y Sólidos totales disueltos, con forme a los datos obtenidos en campo se muestra una baja relación entre estos dos factores, siendo así que para el pastizal se tiene una relación negativa, en donde se entiende que a mayor intensidad es menor la cantidad de solidos totales disueltos y si analizamos la Figura 26 con la Figura 27, para este mismo tipo de vegetación, podemos asimilar que a mayor intensidad de lluvia mayor escurrimiento, pero menor cantidad de solidos totales disueltos. Este efecto se puede explicar si entendemos que la condición de cobertura que proporcionaba el pastizal en el área de estudio era basta, debido a la etapa de crecimiento en la que se encontraba, teniendo un desarrollo mayor hacia la parte área en altura, disminuyendo en gran medida el impacto de las gotas de lluvia hacia el suelo, aunado a la característica de crecimiento tipo amacollado que sirve como filtro y reductor de la velocidad del escurrimiento.

Como se observa en la Figura 28 La precipitación y producción de sedimentos, solo es significativa para pastizal con un $R^2=0.51$ con pendiente negativa, de igual forma este

resultado está en concordancia con las figuras anteriores 26 y 27, en donde se afirma que a mayor intensidad mayor escurrimiento, pero menor cantidad de sólidos disueltos, por lo que a mayor precipitación menor cantidad de sólidos disueltos en congruencia a lo reportado por Chartier y Rostagno (2010) donde menciona que, en un evento de lluvia los primeros minutos son los que generan el mayor porcentaje de erosión.

En la Figura 29 se muestra que la cobertura herbácea no fue un factor importante para inferir el escurrimiento (Figura 29A), tampoco para la producción de sedimentos (Figura 29B); así como lo menciona Viramontes *et al.* 2006, la vegetación herbácea no fue un agente explicativo del escurrimiento y ni la erosión hídrica; sin embargo, como lo menciona Tapia (2013), la cobertura herbácea posee un efecto mitigador explicativo del escurrimiento y la erosión hídrica (Vallejos *et al.* 2010). De igual manera no se presenta alguna diferencia entre las variables físicas y químicas del suelo como el pH (Figura 29C); densidad aparente (Figura 29D); materia orgánica (Figura 29E) en relación a los porcentajes de cobertura.

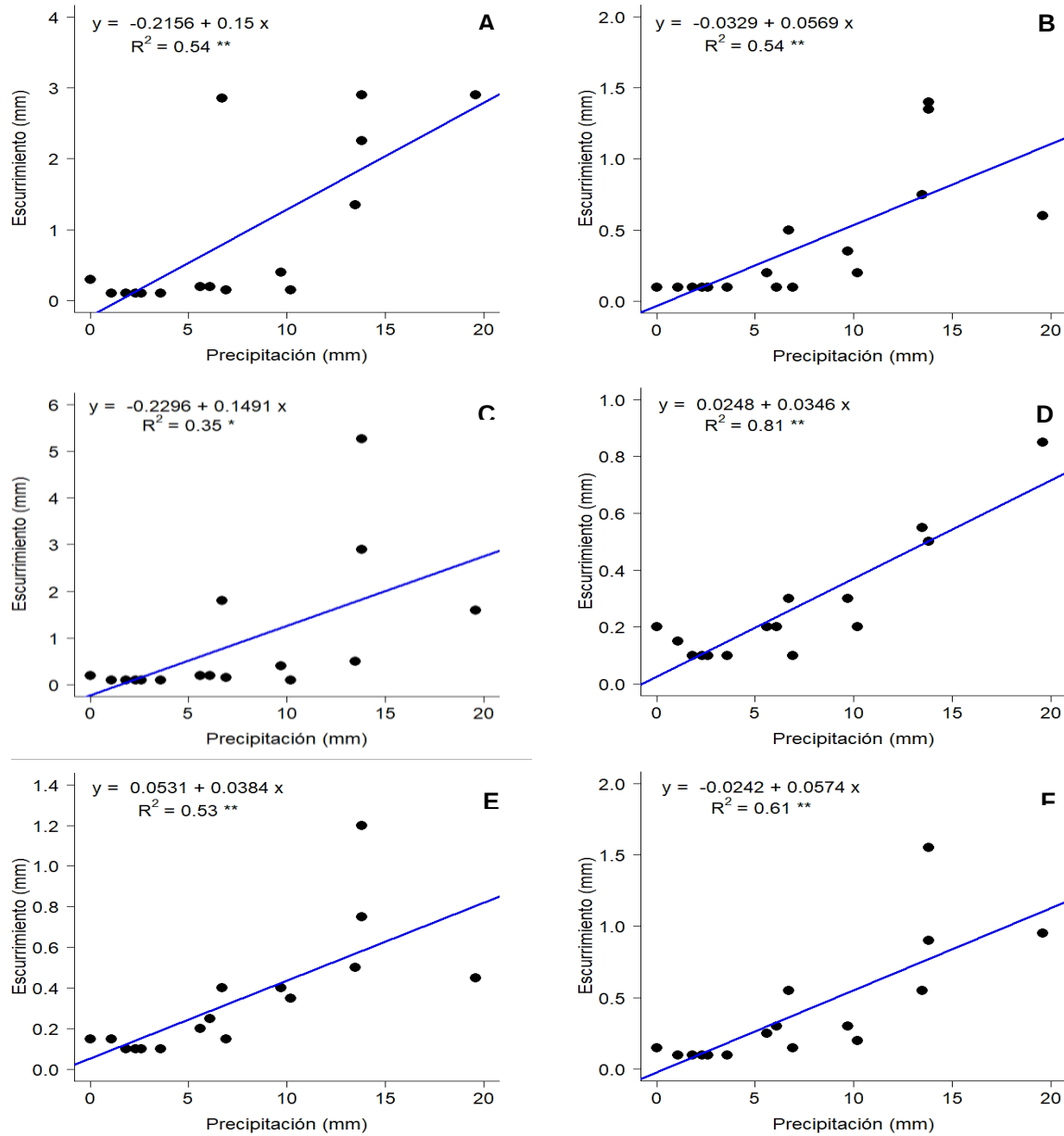


Figura 24 Comportamiento del escurrimiento y de la precipitación (evaluada con la estación meteorológica automática) en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde: ** : 0.01 (altamente significativo); * : 0.5 (significativo).

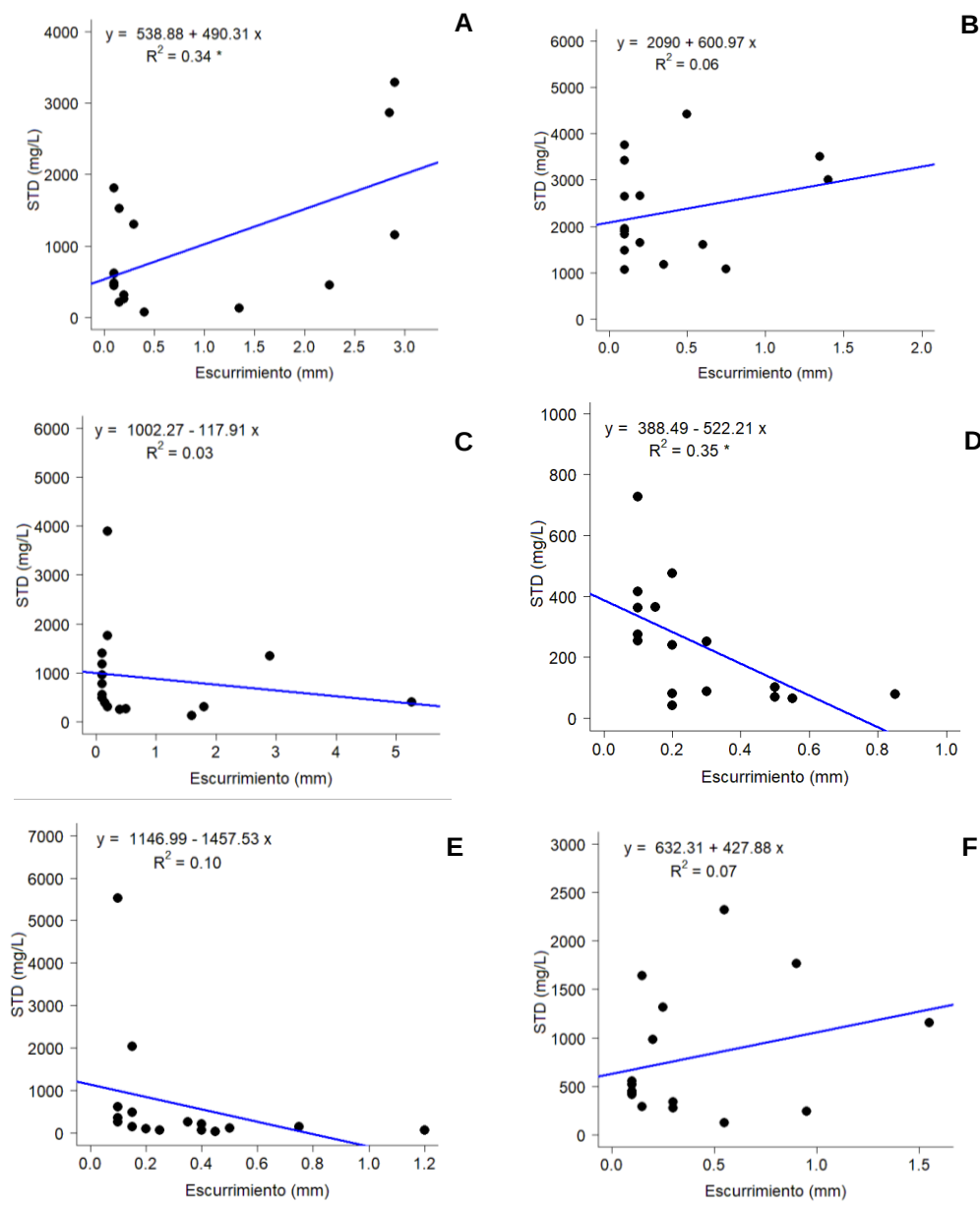


Figura 25. Comportamiento del escurrimiento y de la producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo).

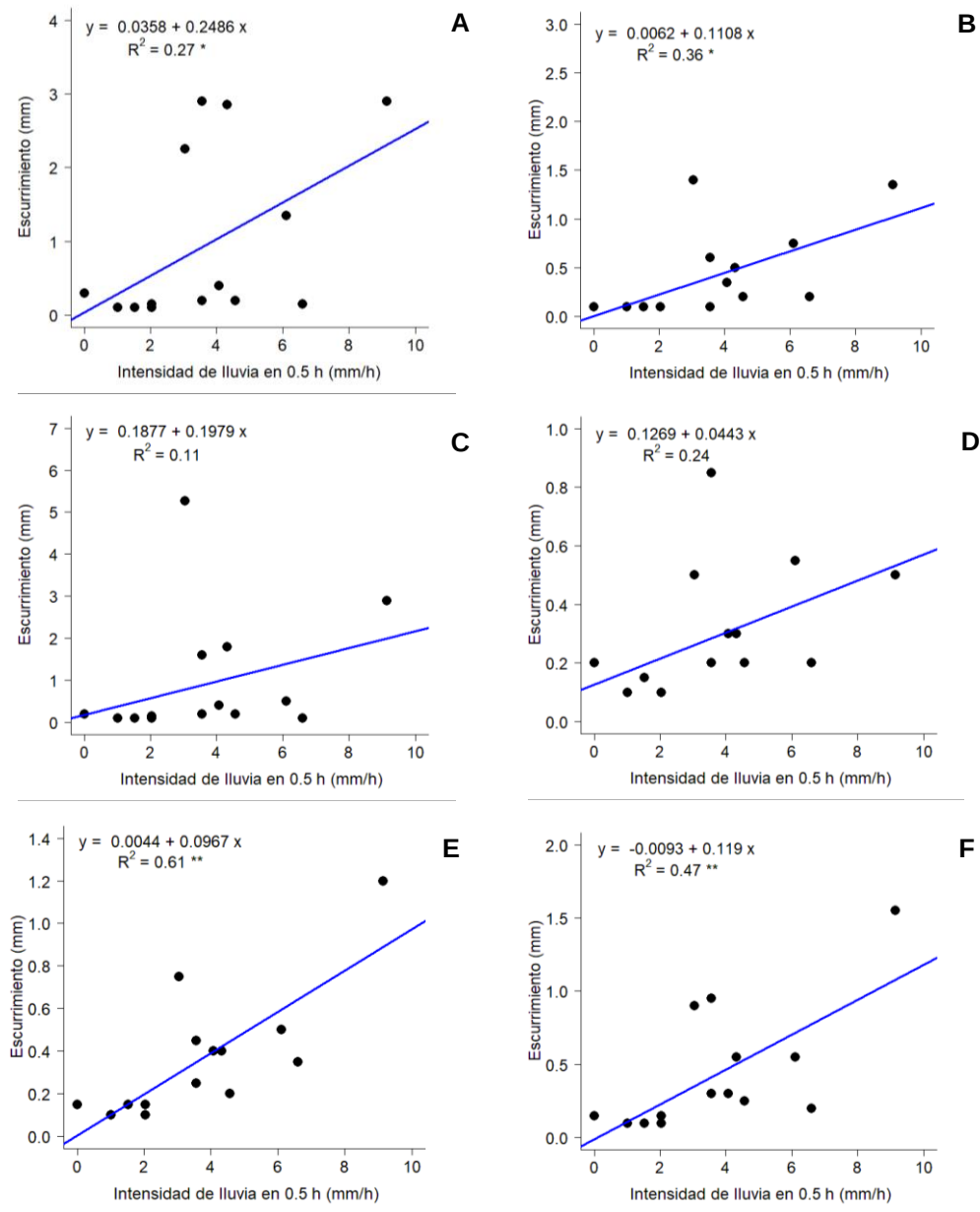


Figura 26 Comportamiento de la intensidad de lluvia en 0.5 h y el escurrimiento en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde:**:0.01 (altamente significativo).

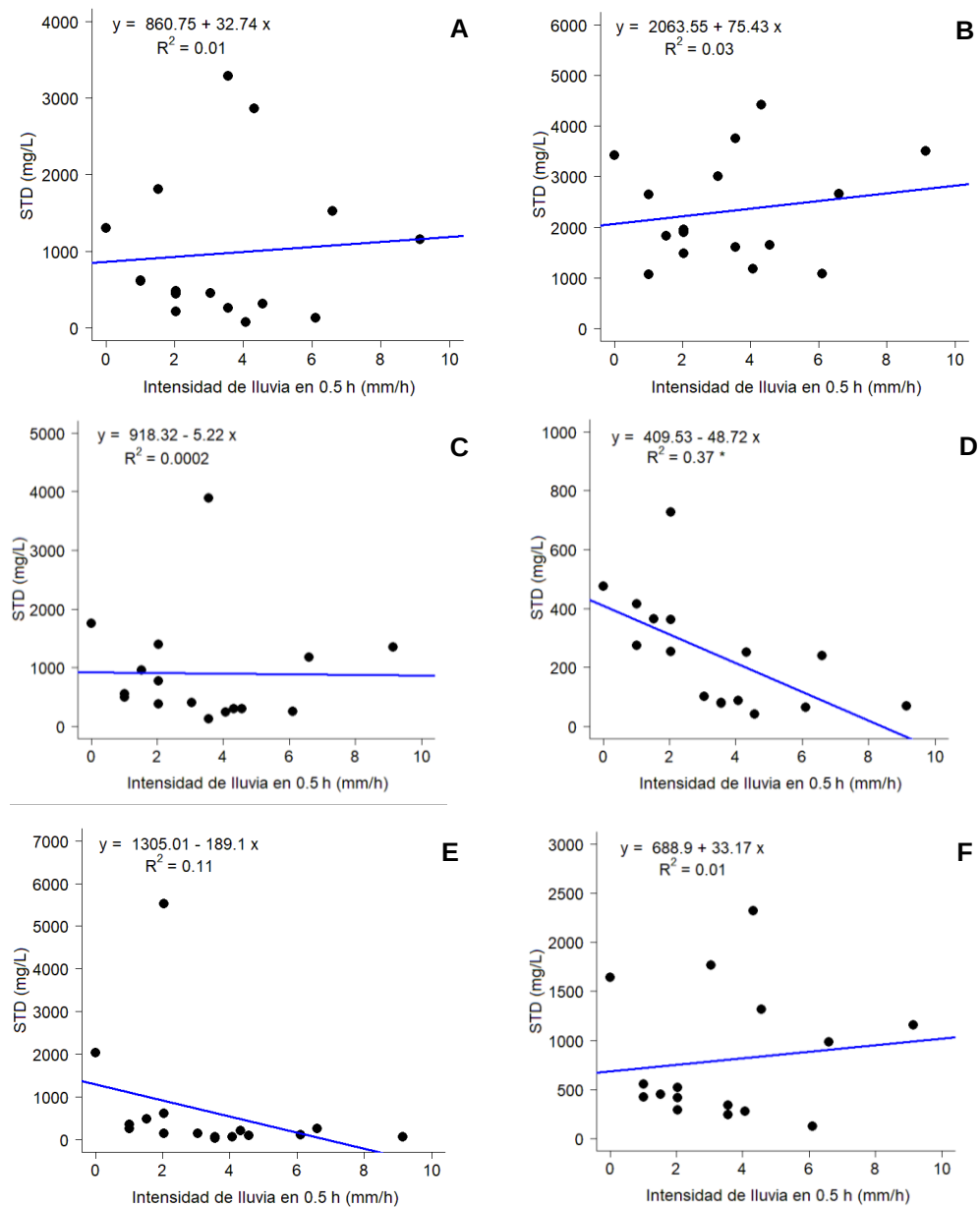


Figura 27 Comportamiento de la intensidad de lluvia en 0.5 h y producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Donde: **:0.01 (altamente significativo).

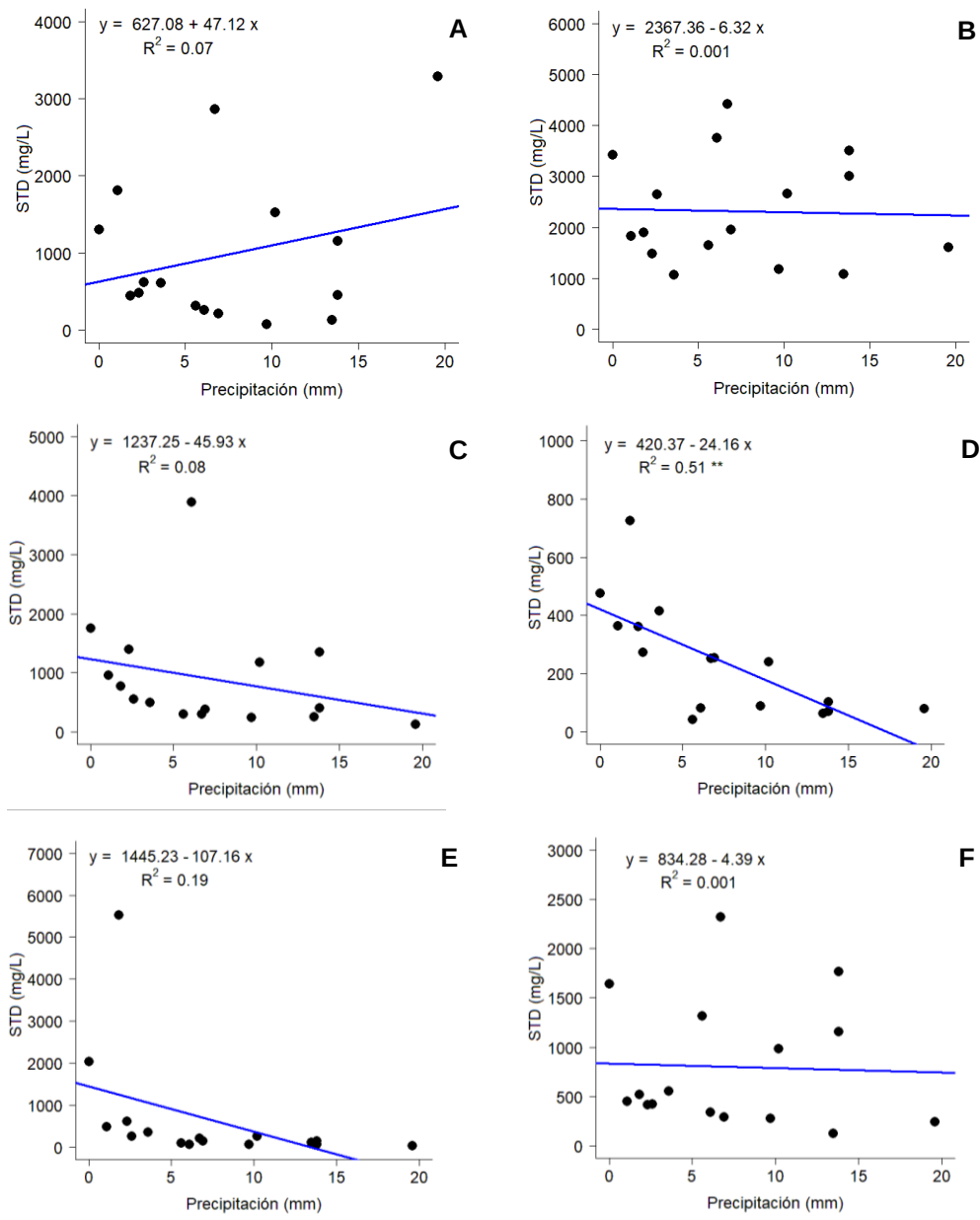


Figura 28 Comportamiento de la precipitación y producción de sedimentos en los bosques de: conífera (A), oyamel (B), aile (C), pastizal (D), pino con alto porcentaje de cobertura (E) y pino con bajo porcentaje de cobertura (F). Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple. Dónde:**:0.01 (altamente significativo).

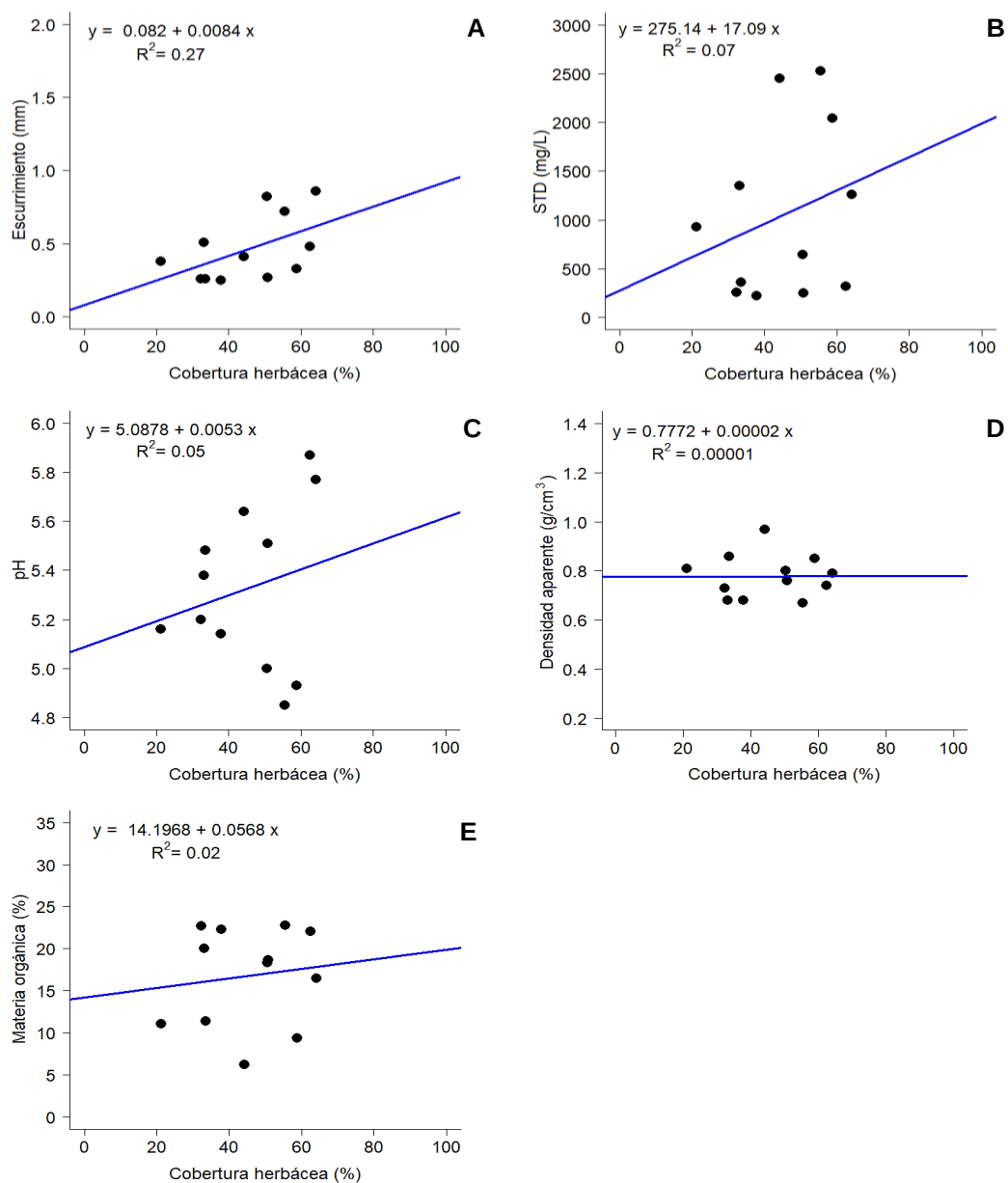


Figura 29 Comportamiento de la cobertura herbácea y las variables de: escurrimiento (A), sólidos totales disueltos (STD) (B), pH (C), densidad aparente (D), materia orgánica (E) de los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México. Los puntos (●) corresponden a los valores observados, y la línea recta (—) a la regresión lineal simple.

5.3 Relación entre lluvia y escurrimiento

Los días de mayor precipitación en la estación experimental Zoquiapan medidos con la estación meteorológica automática (PMA) fueron: 11, 12, 18, 19, 26 y 28 de septiembre (Cuadro 7). Los eventos menores se consideraron de poca envergadura y originados por

tormentas pequeñas por lo que su inclusión conduciría a incrementar el error en las estimaciones (Feyereisen *et al.*, 2008). Las variables hidrológicas, entre ellas la precipitación, presenta una alta variabilidad espacial y temporal en función del esquema general de circulación atmosférica y de un conjunto de factores locales como la orografía, el efecto del viento en la superficie, pendiente y orientación del terreno (Álvarez, 2011).

Cuadro 7 Valores observados de precipitación con la estación meteorológica automática (PMA), en la estación experimental Zoquiapan, México.

Día	Precipitación (mm)
	PMA [†]
8	1.02
9	2.29
10	1.78
11	6.60
12	10.16
16	13.72
17	6.10
18	2.54
19	19.56
21	13.46
22	6.86
23	3.56
26	5.59
28	13.72
29	9.65
39	1.27

[†]PMA, estación meteorológica automática.

En el área de estudio, correspondiente a la estación experimental Zoquiapan al comparar el escurrimiento con la precipitación en cada condición de vegetación se observa una posible relación directa con este elemento climático, ya que el escurrimiento máximo se obtuvo cuando el suelo se encontraba saturado después de algunos eventos de lluvia, observando que el pino con alto porcentaje de cobertura es el que muestra menor escurrimiento para todos los casos (Figura 30), Así mismo se observa que los pastizales presentan escurrimientos inferiores a los que presentan los lotes con cobertura arbórea, con una relación directa en días de mayor precipitación. De estos resultados se deduce, que la intensidad de la precipitación fue mayor que las tasas de infiltración, y que el impacto de las gotas de lluvia provocó una compactación y un sellamiento de la superficie

del suelo, lo cual coincide con lo reportado por Lindstrom *et al* (1998). Al respecto, Vallejos *et al.* (2010) indican que este proceso puede disminuir drásticamente la infiltración y aumentar los escurrimientos superficiales.

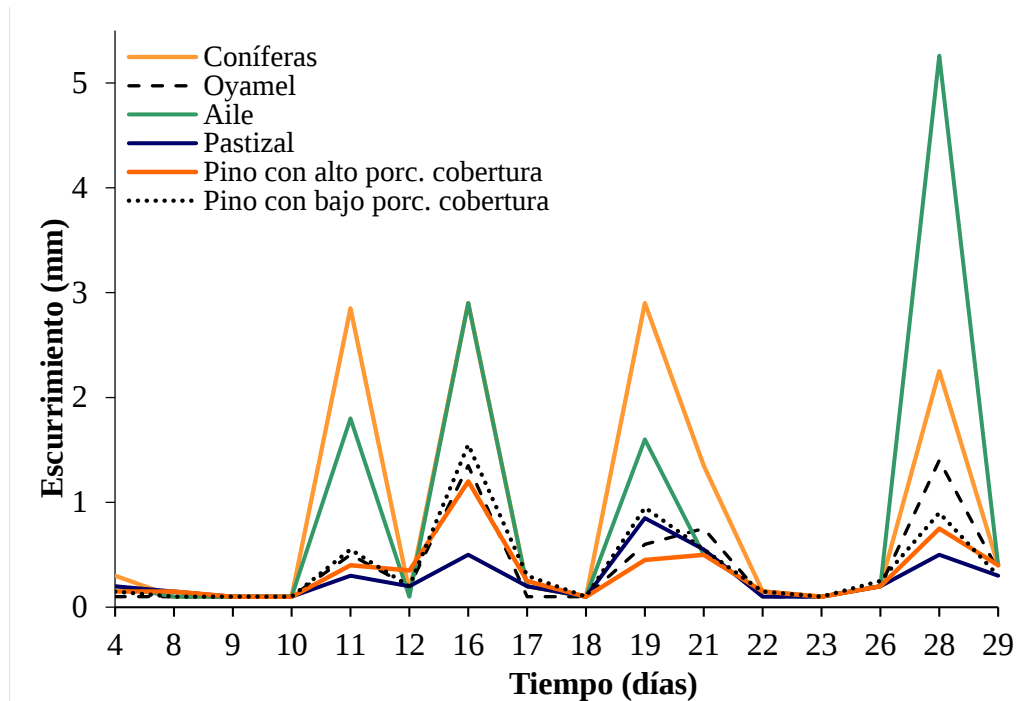


Figura 30 Comportamiento del escurrimiento (mm) por tipo de vegetación durante el periodo del 01 de septiembre al 09 de octubre de 2020, en la estación experimental Zoquiapan, México.

Al comparar los escurrimientos producidos en los dos tipos de vegetación similar (bosque de pino), pero con diferente porcentaje cobertura arbórea, se aprecia que en el de mayor cobertura arbórea disminuye ligeramente la lámina escurrida, aunque este tiene menor cobertura herbácea y los eventos medidos fueron pocos y las láminas precipitadas no fueron considerables en los eventos registrados, por lo que estos resultados no son concluyentes.

Los resultados de la matriz de correlación como análisis estadístico, en general, no mostró relaciones estadísticamente significativas entre el escurrimiento y la producción de sedimentos con otras variables independientes (Cuadro 8), lo que posiblemente se debió a que las mediciones correspondieron a un número de eventos limitado. Esto se

puede observar en las gráficas de dispersión obtenidas (Figura 24). Aunque, en la vegetación de pastizal la variable PMA fue el que mejor estimó el ESC.

Cuadro 8 Matriz de correlación entre las variables de precipitación (PMA, evaluada con la estación meteorológica automática), escurrimiento (ESC), pH y sólidos totales disueltos (STD) de los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México.

Tipo de bosque	Variables	ESC (mm)	STD (mg/L)	pH
Conífera	PMA	0.7368**	0.2734	-0.1580
	ESC	-	0.5794*	-0.2592
	STD	-	-	0.3016
	pH	-	-	-
Oyamel	PMA	0.7326**	-0.0341	-0.5104*
	ESC	-	0.2518	-0.3245
	STD	-	-	0.4330
	pH	-	-	-
Aile	PMA	0.5882*	-0.2765	-0.2783
	ESC	-	-0.1798	-0.2743
	STD	-	-	-0.2683
	PLV	-	-	-
Pastizal	PMA	0.9011**	-0.7131**	-0.3110
	ESC	-	-0.5911*	-0.2550
	STD	-	-	0.1612
	pH	-	-	-
Pino	PMA	0.7290**	-0.4360	-0.1221
	ESC	-	-0.3121	-0.3087
	STD	-	-	0.5032*
	pH	-	-	-
Pino ^z	PMA	0.7806**	-0.0377	-0.2166
	ESC	-	0.2710	-0.2816
	STD	-	-	-0.2552
	pH	-	-	-

^y:bosque de pino con alto porcentaje de cobertura; ^z:bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura;; ^xPMA: precipitación evaluada con la estación meteorológica automática; ESC: escurrimiento; STD: sólidos totales disueltos; pH: grado de acidez. La matriz de correlación se obtuvo con valores observados de cada variable (n=10) en el periodo del 01 de septiembre al 09 de octubre de 2020. Donde:**:0.01 (altamente significativo); *:0.05 (significativo).

Sólo la cobertura de pastizal dio respuesta a que a mayor intensidad de lluvia en 0.5 hr menor es la cantidad sólidos totales disueltos en el escurrimiento (Figura 27); así mismo a mayor cantidad de lluvia menor es el arrastre de sólidos totales disueltos (Figura 28). Siendo que las coberturas que no mostraron relación con estas dos comparaciones son debido al efecto de la interceptación ocasionada por las características propias de las coberturas arbóreas, evitando que la fuerza y cantidad de lluvia afecte de manera directa al arrastre de sedimentos. Por lo que la diferencia entre los escurrimientos superficiales y la producción de sedimentos está sujeta a la capacidad de interceptación de la vegetación (Chartier y Rostagno, 2010 & López-Lambraño, *et al.* 2017).

A pesar de que los coeficientes de esorrentía aumentan en proporción con las precipitaciones en la cuenca de manera similar a lo descrito por Figueroa y Rivera (2015); lo que ocasiona que el sedimento se desprenda de la superficie del suelo, tanto por el impacto de las gotas de lluvia como por la fuerza cortante del agua que fluye; el sedimento es transportado pendiente abajo principalmente por el agua en corriente, aunque también hay una pequeña cantidad de transporte pendiente abajo por salpicaduras de gotas de lluvia tal como menciona Walling, 1988; es por esto que el proceso de erosión del suelo implica desprendimiento, transporte y posterior deposición (Meyer y Wischmeier, 1969).

5.4 Caracterización del suelo

De manera general, en la interacción de la respuesta hidráulica del suelo y la vegetación los patrones de la relación precipitación-escurrimiento del sistema, actuaron como parte de un todo, es decir, la diferenciación de la cobertura vegetal del suelo, determina efectos erosivos, como la fuerza de impacto de las gotas de lluvias sobre el suelo y el escurrimiento (Senra, 2009). Los suelos en los sitios de muestreo de los bosques de la estación experimental Zoquiapan se caracterizaron por texturas francas, clasificadas como medias, además de presentar una densidad aparente que estuvo en un intervalo de 0.68-0.91 g/cm³. Los suelos francos presentan mayor capacidad de almacenaje de agua con tasas lentas de decaimiento, que beneficia las formaciones vegetales para mantener servicios hidrológicos de alto significado, puesto que suelen concurrir la asociación de doseles arbóreos y suelos francos (Lozano-Trejo *et al.*, 2020).

La mayoría de los suelos con base a su pH se clasificaron como fuertemente ácidos, salvo para suelos en oyamel que fueron medianamente ácidos. En el bosque de oyamel se observó una correlación negativa entre las variables de precipitación y pH de las muestras de agua de escurrimiento, en tanto que en el lote de escurrimiento de pino (con alto porcentaje de cobertura) se encontró una correlación positiva entre STD y pH. Por lo anterior, la comparación de las variables del bosque con oyamel indica que el pH de la muestra de escurrimiento disminuye con mayores valores de precipitación, pero el pH aumenta al incrementar los STD, en el caso del bosque con pino. Debido a que los suelos son ácidos, a mayor precipitación en general hay mayor erosión (STD) lo que disminuye el pH de las muestras de agua escurrida.

En cuanto a los contenidos de materia orgánica se registraron valores superiores al 11 % en todos los sitios, excepto en los suelos del bosque de oyamel (Cuadro 9), debido a que son suelos andosoles se clasifican de moderadamente ricos a muy ricos de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000). La composición multiestrato de las coberturas vegetales constituye una cadena de amortiguación de la precipitación, con alta eficiencia, permite la adecuada disposición de la materia orgánica aportada por el sistema, lo que repercute positivamente en la rapidez de regeneración orgánica del suelo (Sosa *et al.*, 2006).

Cuadro 9 Estadísticos básicos de las propiedades físicas y químicas de los suelos que presentan los bosques de la estación experimental Zoquiapan, México.

Tipo de bosque	Densidad aparente (g·cm ⁻³)		pH		Materia orgánica (%)		Arena (%)	
	Media ± DE ^z	CV [†]	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV
Conífera	0.79±0.03	3.32	5.38±0.10	1.90	17.40±1.89	10.89	46.23±0.55	1.18
Oyamel	0.91±0.07	8.02	5.79±0.19	3.31	7.78±1.88	24.17	49.14±4.47	9.10
Aile	0.70±0.05	6.51	4.73±0.17	3.55	22.40±1.35	6.04	49.23±1.60	3.24
Pastizal	0.74±0.03	3.38	5.27±0.10	1.92	20.68±3.73	18.06	46.55±1.33	2.86
Pino ^x	0.83±0.04	4.29	5.49±0.08	1.49	11.23±0.32	2.84	49.91±1.80	3.60
Pino ^y	0.68±0.03	4.80	5.15±0.18	3.53	21.14±1.95	9.25	45.82±1.27	2.77

Tipo de bosque	Limo (%)		Arcilla (%)		Hcc (%) [‡]		Hpmp (%) [‡]	
	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV
Conífera	42.27±1.44	3.42	11.50±1.91	16.65	60.09±6.09	10.13	34.92±4.89	14.01
Oyamel	39.36±4.70	11.93	11.50±1.00	8.70	40.45±7.37	18.23	26.02±6.77	26.01
Aile	42.27±2.02	4.79	8.50±1.00	11.76	60.95±4.00	6.56	45.99±6.67	14.50
Pastizal	43.45±0.90	2.08	10.00±1.63	16.33	60.96±4.63	7.59	44.23±2.15	4.86
Pino ^x	40.09±2.43	6.05	10.00±1.63	16.33	48.14±2.35	4.89	26.69±1.65	6.17
Pino ^y	43.68±1.45	3.32	10.50±1.91	18.24	62.09±1.58	2.55	43.56±3.67	8.42

^zDE: desviación estándar; [†]CV: coeficiente de variación (%); [‡]Hcc: humedad a capacidad de campo; [‡]Hpmp: humedad a punto de marchitamiento permanente. ^x:bosque de pino con alto porcentaje de cobertura; ^y:bosque de pino con bajo porcentaje de cobertura

Se encontró que el efecto de los tipos de vegetación en el volumen de escurrimiento no fue significativamente diferente ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (Figura 31). Llama la atención el resultado anterior, considerando que los promedios del contenido de materia orgánica tuvieron valores muy altos en algunas unidades de vegetación y su función en el proceso de escurrimiento-infiltración en el suelo es importante.

Los cambios que sufre el suelo por intemperismo debido al secado excesivo, la humectación, y la ausencia de recursos para la vegetación, como agua, nutrientes, espacio, carencia de materia orgánica, son factores que dificultan el arraigo, el establecimiento y el crecimiento de la cobertura vegetal y por tanto en el escurrimiento superficial. Las actividades humanas tienen un impacto considerable sobre la diversidad biótica en todo el mundo, en el clima global y local, en los ciclos biogeoquímicos, en la degradación y calidad del suelo, la hidrología, la seguridad alimentaria y el bienestar humano (Trimble *et al.*, 2000); además afectan a la capacidad de los sistemas biológicos para sustentar las demandas del hombre (Tran *et al.*, 2015). Por lo tanto, es necesario documentar y evaluar las modificaciones de cobertura del suelo y usos de la tierra, para entender cuáles son sus fuerzas conductoras, así como sus consecuencias, especialmente, en el contexto de los cambios ambientales globales, el crecimiento rápido de la población y el incremento de las demandas hacia la sustentabilidad del ambiente.

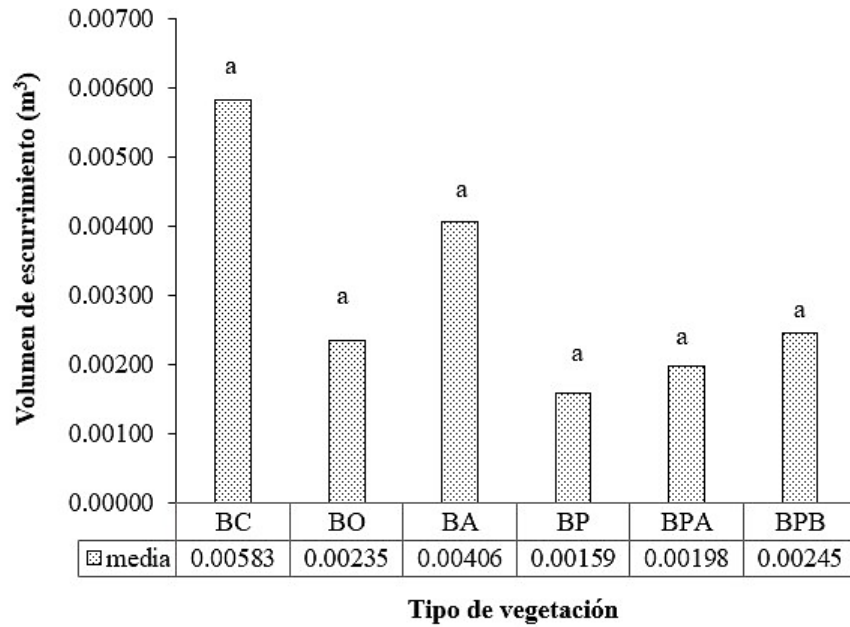


Figura 31 Volumen de escurrimiento (m^3) registrado en los lotes de escurrimiento establecidos por tipo de vegetación de la estación experimental Zoquiapan, México. Letras iguales no son significativamente diferentes (Prueba de Kruskal-Wallis, $P < 0.05$). Dónde: conífera (BC), oyamel (BO), aile (BA), pastizal (BP), pino con alto porcentaje de cobertura (BPA) y pino con bajo porcentaje de cobertura (BPB).

6 CONCLUSIONES

De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis los tipos de vegetación, en relación con el volumen de escurrimiento, no fueron significativamente diferentes ($P < 0.05$); sin embargo, se observó que la escorrentía aumenta proporcionalmente con las precipitaciones, siendo la cobertura de pastizal la que presentó una mejor correlación de datos debido a que no hay disminución de lluvia por la interceptación de la cubierta arbórea; por lo que durante el proceso de erosión hídrica, intervienen más variables que afectan de manera directa el proceso de la erosión.

Existe una correlación significativa ($P < 0.05$) entre el escurrimiento y los sólidos totales disueltos, principalmente en el bosque de coníferas y el pastizal. En la cobertura de bosque mixto de coníferas se observó una relación proporcional que a mayor escurrimiento mayor arrastre de sedimentos, siendo atribuible a la acumulación de grandes cantidades de agua en la cobertura herbácea, se forma un sello en la parte superficial del suelo, siendo que la escorrentía comienza sobre las áreas superficiales, la cantidad y tamaño del material transportado aumenta con la velocidad de la escorrentía; generando que el escurrimiento sea agresivo en canalillos arrastrando consigo una mayor cantidad de sedimentos y materia orgánica disponible. En el pastizal se observó una relación inversamente proporcional entre los sólidos totales disueltos y el escurrimiento; siendo que la cubierta vegetal mitiga la erosión del suelo por su capacidad de protección, relacionada con la biomasa y la diversidad de especies. En este caso el impacto de la erosión es menor en zonas con pastizal, debido a que proporcionan estabilidad al suelo mediante sus sistemas radiculares e interceptación y reducción de la energía cinética de las gotas de lluvia por su masa foliar.

La cobertura herbácea no fue un factor determinante para inferir el escurrimiento, ya que intervienen otros factores en el comportamiento de la escorrentía y producción de sedimentos, sin embargo, se reconoce que la cobertura herbácea posee un efecto mitigador del escurrimiento y la erosión hídrica. El escurrimiento varía dependiendo de los obstáculos que intervienen en la absorción durante su flujo, mismos que varían a lo largo del año, por ejemplo, en áreas de pastizal conviven especies de distintas

comunidades, con hábitos y épocas de crecimiento diferentes, que regulan las variables del ciclo hidrológico, específicamente el escurrimiento.

La relación escurrimiento y el contenido de sólidos totales disueltos fue significativa en la cobertura arbórea de bosque de coníferas y pastizal, asociadas a suelos que se caracterizaron por texturas francas, con densidad aparente que estuvo en un intervalo de 0.68-0.91 g/cm³, con contenidos de medios a altos de materia orgánica, con alta capacidad de almacenaje de agua con tasas lentas de decaimiento. Por otra parte, se observó una correlación negativa entre la precipitación, esto debido principalmente, a que los suelos son ácidos, a mayor precipitación en general hay mayor erosión (STD) lo que disminuye el pH de las muestras de agua escurrida.

De manera general, la interacción de factores de la vegetación y la respuesta hidrológica del suelo, incidieron en los patrones de la relación precipitación-escurrimiento, por lo que conforme a los resultados, la diferenciación de la cobertura vegetal del suelo no son estadísticamente diferentes en producción de volumen escurrido, sin embargo, si es diferente la producción de sedimentos que resultan en cada tipo de cobertura, ya que en el pastizal se observa menos arrastre de suelo en proporción al escurrimiento, en comparación con el bosque mixto de coníferas, en el que se presenta un mayor arrastre en relación al volumen de escurrimiento.

7 LITERATURA CITADA

- Aguirre-Padilla, N. I., Alvarado-Espejo, J., y Granda-Pardo, J. (2018). Bienes y servicios ecosistémicos de los bosques secos de la provincia de Loja. *Bosques Latitud Cero*, 8(2).
- Alvarado A., Forsythe W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.
- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33.
- Almoza, Yeleine; Medina, Hanoi; Schiettecatte, Wuoter; Alonso, Gustavo; Rúiz, María Elena, 2008. El uso de datos pluviométricos para la determinación del factor erosividad de las precipitaciones en el modelo RUSLE. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 17, núm. 1, pp. 38-43 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba
- Angulo-Martínez M, Beguería S. 2013. Análisis de la erosividad de la lluvia: procesos, índices y fronteras de conocimiento | [Rainfall erosivity: process, indices and frontiers of knowledge]. *Cuaternario y Geomorfología* 27 (1-2): 53-69 (2013)
- Antonio Jordán, Nicolás Bellinfante., 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología. Volumen 7-3*. pág 83-92.
- Ares, M. G. 2014. Lluvia, escurrimiento y producción de sedimentos en una microcuenca agrícola del sistema de Tandilia. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Aragón-Hernández, José Luis, Aguilar-Martínez, Germán Adrián, Velázquez-Ríos, Ulises, Jiménez-Magaña, Martín Rubén, & Maya-Franco, Alejandro. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(2)<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Baeza S, Lezama F, Piñeiro G, Altesor A, Paruelo JM. 2010. Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* 13, 72–85.
- Barrezueta-Unda, S., Paz-González, A., y Chabla-Carrillo, J. (2017). Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia de El Oro-Ecuador. *Revista CUMBRES*, 3(1), 17–24. <https://doi.org/1390-9541>
- Beer, J., R. Muschler, D. Kass, and E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agrofor. Syst.* 38: 139-164.
- Belmonte Serrato, F. Y Romero Díaz, M.A. (1996). «Aproximación a las características climáticas en el área de influencia del campo experimental de El Ardal (Murcia). La

- representatividad de las series climáticas disponibles». Papeles de Geografía, 23-24:47-61
- Berenson, Levine y Krehbiel. (2001). "Estadística para Administración", Pearson Educación, 2a Ed., México.
- Bingner, R. L., C. K. Mutchler, and C. E. Murphree. 1992. Predictive capabilities of erosion models for different storm sizes. Trans. ASAE 35: 505-513.
- Blanco, Y., y Leyva, A. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. Cultivos tropicales, 28(2), 21-28.
- Castellanos JZ, Uvalle-Bueno JX, Aguilar-Santelises A (2000) Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP. Segunda Edición. INIFAP-Gto. Chapingo-Edo de México. 1-6 p.
- Chartier, M. P., y Rostagno, C. M. (2010). Evaluación del modelo WEPP para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. Ciencia del suelo, 28(1), 91-103.
- Chow, V.T.; 1994. Hidráulica en canales abiertos. Traducido por Juan G. Saldarriaga. McGraw-Hill. 667p.
- Crespo, R. J., Ares, G., Sfeir, A., Wingeyer, A. B., y Usunoff, E. (2010). Efecto de la labranza y la cobertura vegetal sobre el escurrimiento y la pérdida de suelo en la región central de la provincia de Buenos Aires. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 42(1), 93-106.
- Domínguez Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Carrizosa Elizondo, E., y Esquivel Garduño, G. (2016). Caracterización de las pérdidas por infiltración con análisis estadístico de precipitación y escurrimiento. Ribagua, 3(1), 18-24.
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Durán, Z.V.H., Rodríguez, P.C.R., Cuadros, T.S., Francia, M.J.R. 2014. Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. Ecosistemas 23(1):66-72. Doi.: 10.7818/ECOS.2014.23-1.12
- Durocher, M.G. (1990): «Monitoring spatial variability of forest interception». Hydrological Process, 4:215-229
- FAO. 2016. Propiedades físicas del suelo. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>. [15 Junio 2017].

- Feyereisen, G. W., T. C. Strickland, D. D. Bosch, C. C. Truman, J. M. Sheridan, and T. L. Potter 2008. Curve number estimates for conventional and conservation tillages in the southeastern Coastal Plain. *J. Soil Water Conservation* 63 (3): 120–128.
- Figueroa, L. F. M., & Rivera, H. G. (2015). Pronostico Hidrológico de Caudales Diarios en el Río Fonce (San Gil) Mediante Correlación de Pearson Lluvia-Escorrentía en Épocas de Aguas Bajas. *L'esprit Ingénieux*, 6(1).
- Flores Ayala, Eulogio, Guerra De la Cruz, Vidal, Terrazas González, Gerardo H., Carrillo Anzures, Fernando, Islas Gutiérrez, Fabián, Acosta Mireles, Miguel, & Buendía Rodríguez, Enrique. (2016). Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 65-76.
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., Roberto, M., y Javier, M. (2010). Estimación Del Ecurrimiento Superficial Con El Método SCS-CN En El Trópico Subhúmedo De México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71–78.
- Gamba, J. M., Perricone, L., Illa, C., y Pérez, M. A. (2020). Comportamiento de variedades de maní de diferente ciclo en áreas de expansión de siembra en Córdoba Argentina. *South American Sciences*, 1(2), e2045-e2045.
- George, J., L. Baby, A. P. Arickal and J. Dev Vattoly. 2016. Land Use/Land cover Mapping With Change Detection Analysis of Aluva Taluk Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Science, Engineering and Technology* 4(2): 383-389.
- Foody, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80(1): 185-201.
- García, E., & Mosiño, P. (1973). Los climas de México. México, DF: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, L., & Sánchez, J. A. (2012). Dinámica de la humedad del suelo y la fitomasa de raíces en ecosistemas de la Sierra del Rosario, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 35(1), 79-98.
- Hertel, D. *et al.* Size and structure of fine root systems in old-growth and secondary tropical montane forest (Costa Rica). *Biotropica* 35:143. 2003.
- Huerta-Olague, J. D. J., Oropeza Mota, J. L., Guevara Gutiérrez, R. D., Ríos Berber, J. D., Martínez Menes, M. R., Barreto García, O. A., ... y Mancilla Villa, O. R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia (Arica)*, 36(2), 153-162.
- INEGI 2000. Cambiar por Hernández-García, M. A., & Granados-Sánchez, D. (2006). El parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(2), 101-109.

- Kirkby, M. (2002). Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. *Catena*, 46(2-3), 89-102.
- LeSueur, H. 1945. The ecology of the vegetation of Chihuahua, Mexico, north of parallel 28. Univ. Texas Publ. 4521. Austin. 92 pp.
- Lima Jacopa, J:L. 2003. Efecto de la Arvejilla (*Vicia villosa* Roht) bajo 3 densidades de siembra como cobertura sobre la erosión hídrica Provincia Camacho. Tesis. La Paz U.M.S.A p. 11, 15, 16 y 59.
- Little, E. L. 1962. Variación y evolución en los pinos mexicanos. Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas. Inst. Nac. Invest. Forest. Publ. Esp. 1. México, D.F. 94-107 pp.
- Loch, R. J. 2000. Effects of Vegetation Cover on Runoff and Erosion under Simulated Rain and Overland Flow on a Rehabilitated Site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 38: 299-312.
- Lomas-Barrié, C.; Terrazas-Domínguez, S. y Tchikoué Maga, H. 2005. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11: 57-71.
- López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, A. A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 37-56.
- López-Santos, A., González-Cervantes, G., Cadena-Zapata, M., & González-Barrios, J. L. (2011). Efecto de la labranza sobre la porosidad de un suelo arcilloso de pastizal estimada mediante análisis de imagen. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 33-43.
- Lozano-García, S. (1984). Interpretaciones sobre la lluvia de polen en la Región de San Luis Potosí, México. *Botanical Sciences*, (46), 53-74.
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G. O., y Santiago-Martínez, G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66.
- Marin Sosa, M. I., Pascual Ramírez, F., y Paz Pellat, F. (2017). Bases de datos de mediciones de precipitación-escurrimiento-erosión-sedimentación con énfasis en el centro de México. *Elementos Para Políticas Públicas*, 1(3), 51–74. <http://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/29/34>
- Melo Gallegos, C., y Oropeza Orozco, O. (1982). Bases geográficas para la reestructuración operativa del parque nacional Zoquiapan, Edo. de México. *Investigaciones geográficas*, (12), 19-64.
- Meritano Arenas, J. (1975). Geología básica para estudiantes de ingeniería (No. 550 M4).

- Meyer, L. D., & Wischmeier, W. H. (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions of the ASAE, 12(6), 754-0758.
- Miranda Casas, R. 1995. Caracterización física y química de los suelos del Cantón de "San José de Llanga" y su relación con asociaciones vegetales. Tesis. La Paz. U.M.S.A p. 9 y 10.
- Miranda, F., & Hernández-X, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Botanical Sciences, (28), 29-179.
- Morgan, R. 1997 Erosión y Conservación del suelo. Madrid, España Mundi Prensa p. 33 y 184.
- Obieta, M. C., y Sarukhán, J. (1981). Estructura y composición la vegetación herbácea de un bosque específico de *Pinus hartwegii* I. Estructura y composición florística. Botanical Sciences, (41), 75-125.
- Obregón, C., y Lara, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. Espacio y Desarrollo, (25), 49-64.
- Olivares, A., Van Marle, H. S., Pávez, J., y Duran, S. (2008). Efecto de la cobertura de Ñirre (*Nothofagus antarctica*) sobre la producción herbácea en la Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes. Ciencia e Investigación Forestal, 14(1), 55-64.
- Omoro, L. M. A., and P. K. R. Nair. 1993. Effects of mulching with multipurpose-tree pruning's on soil and water run-off under semi-arid conditions in Kenya. Agrofor. Syst. 22: 225-239.
- Ordoñez, L. A. Y., Rodríguez, V. A., Alberto, L., Jorge, B., & Pidal, J. R. H. (2016). Análisis de la erosión laminar en cuatro tipos de cobertura vegetal, con ayuda de la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) en la microcuenca del río Pimenta. Revista GEOESPACIAL, 13, 30-39.
- Ortiz, S. C. A. & Ortiz, V. B., 1990, Edafología. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.
- Osuna-Osuna, A. K., Díaz-Torres, J. D. J., Anda-Sánchez, J. D., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J., y Davila-Vazquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. Revista Ambiente y Agua, 10, 350-362.
- Overmars, K. P. y P. H. Verburg. 2005. Analysis of land use drivers at the watershed and household level: Linking two paradigms at the Philippine forest fringe. International Journal of Geographical Information 19: 125-152.
- Paredes-Gonzalez, A., Monterroso-Rivas, A. I., Rodríguez-Esparza, L. J., & Zamudio-Sánchez, F. J. (2018). Proyección y probabilidad de cambio de uso de suelo en

- Zoquiapan, México: consideraciones para su manejo forestal. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 24(1), 59-71.
- Paz, F., Bautista, E. L., e Isabel Marín Sosa, M. (2017). Validación del modelo expo-lineal precipitación-escurrencimiento en un simulador de lluvia. A validation exercise of the precipitation-runoff expolinear model using a rain simulator. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 329–341. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v35n4/2395-8030-tl-35-04-00329.pdf>
- Paz-Pellat, F., Marín-Sosa, M. I., y Martínez-Menez, M. (2013). Modelo expo-lineal de la precipitación- escurrencimiento en lotes experimentales de largo plazo en cultivos de maíz. IV, 85–97.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rey Contreras, J. A. (1975). Estudio de suelos de la estación de Enseñanza, Investigaciones y Servicios Forestales de Zoquiapan (No. Folleto 3230).
- Ríos, N., Cárdenas, A. Y., Andrade, H., Ibrahim, M., Jiménez, F., Sancho, F., ... & Woo, A. (2007). Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 45, 66-71.
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ª Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 p.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México.
- Santacruz, De L.G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 3 (1): 45 – 54
- Senra, A. (2009). Impacto del manejo del ecosistema del pastizal en la fertilidad natural y sostenibilidad del suelo. *Avances en investigación agropecuaria*, 13(2), 3-16.
- Serrato, F. B., Díaz, A. R., Bermúdez, F. L., y Laguna, E. H. (1999). Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación. *Papeles de Geografía*, (30), 5-15.
- SIAP (2018) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, año 2002. SAGARPA.
- Sosa, M., Galarza, J. L., Lebgue, T., Soto, R., y Puga, S. (2006). Clasificación de las comunidades vegetales en la Región Árida del Estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 53-59.

- Tapia, A. M. (2013). Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra en Veracruz (tesis de licenciatura). INECOL, Veracruz. 77 pp.
- Tito Villca, L. 1996. Manejo y Conservación de suelos. Texto de Consulta. In La Paz U.M.S.A 103 p.
- Tran, H., T. Tran and M. Kervyn. 2015. Dynamics of Land Cover/Land Use Changes in the Mekong Delta, 1973-2011: A Remote Sensing Analysis of the Tran Van Thoi District, Ca Mau Province, Vietnam. *Remote Sensing* 7(3):2899-2925.
- Trimble, S. W. and P. Crosson. 2000. U.S. soil erosion rates. Myth and reality. *Science* 289(5477): 248-250.
- Urbano Terrón, P. 1997 Erosión y Conservación del Suelo. Madrid España Ediciones Mundi Prensa 343 p.
- Vallejos-Barra, O. S., Pizarro-Tapia, R. M., Sandoval, V., Balocchi-Contreras, F. J., Morales-Calderón, C. M., León-Gutiérrez, L., & Vega-Torres, L. P. (2010). Efecto de la vegetación en la intercepción de la precipitación en la precordillera de la región del Maule, Chile. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 207-214.
- Van Reeuwijk, L. P. (2003). Procedimientos para análisis de suelos. Trad. al español por MC Gutiérrez Castorena, CA Tavares E. y CA Ortiz Solorio. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Velázquez, R. F., de la Rosa, A. B., Sánchez, F. Z., Salinas, M. F., y Estrada, E. G. (2001). Determinación a través de pruebas aceleradas, de la vida útil del acabado para exteriores en madera de encino y pino. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(1), 99-105.
- Vich, A. I., Carretero, E. M., Lauro, C., y Pedrani, A. (2012). Uso y recuperación de la cobertura vegetal en el centro oeste de Argentina. *Revista Geográfica*, 139-150.
- Viramontes, D., Descroix, L., y Bollery, A. (2006). Variables de suelos determinantes del escurrimiento y la erosión en un sector de la Sierra Madre Occidental. *Ingeniería Hidráulica En México*, 21(1), 73–83.
- Walling, D. E. (1988). Erosion and sediment yield research—some recent perspectives. *Journal of Hydrology*, 100(1-3), 113-141.
- Wilkinson, B.H., y McElroy, B.J. 2007. The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *GSA Bulletin* 119, 140–156.
- Zavala, CH. F. 1984. Sinecología de la vegetación de la Estación Experimental e Investigación Forestal Zoquiapan, Estado de México y Puebla. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. División de Ciencias y Humanidades, Escuela de Biología. Morelia Michoacán. 164 p.

Zavala, S.B. 1981. Ecología de la Estación Experimental Zoquiapan: (descripción general, vegetación y fauna). Universidad Autónoma Chapingo, Dirección de Difusión Cultural, Departamento de Bosques, 114 p.