

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**CENTRO DE AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

**EROSIÓN Y CONSERVACIÓN DE SUELOS EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE CAFÉ (*Coffea spp.*) EN LA HUASTECA
ALTA DE VERACRUZ**



T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS EN
AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

P R E S E N T A:

MATÍAS EDILBERTO / HERNÁNDEZ SAN ROMÁN

Chapingo, Edo. de México, diciembre de 2001

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. C.

Bib. 96841

**EROSIÓN Y CONSERVACIÓN DE SUELOS EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE CAFÉ (*Coffea* spp.) EN LA REGIÓN HUASTECA ALTA
DE VERACRUZ**

Tesis realizada por **Matías Edilberto Hernández San Román**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR:


DR. JOEL PÉREZ NIETO

ASESOR:

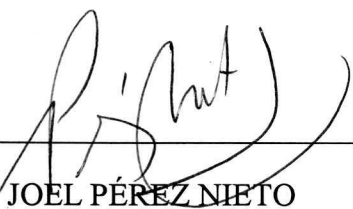

DR. VICTOR ORDAZ CHAPARRO

ASESOR:


DR. LAKSMI. R. KRISHNAMURTHY

**EROSIÓN Y CONSERVACIÓN DE SUELOS EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE CAFÉ EN LA REGIÓN HUASTECA ALTA DE
VERACRUZ**

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de **Matías Edilberto Hernández San Román**, autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible estuvo constituido por:

PRESIDENTE: 
DR. JOEL PÉREZ NIETO

ASESOR: 
DR. VICTOR ORDAZ CHAPARRO

ASESOR: 
DR. L. R. KRISHNAMURTHY

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la vida por los retos que me ha puesto para estar aquí, donde distintos esfuerzos se han sumado.

Manifiesto un amplio agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de maestría y por el financiamiento del proyecto de investigación “Estructura y funcionamiento de dos sistemas agroforestales de café y su efecto en la conservación del suelo” con número de registro 31436-B , sin lo cual hubiera sido difícil lograr esta meta.

Sinceramente, a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por concederme el espacio, así como a sus maestros que me dotaron de conocimientos y experiencias, para asumir una actitud crítica y responsable ante los diferentes paradigmas del desarrollo.

Al Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible y al Programa de Maestría de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, por los apoyos brindados.

Al DR. Joel Pérez Nieto, quien fungió como director de la presente tesis, quién mostró en todo momento su cualidad de investigador, sobre todo por su asesoría en el análisis y sistematización de los resultados de este trabajo.

Al DR. Víctor Ordaz Chaparro, por su apoyo como asesor en la revisión y aportes a este trabajo.

Al DR. L. R. Krishnamurthy, por su apoyo como asesor de la tesis y durante el desarrollo de la maestría.

A la M.C. Elsa Cervera Backhauss coordinadora de la maestría de Agroforestería y a su personal administrativo, especialmente a Dolores Coronel por sus valiosos aportes en el formato de este trabajo.

A la Unión de Ejidos “Nahuatl-Otomí-Tepehua” por habernos abierto sus puertas y a los productores cooperantes que prestaron sus parcelas para realizar la investigación.

A los habitantes de la comunidad de El Coyol, que me brindaron su hospitalidad y confianza durante la fase de campo de este trabajo.

A la Agroforestería, por todos los retos que establece y las grandes expectativas que presenta.

Finalmente, a todos mis amigos que aportaron al desarrollo de este trabajo, mil gracias.

DEDICATORIAS

A ti madre, tu constante preocupación ocupa un espacio especial en mi existir, muchas gracias.

A ti hermano, siempre seré tu amigo.

Al campo, por dar vida.

A las personas honestas que con sus ideales y honradez trabajan por una sociedad justa.

A los que si se pueden contar: mis amigas y amigos.

ÍNDICE DEL TEXTO

	Página
Resumen.....	xvii
Summary	xviii
Introducción	1
2. Revisión de literatura	2
2.1. Definición e importancia de la agroforestería.....	2
2.1.1. Práctica, sistema y tecnología agroforestal	3
2.1.2. Conservación de suelos en agroforestería.....	3
2.2. Plantaciones de café <i>versus</i> sistemas agroforestales de café	5
2.2.1. Condiciones ambientales óptimas para el cultivo de café.....	6
2.2.2. Sistemas de café bajo sombra	7
2.2.2.1. Características y funciones de los árboles de sombra en las plantaciones de café	8
2.2.2.2. Otros beneficios de las plantaciones de café bajo sombra	10
2.2.3. Producción y productividad	11
2.3. Sistemas de producción de café en México	13
2.4. Importancia del cultivo de café en México	14
2.4.1. Beneficios del café bajo sombra en México	15
2.5. Erosión	16
2.5.1. Factores de la erosión.....	16
2.5.2. Formas de erosión	17
2.5.2.1. Erosión eólica.....	17
2.5.2.2. Erosión hídrica	17
2.6. Tolerancia de pérdida de suelo.....	19
2.7. Conservación de suelos en las plantaciones de café	21
2.7.1. Barreras vivas	22
2.7.1.1. Barrera viva de palma camedor (<i>Chamaedorea elegans</i> Mart.)	23
2.7.1.2. Barrera viva de palo de agua (<i>Eupatorium morifolium</i> Mill)	23
2.7.2. Terrazas individuales	24

2.7.3. Terrazas continuas.....	24
2.7.4. Cultivos de cobertura	24
2.7.4.1. Cobertura con canavalia (<i>Canavalia ensiformis</i> (Linneo) De Candolle)..	26
2.7.4.2. Cobertura con cacahuatillo forrajero (<i>Arachis pintoi</i> Krap & Greg nom. Nud. (Cook))	27
2.8. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)	27
2.8.1. Factor erosividad (R) de la lluvia	28
2.8.2. Índice de erosividad de la lluvia.....	29
2.8.2.1. Índice de Wischmeier (EI_{30}).....	29
2.8.2.2. Índice de Hudson ($KE > 25$ mm)	30
2.8.2.3. Índice de Lal (AI_m).....	31
2.8.2.4. Índice de Roose-Delwaulle (R_m)	31
2.8.2.5. Índice de Fournier modificado (F_m)	32
2.8.3. Factor erosionabilidad (K) del suelo	32
2.8.4. Factor longitud y grado (LS) de la pendiente	35
2.8.4.1. Longitud (L) de la pendiente	35
2.8.4.2. Grado (S) de la pendiente	36
2.8.5. Factor cobertura y manejo (C) del suelo	38
2.8.6. Cobertura del suelo	39
2.8.6.1. Cobertura vegetal	39
2.8.6.1.1. Coberturas vegetales permanentes	41
2.8.6.1.2. Coberturas vegetales temporales.....	42
2.8.7. Manejo de residuos de cosecha	43
2.9. Conclusiones de revisión de literatura	46
3. Objetivos e hipótesis	48
3.1. Objetivos	48
3.1.1. Objetivo general	48
3.1.2. Objetivos específicos	48
3.2. Hipótesis.....	48

4. Materiales y métodos	50
4.1. Descripción del área de estudio.....	50
4.1.1. Localización del área de estudio	50
4.1.2. Geología	50
4.1.3. Fisiografía y relieve.....	50
4.1.4. Clima.....	52
4.1.5. Hidrología	52
4.1.6. Suelos	52
4.1.6.1. Clasificación de los suelos	53
4.1.7. Vegetación.....	59
4.1.8. Características sociales.....	60
4.1.8.1. Educación.....	60
4.1.8.2. Salud.....	60
4.1.8.3. Cultura.....	61
4.1.9. Características económicas	61
4.1.9.1. Población ocupada	61
4.1.9.2. Agricultura	62
4.1.9.3. Ganadería	63
4.1.9.4. Forestal.....	63
4.1.9.5. Volumen y valor de la producción del café	63
4.1.9.6. Apoyos a la producción.....	63
4.2. Características del manejo de los cafetales en la comunidad de El Coyol.....	63
4.3. Descripción de los sistemas y tratamientos estudiados.....	64
4.3.1. Medición del área de las parcelas experimentales	66
4.3.2. Características de los tratamientos	67
4.3.3. Determinación de las características del suelo.....	72
4.4. Determinación de la precipitación, el escurrimiento y la pérdida de suelo	72
4.4.1. Medición de la precipitación.....	72
4.4.2. Determinación del escurrimiento	73

4.4.2.1. Determinación del coeficiente de escurrimiento.....	74
4.4.2.2. Pérdida de nutrimentos por escurrimiento	75
4.4.2.3. Condición de humedad antecedente.....	75
4.4.3. Determinación de la pérdida de suelo	75
4.4.4. Predicción de la pérdida de suelo mediante la EUPS	76
4.4.4.1. Erosividad de la lluvia (R).....	76
4.4.4.2. Erosionabilidad del suelo (K).....	78
4.4.4.3. Longitud (L) y grado (S) de la pendiente	78
4.4.4.4. Factor manejo y cobertura vegetal (C).....	80
4.4.4.5. Prácticas de conservación (P)	82
5. Resultados y discusión	84
5.1. Caracterización de las parcelas experimentales	84
5.1.1. Área de las parcelas.....	84
5.1.2. Propiedades físicas de los suelos en los tratamientos	85
5.1.3. Propiedades químicas de los suelos en los tratamientos	86
5.2. Precipitación.....	86
5.3. Escurrimiento superficial	88
5.4. Coeficiente de escurrimiento.....	90
5.5. Pérdida de nutrimentos en el escurrimiento superficial	91
5.6. Pérdida de suelo	92
5.7. Pérdida de suelo estimada por la EUPS ajustada	94
5.7.1. Erosividad de la lluvia (R).....	94
5.7.2. Erosionabilidad del suelo (K).....	97
5.7.3. Longitud y grado de la pendiente (LS).....	97
5.7.4. Cobertura y manejo del suelo.....	99
5.8. Pérdida de suelo estimada	104
6. Conclusiones	106
7. Recomendaciones.....	108
8. Revisión de literatura	109

8.1. Literatura citada	109
8.2. Literatura consultada.....	118

CUADROS

Cuadro 1. Comparación de la producción de materia orgánica de un bosque caducifolio y el cafetal	7
Cuadro 2. Rendimiento de café y cultivos intercalados	12
Cuadro 3. Predominancia de sistemas de cultivo por regiones cafetaleras (%), 1994.....	15
Cuadro 4. Valores de tolerancia de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)	21
Cuadro 5. Pérdida de agua en dos sistemas de café bajo sombra y cultivo de maíz	22
Cuadro 6. Distanciamiento de las barreras vivas y/o muertas en el cultivo de café	22
Cuadro 7. Efecto de la longitud y grado de la pendiente sobre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial.....	36
Cuadro 8. Efecto de la pendiente y manejo del suelo sobre las pérdidas de suelo ($t\ ha^{-1}$) y el escurrimiento superficial (mm) durante la primera estación de 1973	37
Cuadro 9. Relación entre pérdidas de suelo con el grado de pendiente para diferentes tratamientos durante 1973	38
Cuadro 10. Infiltración del agua en áreas con diferentes coberturas vegetales en Colombia.....	42
Cuadro 11. Pérdidas de suelo y escurrimiento superficial con diferentes coberturas en Brasil.....	42
Cuadro 12. Superficie sembrada y cosechada por año agrícola y tipo de cultivo..	62
Cuadro 13. Labores culturales en los cafetales bajo sombra de la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	65
Cuadro 14. Determinación de la cobertura por mantillo ajustada por tratamiento.....	82
Cuadro 15. Valores propuestos del factor C de la EUPS para sistemas agroforestales de café.....	82

Cuadro 16. Área de las parcelas experimentales por tratamiento según el método de medición	84
Cuadro 17. Distribución de lluvias registradas de junio a diciembre del año 2000 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	88
Cuadro 18. Pendientes de la curva de regresión (b) y coeficientes de determinación (R^2) entre el escurrimiento y la condición de humedad antecedente (CHA)†	90
Cuadro 19. Lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento en parcelas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	90
Cuadro 20. Distribución del número de lluvias erosivas y EI_{30} de acuerdo a su magnitud	94
Cuadro 21. Erosionabilidad del suelo (K) obtenido para cada tratamiento de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	97
Cuadro 22. Longitud de la pendiente (λ) por tratamiento.....	98
Cuadro 23. Cálculo para el valor de β y m por tratamiento	98
Cuadro 24. Valores de LS por tratamiento de café bajo sombra en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	98
Cuadro 25. Cobertura (%) en los tratamientos de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	99
Cuadro 26. Coeficientes de determinación (R^2) entre cobertura y pérdida de suelo con distintos modelos de predicción	100
Cuadro 27. Factor C de la EUPS en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	102
Cuadro 28. Estimación de la pérdida de suelo en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	104

FIGURAS

Figura 1. Factores que determinan el cultivo de café con sombra y sin sombra.....	5
Figura 2. Producción de café sin sombra y con un 50% de sombra en función de la altitud y de la calidad de los suelos	12
Figura 3. Ubicación geográfica de la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	51
Figura 4. Perfil del sitio 1 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	55

Figura 5. Perfil del sitio 2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	58
Figura 6. Plano del sistema agroforestal de café rusticano (T1).....	67
Figura 7. Plano del policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palo de agua (<i>Eupatorium morifolium</i> Mill) y terrazas individuales (T2).....	68
Figura 8. Plano de la plantación de café bajo sombra temporal con cobertura de canavalia (<i>Canavalia ensiformis</i> (Linneo) De Candolle) (T3).....	69
Figura 9. Plano del policultivo de café tradicional mejorado con cobertura de cacahuatillo forrajero (<i>Arachis pintoii</i> Krap & Greg nom. Nud. (Cook)) (T4).....	70
Figura 10. Plano de policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palma camedor (<i>Chamaedorea elegans</i> Mart) y palo de agua (<i>Eupatorium morifolium</i> Mill) (T5).....	71
Figura 11. Ejemplo del muestreo de suelo realizado en las parcelas experimentales en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	72
Figura 12. Pluviómetro II marca Davis utilizado para medir la precipitación en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	73
Figura 13. Equipo de muestreo de escurrimiento y pérdida de sedimentos colocado en cada uno de los tratamientos en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	74
Figura 14. Relación del área de las parcelas experimentales de café bajo sombra determinada mediante dos métodos de medición.....	85
Figura 15. Precipitación mensual observada de junio a diciembre del año 2000 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	87
Figura 16. Escurrimiento mensual observado por tratamiento en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	88
Figura 17. Escurrimiento observado por tratamiento en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	89
Figura 18. Pérdida de nutrimentos por escurrimiento superficial en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	91
Figura 19. Pérdida de suelo total observada por tratamiento en café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	93
Figura 20. Relación escurrimiento y pérdida de suelo total en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	94
Figura 21. Erosividad mensual de la lluvia en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	95

Figura 22. Relación EI_{30} y precipitación en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	96
Figura 23. Coberturas de suelo para calcular el factor C	101
Figura 24. Relación entre la pérdida de suelo estimada y observada en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.....	105

ÍNDICE DE ANEXOS

CUADROS

	Página
Cuadro A1. Características físicas y químicas del suelo en el Sitio 1 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	120
Cuadro A2. Características físicas y químicas del suelo en el Sitio 2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	121
Cuadro A3. Características químicas del suelo por tratamiento de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	122
Cuadro A4. Precipitación observada de junio a diciembre en El Coyol, Tlachichilco, Ver.	124
Cuadro A5. Ejemplo de cálculo de la erosividad de la lluvia (EI_{30}) en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000†	126
Cuadro A6. Erosividad de la lluvia (EI_{30}) para eventos mayores e iguales a 12.7 mm en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	128
Cuadro A7. Volumen de agua (L) captada en los tinacos por evento de lluvia que provocó escurrimiento por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	130
Cuadro A8. Volumen de agua escurrida (m^3) por evento de lluvia que provocó escurrimiento por parcela experimental (tratamiento) en los sistemas de café bajo sombra estudiados en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	131
Cuadro A9. Coeficientes de escurrimiento (%) por evento que provocó escurrimiento y tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	135

Cuadro A10. Pérdida de nutrientes en el escurrimiento superficial por tratamiento y fecha de muestreo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	136
Cuadro A11. Concentración de sedimentos (g) por cantidad de agua muestreada (L) por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	140
Cuadro A12. Pérdida de suelo (kg) por evento de lluvia que provocó escurrimiento por parcela experimental (tratamiento) en los sistemas de café bajo sombra estudiados en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	141
Cuadro A13. Pérdida de suelo (kg ha ⁻¹) por evento de lluvia que provocó escurrimiento y tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	142
Cuadro A14. Códigos de estructura del suelo para su uso en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para la determinación del factor K	149
Cuadro A15. Códigos de permeabilidad para su uso en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para la determinación del factor K	149
Cuadro A16. Ejemplo de cálculo del grado de pendiente promedio para el tratamiento T2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	150
Cuadro A17. Espaciamiento entre terrazas al considerar la pendiente y la lámina de precipitación	153

FIGURAS

Figura A1. Relación precipitación-escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente I por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	132
Figura A2. Relación precipitación-escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente II por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	133
Figura A3. Relación precipitación-escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente III por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.....	134
Figura A4. Relación de la pérdida de nitratos con el escurrimiento superficial en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	137
Figura A5. Relación de la pérdida de potasio con el escurrimiento	

superficial en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	138
Figura A6. Relación de la pérdida de sodio con el escurrimiento superficial en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	139
Figura A7. Relación entre pérdida de suelo y escurrimiento a través del tiempo por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	143
Figura A8. Relación entre pérdida de suelo y escurrimiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	144
Figura A9. Relación entre pérdida de suelo acumulada y EI_{30} acumulado por mes en cada tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	145
Figura A10. Relación entre el factor longitud y grado de la pendiente con la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000	146
Figura A11. Efecto de la cobertura vegetal aérea sobre la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Según muestreo de julio del 2000	147
Figura A12. Efecto de la cobertura vegetal aérea sobre la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Según muestreo de diciembre del 2000	148

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo observada y estimada por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) ajustada, obtenida en cinco sistemas agroforestales de café (*Coffea* spp.), de junio a diciembre del año 2000. Los experimentos se establecieron en parcelas de productores de la Unión de Ejidos “Nahuatl-Otomí-Tepehua” en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver. Los tratamientos evaluados fueron: Sistema tradicional de café rusticano (T1), Policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) y terrazas individuales (T2), que se encuentran sobre un suelo Mollisol o Phaeozem Gleyico; Plantación de café bajo sombra temporal con cobertura de *Canavalia ensiformis* Linneo (T3), Policultivo de café tradicional mejorado con cobertura de *Arachis pintoi* Krap & Greg (T4) y Policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart) y palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) (T5), éstos en un suelo Inceptisol o Cambisol Crómico. En cada tratamiento se colocó un vertedor tipo H, un muestreador y dos tinacos recolectores para medir el escurrimiento y los sedimentos que se produjeron por evento de lluvia. El escurrimiento total para cada parcela se comportó de la siguiente manera: T2>T1>T3>T4>T5 y la pérdida de suelo T4>T3>T5>T1>T2. Los coeficientes de escurrimiento oscilaron entre 8 y 11% y la pérdida de suelo entre 0.4 y 2.0 t ha⁻¹ año⁻¹, mostrando una correlación negativa ($r = -0.62$). Los tratamientos T1 y T2 mostraron mayor escurrimiento superficial y menor pérdida de suelo debido a su mayor contenido de materia orgánica en el suelo, mayor cobertura arbustiva y superficial, y a la presencia de barreras vivas y terrazas individuales para el caso del tratamiento T2. La EUPS ajustada simuló satisfactoriamente la tasa anual de pérdida de suelo con una sobreestimación de 7 a 22 veces. Asumiendo una erosividad constante, la pérdida de suelo se asocia de manera negativa con el escurrimiento en sistemas agroforestales de café y su variación se explica por el contenido de materia orgánica, la cobertura por dosel de arbustos y mantillo y a las prácticas eficientes de conservación de suelos.

Palabras claves: Agroforestería, café bajo sombra, lluvia, escurrimiento superficial, erosión del suelo.

SUMMARY

The present research was conducted to estimate the surface run-off and soil loss in five coffee-based agroforestry systems using the Universal Soil Loss Equation (USLE) from June through December 2000. The experiments were established on the farmlands belonging to the "Unión de Ejidos Nahuatl-Otomí-Tepehua" of the community El Coyol, Tlachichilco, Veracruz". The following treatments were evaluated: Coffee rustic traditional system (T1), Traditional system improved with hedgerows of "palo de agua" (*Eupatorium morifolium* Mill) and live terraces (T2) both in Mollisol or Phaeozem Gleyico soils; Coffee under temporal shade of canavalia cover crop (*Canavalia ensiformis* L.) (T3), traditional coffee system improved with Cacahuatillo (*Arachis pinto* Krap & Greg) as cover crop (T4) and traditional coffee system improved with hedgerows of "palma camedor" (*Chamaedorea elegans* Mart) and "palo de agua" (*Eupatorium morifolium* Mill) (T5), these ones in Inceptisol or Cambisol Crómico soils. Each treatment employed a H-flume, one sampler and two collectors to measure the run-off and sediments produced by rain events. The results indicate the following pattern for total run-off volume: $T2 > T1 > T3 > T4 > T5$ and for the soil loss $T4 > T3 > T5 > T1 > T2$. The run-off ratios varied between 8 and 11% and the soil loss between 0.4 y 2.0 t ha⁻¹ year⁻¹, showing a negative correlation ($r = -0.62$). The treatments T1 and T2 suffered more surface run-off and less soil loss for their high organic matter content, higher shrubs cover and by the presence of hedgerows and living terraces for T2. The annual ratio of soil loss was satisfactorily simulated by the adjusted USLE, overestimating it between 7 and 22 times. Assuming a constant rate of erosion, the lose of soil is linked negatively with the run-off in coffee-based agroforestry systems and its variation is explained by the slope, shrubs canopy cover, mulch and efficiency of practices for soil conservation.

Key words: Agroforestry, coffee under shadow, rain, surface run-off, soil erosion.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas fuertes ocasionados al suelo con las prácticas de manejo convencional es la erosión, que a la vez genera un decremento en su fertilidad. Por otra parte la agroforestería esta considerada dentro de los sistemas o prácticas de producción que pueden conservar al suelo y revertir los daños ocasionados por su mal manejo. Bajo esta perspectiva, los agricultores de la Unión de Ejidos “Nahuatl-Otomí-Tepehua” (UENOT), cuya área de influencia es la región Huasteca Alta de Veracruz y ante la crisis económica por la que atraviesa la producción de café, han implementado un Programa de Agroecología que incluye la introducción de árboles de uso múltiple en sus cafetales, así como la construcción de terrazas individuales y de muro vivo para conservar los recursos suelo y agua.

Con el propósito de evaluar el impacto de las prácticas que han llevado a cabo los productores de la UENOT se realizó la presente investigación. Para ello se seleccionaron cinco parcelas de producción de café bajo sombra establecidas por los productores, en donde se instalaron el mismo número de tratamientos, de los cuales en dos se introdujo como cultivo de cobertura: *Canavalia ensiformis* L. y *Arachis pinto*i Krap & Greg.

La erosión hídrica del suelo se midió directamente en cada uno de los tratamientos de café bajo sombra, para este fin se les colocó un vertedor y un muestreador de escurrimiento y sedimentos. Asimismo, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), evaluando cada uno de los factores que interviene en el proceso de la erosión, como son: la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, las características de la pendiente, el manejo y cobertura, y las prácticas de conservación, lo cual permitió conocer el efecto de cada uno de los factores y su interrelación en el proceso de la erosión hídrica del suelo. Los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos indicaron que una mayor cobertura del suelo, la presencia de prácticas de conservación y la existencia de un buen contenido de materia orgánica, son factores atenuantes de la erosión del suelo, donde la agroforestería en función del arreglo de sus componentes y manejo puede ser determinante para disminuir la degradación del suelo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición e importancia de la agroforestería

Se entiende por agroforestería, a la coexistencia del componente árbol con un cultivo dentro del sistema de producción; sin embargo, cada autor ha puesto cierto énfasis al concepto, en función de sus experiencias generadas y a la concepción que se ha ido forjando sobre esta disciplina.

La agroforestería ha recibido atención en los últimos años, porque se cree que los sistemas agroforestales son más sostenibles que los monocultivos, especialmente en el caso de pequeñas explotaciones agrícolas, donde hay limitaciones socioeconómicas y biofísicas (Beer, 1996). Como disciplina, la agroforestería es considerada nueva (Torquebiau, 1993). Como práctica se considera ancestral (Budowski, 1993).

Los sistemas agroforestales se definen como una serie de sistemas y tecnologías de uso de la tierra en los que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos, en función del tiempo y espacio para incrementar y optimizar la producción en forma sostenida (Fassbender, 1993).

Somarriba (1990) citado por Fassbender (1993) define a la agroforestería como un cultivo múltiple que cumple tres condiciones fundamentales: 1) deben existir dos especies de plantas que interactúan biológicamente, 2) uno de los componentes es una planta leñosa perenne, 3) el otro componente es una planta manejada con fines agrícolas (incluyendo pastos). Cada componente puede estar representado por más de un género, especie o variedad dentro del sistema.

De acuerdo a Lundgren (1987), el objetivo de la agroforestería es optimizar interacciones positivas entre los componentes, de tal manera que el sistema de producción pueda ser más sostenible y diversificado que el enfoque convencional bajo las condiciones agroecológicas y socioeconómicas dadas. También señala que la agroforestería es un nombre colectivo para todos los sistemas y prácticas de uso de la

tierra donde plantas leñosas perennes se siembran deliberadamente en la misma unidad de tierra con cultivos agrícolas y/o animales, en combinaciones espaciales o en secuencia temporal.

Los sistemas agroforestales tienen una función productiva, generan uno o más productos gracias a la naturaleza de uso múltiple del componente perenne leñoso asociado, que satisface principalmente las necesidades básicas, así como también un papel de servicio a través de la protección y mantenimiento de los sistemas de producción, como es la conservación del suelo, que puede ser expresada en términos de contribución para aumentar la sostenibilidad de la producción de cultivos. En la agroforestería la producción es una consideración importante; sin embargo, es el atributo de la sostenibilidad lo que la hace diferente de otros enfoques de uso de la tierra (Nair, 1997).

2.1.1. Práctica, sistema y tecnología agroforestal

De acuerdo a Nair (1997) las palabras “sistemas” y “prácticas” comúnmente son utilizadas como sinónimos en agroforestería. Sin embargo, un sistema agroforestal es un ejemplo local específico de una práctica, caracterizado por el ambiente, especies vegetales y su arreglo, manejo y funcionamiento socioeconómico; mientras que una práctica agroforestal denota un arreglo característico de componentes en espacio y tiempo. Asimismo, el término tecnología agroforestal, se refiere a una innovación o mejoramiento, producto de un trabajo científico, ya sea para modificar un sistema o práctica existente o para desarrollar una nueva.

Actualmente existen clasificadas veinte prácticas agroforestales, donde encajan cientos de sistemas agroforestales. El sistema de plantación de café bajo sombra esta agrupada dentro de la práctica agroforestal denominada “combinaciones de cultivos y plantaciones” (Nair, 1991), citado por Nair (1997).

2.1.2. Conservación de suelos en agroforestería

Smith y Whitt (1948) citados por Johnson (1987) consideran que el objetivo fundamental de la conservación de suelos es el mantenimiento de su fertilidad, para sostener una producción de cultivos indefinidamente. La función de conservación del

suelo en los sistemas agroforestales, incluye el control de la erosión como el mantenimiento de la fertilidad (Young, 1989).

Nair (1997), señala efectos benéficos y adversos que algunos autores atribuyen a los árboles sobre el suelo y en consecuencia a los cultivos.

Efectos benéficos de los árboles sobre el suelo:

- Mantenimiento o aumento de la materia orgánica, que contribuye a conservar y mejorar la fertilidad de los suelos.
- Fijación de nitrógeno a través de especies leguminosas.
- Reducción de la velocidad del viento.
- Reducción de la erosión.
- Recuperación de nutrimentos, los sistemas raíz-árbol interceptan, absorben y reciclan nutrimentos de los horizontes más profundos del suelo, que de otra forma se perderían por lixiviación.
- Mantenimiento o mejoramiento de la estructura del suelo y en consecuencia de la porosidad y retención de humedad.
- Reducción de la acidez, los árboles tienden a moderar los efectos de la lixiviación mediante la adición de bases a la superficie del suelo.
- La sombra que proporcionan los árboles disminuye el efecto de la irradiación solar sobre el suelo, contribuyendo así a la reducción de la pérdida de materia orgánica por oxidación, lo que aumenta la actividad biológica del suelo. Asimismo, la cubierta de hojarasca y otros desechos reducen las altas temperaturas de la superficie del suelo.

Efectos adversos de los árboles sobre el suelo:

- Pérdida de materia orgánica y nutrimentos en la cosecha de árboles, principalmente cuando se hace una cosecha completa.
- Competencia por nutrimentos y agua entre árboles y cultivos.

- Producción de sustancias que inhiben la germinación o el crecimiento.

Algunos de los aspectos mencionados requieren mayor estudio, dado que los conocimientos científicos sobre desarrollo radicular de las especies y competencia por nutrimentos son escasos cuando dos o más cultivos crecen juntos. Además, las condiciones biofísicas y el tipo de especies que se elijan para incorporar en los sistemas de producción agroforestal son determinantes de los efectos adversos o benéficos que se puedan producir dentro del sistema.

2.2. Plantaciones de café *versus* sistemas agroforestales de café

De acuerdo a Muschler (1997) los factores principales para decidir si se produce café de sombra o sol, se organizan en tres grupos (Figura 1).

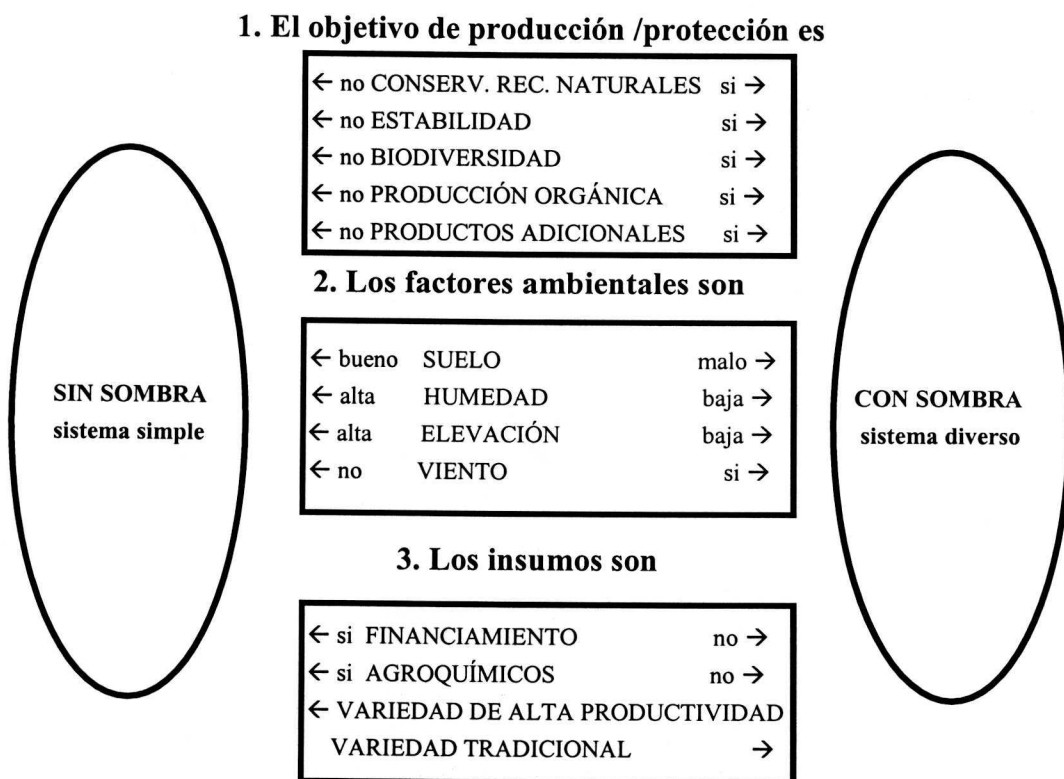


Figura 1. Factores que determinan el cultivo de café con sombra o sin sombra.

De acuerdo con este esquema, el primer grupo se enfoca a los objetivos de producción y protección de recursos. En este grupo el productor optaría por un sistema con sombra si

los objetivos de producción y protección incluyen la conservación del suelo, el agua y la biodiversidad, también lo haría si se interesara por la producción de café orgánico y/o productos adicionales de los árboles. El segundo grupo, se enfoca a las condiciones ecológicas de una finca y sus limitaciones: suelos pobres, deficiencia de agua, estrés microclimático a elevaciones menores y vientos fuertes, en este caso se favorece el uso de sombra o de árboles para rompevientos. El tercer grupo de factores determinantes consiste en insumos que pueden ser utilizados para reducir las limitaciones ambientales. En la mayoría de los casos, el monocultivo sin sombra puede ser sostenido solamente mientras haya financiamiento y agroquímicos. Este último sistema incluye variedades de alta productividad, mientras que las variedades tradicionales se adaptan mejor a ambientes con sombra Wrigley (1988); Fernández y Muschler (1997) citados por Muschler (1997).

2.2.1. Condiciones ambientales óptimas para el cultivo de café

El café es un arbusto originario de Etiopía, crece bajo el dosel de los árboles de las selvas tropicales. De las 6,000 especies del género *Coffea*, se consumen dos tipos: *Coffea arabica* o café del tipo arábica, que representa el 70% de la producción mundial, y el *Coffea canephora*, especie conocida comúnmente como “robusta”. En las selvas tropicales húmedas y en condiciones de sombra crecen las variedades tradicionales del tipo arábica, “typica” y “bourbon” (CCA, 1999).

Las condiciones óptimas requieren de temperaturas promedio de 18 a 22 °C, sin riesgo de heladas en invierno, con temperaturas máximas en primavera-verano por abajo de los 30 °C, precipitaciones bien distribuidas en el año de 1,400 a 2,000 mm, suelos con más de un metro de profundidad, de textura franca a migajón-arcilloso, pH de 5 a 6, contenidos de materia orgánica por arriba del 7%. Las altitudes en donde el rendimiento en beneficio y calidad en taza son mejores se ubica a una altitud mayor de los 700 m (Barrientos, 1990). Las variedades de café cultivadas a mayor altitud suelen desarrollar más acidez y aroma, lo que mejora su sabor y su valor en el mercado (Santoyo *et al.*, 1996).

2.2.2. Sistema de café bajo sombra

Actualmente que el valor económico del café es muy bajo, los árboles de sombra han sido una fuente adicional de ingresos para los productores que han utilizado especies con fines comerciales (Ramírez y González, 1990; Escamilla, 1993).

Las plantaciones de café con sombra son agroecosistemas que imitan la estructura de un bosque natural, aunque los componentes florísticos no son comparables, pueden ser similares desde el punto de vista funcional (Cuadro 1), ya que los árboles mantienen el equilibrio de los nutrientes y microorganismos, a través de la recirculación de la materia orgánica y los nutrientes (Jiménez, 1982; Escamilla, 1993).

Cuadro 1. Comparación de la producción de materia orgánica de un bosque caducifolio y el cafetal

Tipos de estructura	Producción de materia orgánica kg ha ⁻¹ año ⁻¹
Bosque caducifolio	8,090
Cafetal	9,260
Mixto (<i>Coffea arabica</i> , <i>Inga jinicuil</i> Sch., <i>Inga</i> c.f. <i>leptoloba</i> , <i>Musa</i> c.f. <i>sapientum</i> L., <i>Citrus sinensis</i> Obs.)	
Sombra 1 (<i>Coffea arábica</i> , <i>Inga jinicuil</i> Sch.)	8,467
Sombra 2 (<i>Coffea arábica</i> , <i>Inga</i> c.f. <i>leptoloba</i>)	7,470
Al sol (<i>Coffea arábica</i>)	5,686 [†]

[†] El aporte del estrato herbáceo corresponde a 3,420 kg ha⁻¹ año⁻¹ (dos limpiezas con azadón) y la otra fracción proviene de los cafetos.

Fuente: Jiménez, 1982.

Aún en condiciones de buen manejo, la producción bajo sombra es menor que la que se obtiene en plantaciones a pleno sol. La razón del cultivo de café bajo sombra es propiciar un microclima óptimo, que provea la cantidad y calidad de luz solar necesaria para el proceso de fotosíntesis, así como las condiciones adecuadas de temperatura y humedad del ambiente; por lo que la sombra requiere cierto manejo, ya que en exceso reduce la capacidad fotosintética de los cafetos y propicia el desarrollo de enfermedades fungosas tales como: roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*, Berck y Br.), ojo de gallo (*Mycena citricolor*, Berck y Curt), Koleroga o mal de hilachas (*Corticium koleroga*,

Cooke, Van Hocht) y requemo (*Phoma costarricensis*, Ech) y en consecuencia afecta los niveles de producción (Ramírez y González, 1990; ANACAFE, 1999).

Respecto al tipo de sombra, Villaseñor (1987) señala que en los cafetales se debe sustituirse la sombra de la montaña por sombra plantada *exprofeso*, preferentemente con una mezcla de diferentes especies del género *Inga*. Jiménez y Golberg (1982) consideran que un tipo de sombra especializada es de mejor uso funcional, dado que la evapotranspiración es menor seguidos por cafetales con estructuras “mixtas”, mientras que los valores más altos se registran en el cafetal a pleno sol.

El número de árboles de sombra, depende de varios factores: del diámetro de la copa del árbol, del clima y la fertilidad del suelo donde esté establecido el cafetal, para zonas bajas es recomienda un máximo de 100 árboles de *Inga* spp. por hectárea, sembrados entre las hileras de los cafetos a una distancia de 10 x 10 m. El número de árboles debe disminuir paulatinamente a medida que los cafetales se localicen a mayor altura sobre el nivel del mar. Este criterio es también aplicado en el caso de los suelos, de mayor a menor fertilidad o bien con presencia o ausencia de nemátodos (Ramírez y González, 1990). El Instituto Mexicano del Café (INMECAFE) recomendaba las siguientes densidades de sombra: en zonas bajas de 75 a 100 árboles por hectárea y en zonas altas de 50 a 75 árboles por hectárea (Díaz *et al.*, 1991).

2.2.2.1. Características y funciones de los árboles de sombra en las plantaciones de café

De acuerdo a Beer (1991), ANACAFE (1987) y Monroigi (1997), los árboles para sombra en plantaciones de café deben reunir las siguientes características:

- Compatibilidad con el cultivo, traducida en competencia mínima por agua, nutrimentos y espacio.
- Árboles desiduos que rápidamente generen nuevas hojas para establecer las condiciones originales de sombra.
- Presencia de hojas pequeñas para evitar el efecto de unión de las gotas de lluvia que causan daños por golpeteo.

- Que no sean hospederos de insectos patógenos para el cultivo principal.
- Crecimiento rápido y de larga duración.
- Ramas y tallos no quebradizos (resistencia al viento).
- Sistema radical profundo.
- Fuste mediano y de ramas extendidas que permitan una adecuada filtración de los rayos del sol.
- Capacidad fijadora de nitrógeno.
- Buena respuesta a la poda.
- Fácil propagación, sin capacidad de reproducirse como especie invasora y adaptación a los climas cafetaleros.
- Aporte suficiente de materia orgánica al suelo.
- En el caso de especies con fines maderables se deben elegir principalmente aquellas que tengan un diámetro de copa pequeño y de rápido crecimiento apical.

Los beneficios o daños que el café pueda recibir de los árboles que le proporcionan sombra, depende mucho de las especies utilizadas y del manejo que se haga de los mismos. En principio, la sombra tiene un efecto regulador de las condiciones ambientales que requiere el café para su adecuado desarrollo, reduce la actividad fisiológica del cafeto, sus residuos además de contribuir a mejorar la estructura del suelo, forman una barrera contra la erosión pluvial. Ante una baja en la temperatura, la sombra es un amortiguador que protege considerablemente al cafeto, ya que la diferencia del micro clima que se genera en el cafetal en relación con la del ambiente llega a ser de 4 a 50 °C, disminuye el crecimiento de malas hierbas y prolonga la vida del cafetal Hearer (1956) citado por Goicoechea (1971); Moguel y Toledo (1996).

ANACAFE (1999) incluye otras características de la sombra sobre el cafetal como: enriquecimiento de la biodiversidad del agroecosistema, disminución de la evaporación del agua del suelo y la transpiración del cafeto, descontaminación del ambiente al fijar carbono, los árboles de sombra fijan 15.82 toneladas métricas de carbono por hectárea,

lo que equivale al 17.26% del total de carbono que fija el agroecosistema cafetalero, regulación de los cambios bruscos de temperatura, reducción de daños por la presencia de heladas y contribuye a mejorar la calidad del café, gracias a la maduración lenta del grano.

Algunas de las desventajas de los árboles de sombra son: la competencia que generan por agua, luz y nutrimentos con el cafeto, el goteo que se produce de las hojas grandes de árboles altos puede causar el desprendimiento de flores y frutos que incide sobre producciones más bajas, favorecen el desarrollo de algunas enfermedades, se convierten en hospederos de plagas (Beer, 1996; Monroigi, 1997; ICAFE, 1989 citado por Beer, 1996). De allí, la importancia del manejo, como la poda de los árboles de sombra para proyectar suficiente luz y dar una buena distribución de la misma dentro del cafetal, la poda debe orientarse a descubrir el centro de la copa; se debe calcular de un 30 a 50 por ciento de sombra, dejando un estrato de ramas horizontales alrededor del árbol, a una altura de 2 a 3 metros sobre el nivel superior de los cafetos (ANACAFE, 1987).

2.2.2.2. Otros beneficios de las plantaciones de café bajo sombra

De acuerdo a la CCA (1999), los cafetos y los árboles que le dan sombra, presentan las siguientes ventajas:

- Desempeñan un papel importante en la fijación del carbono, se cree que su valor ambiental crecerá a medida que avance la agenda climática internacional.
- Los cafetales de sombra son un importante hábitat para diversas especies de aves, tanto endémicas como migratorias. Según trabajos recientes de la CCA y del Centro Smithsonian de Aves Migratorias, después de las selvas vírgenes, el café de sombra constituye el mejor hábitat para centenares de distintas especies de aves.
- Contribuyen a conservar la diversidad de los árboles nativos y la biodiversidad de los bosques tropicales. Asimismo, los cafetos de sombra constituyen una importante cubierta vegetal del suelo durante la época de secas, pues preservan el humus y sus nutrimentos y proporcionan hábitats naturales a otras especies, como mamíferos y reptiles.

- A diferencia de los cafés híbridos, de producción intensiva y resistentes al sol, cuya producción depende de plaguicidas y otros agroquímicos, el café de sombra en su mayoría se cultiva orgánicamente.

2.2.3. Producción y productividad

La producción de café al sol es un 40 por ciento mayor que en los cafetales con un 30 por ciento de sombra. La sombra mal manejada contribuye a bajas en la producción, el porcentaje de sombra va en relación con los demás factores de la producción como: la fertilización, el manejo del tejido productivo y el control de plagas, enfermedades y malezas (ANACAFE, 1987).

Los árboles de sombra en el cultivo de café favorecen el desarrollo de frutos de mayor tamaño y evitan la sobreproducción de arbustos jóvenes (Monroigi, 1997). Un estudio realizado por Alarcón *et al.*, (1996), sobre la influencia del sol y la sombra en la calidad y el rendimiento del grano de café de la variedad Isla 614, obtuvieron que la masa fresca alcanzó valores significativamente superiores ($P < 0.01$) en aquellos frutos (café cereza) de plantas cultivadas bajo sombra permanente. Una mayor intensidad de luz contenida en las radiaciones solares, origina una mayor transpiración en las plantas cultivadas a pleno sol, lo que aumenta así su consumo y deja una menor disponibilidad de agua a las plantas, esto ocasiona una disminución de su masa fresca. En torno al crecimiento del fruto, se obtiene un mayor tamaño (largo y ancho) en las plantas cultivadas bajo sombra permanente.

En suelos sin limitaciones de nutrimentos, humedad y sin barreras para enraizamiento (Figura 2A), la producción es mayor en café sin sombra que en café bajo sombra. Fuera de la zona óptima, a elevaciones menores la producción de café sin sombra baja fuertemente debido al estrés por altas temperaturas. En elevaciones mayores la producción sin sombra baja debido a temperaturas mínimas y posibles daños por viento. En estas condiciones subóptimas, la asociación con árboles para proyectar una sombra intermedia y moderar los extremos microclimáticos puede aumentar la producción con respecto al cafetal sin sombra, siempre y cuando la competencia por nutrimentos o agua no sea importante. Este efecto positivo es marcado como “contribución de la sombra” en

la Figura 2. En contraste, la sombra de café en las zonas óptimas reduciría la producción con respecto al cafetal sin sombra. Comparado con suelos “buenos”, la producción de ambos sistemas se reduce en suelos con limitaciones de fertilidad (Figura 2B). Sin embargo, los beneficios ecológicos de los árboles asociados, sobre todo a través del reciclaje de nutrimentos y la adición de materia orgánica, reducirían su efecto con respecto a un cafetal sin sombra. Así la proporción relativa del aporte ecológico de los árboles aumentaría en dichos suelos con limitaciones (Muschler, 1997).

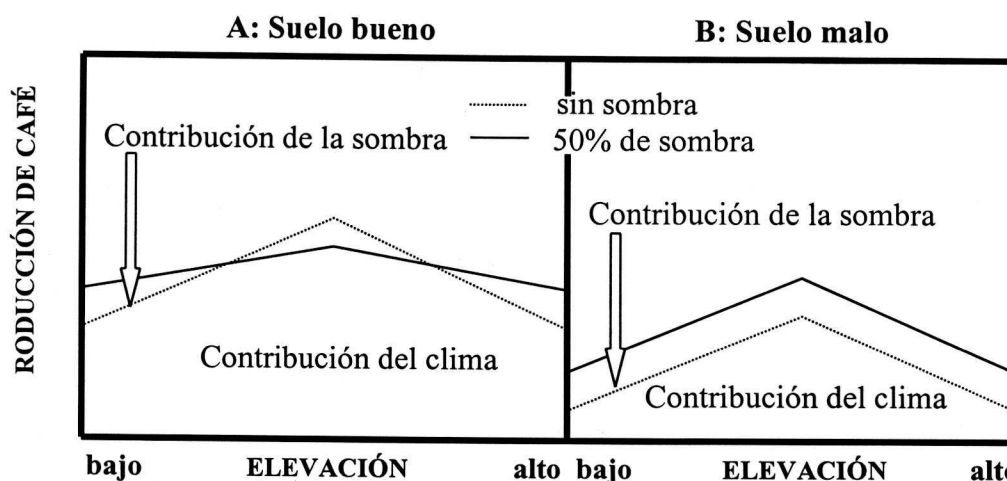


Figura 2. Producción de café sin sombra y con un 50% de sombra en función de la altitud y de la calidad de los suelos.

Los rendimientos de café en policultivo, tienden a ser más bajos que los del monocultivo; sin embargo, la productividad del primero se compensa al agregar el rendimiento de los otros componentes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento de café y cultivos intercalados

Rendimiento café (t ha ⁻¹)	Rendimiento cultivo intercalado
2.0 – 4.0	Tepejilote 500-1000 gruesas [†] /ha
2.0 – 7.0	Macadamia 2-4 t/ha
2.5 – 5.0	Aguacate Hass 2-4 t/ha
3.0 – 3.5	Limón persa 12-24 t/ha
3.0 – 4.0	Palma 120-1200 gruesas/ha
4.0	Guanábana 3 t/ha
5.0 – 5.5	Plátano dominico 4.8-5.8 t/ha
	Naranja azúcar 15 t/ha
7.0 – 7.5	Plátano morado para velillo 150-500 rollos [‡] /ha

[†] Una gruesa tiene 144 hojas.

[‡] Un rollo tiene 50 hojas.

Fuente: Liconsa *et al.*, 1995.

2.3. Sistemas de producción de café en México

En México, el sistema de producción de café dominante es el de sombra, por sus características de composición vegetal puede llegar a ser semejante a un bosque mixto, dada la diversidad de especies que es posible encontrar en él -dependiendo del sistema que se elija-. Se tienen distintos sistemas de producción de café, atendiendo a la clasificación de Nolasco (1985), modificada por Escamilla (1993) y Santoyo *et al.*, (1994) se clasifican de la siguiente manera:

- **Sistema rusticano o de montaña.** Es muy similar a las condiciones en que se encuentra el café en su estado silvestre, aprovecha la sombra de una amplia diversidad de especies de la vegetación natural, principalmente bosque mesófilo, selvas medianas y encinares. Este sistema ya casi no se practica en México, debido a la ausencia de masas grandes de vegetación natural y a su poca producción.
- **Sistemas de policultivo tradicional.** Es un sistema adaptado por diversos grupos de productores que utilizan tecnología tradicional bajo una estrategia de subsistencia. Este sistema predomina en las áreas indígenas que manejan cafetales con superficies menores de dos hectáreas. Bajo éste esquema de plantación no existe una arquitectura bien definida; el productor se guía por criterios empíricos, para plantar el café y seleccionar las especies a asociar. La composición de la sombra presenta una alta variedad de especies vegetales (vegetación natural y cultivados, tanto nativas como introducidas).
- **Sistema de policultivo comercial.** Se estructura bajo una estrategia dirigida a obtener dos o más productos en una misma parcela. Las especies están preconcebidas para ocupar un sitio determinado en la estructura del cafetal, con el propósito de proporcionar sombra al café y obtener, a la vez, un producto extra. Los productos que se obtienen se destinan principalmente al mercado, lo cual ha propiciado la consolidación de modelos de policultivo con especificaciones particulares, según las condiciones agroecológicas de la región.

- **Sistema especializado.** Es una modalidad de monocultivo con el propósito exclusivo de producir café con altos rendimientos. Este sistema se difunde desde los años setenta, con la aplicación de paquetes tecnológicos promovidos por el desaparecido INMECAFE a través de programas de renovación y rehabilitación de cafetales, consistentes en la introducción de variedades mejoradas, densidades mayores a 1,208 plantas por hectárea en arreglos topológicos específicos, sombra especializada, dos o tres fertilizaciones por año y podas sistemáticas. El tipo de árboles de sombra que utiliza este sistema es principalmente de *Inga* spp.
- **Sistema a sol o cielo abierto.** Es la modalidad más intensiva. En este sistema se pueden obtener rendimientos de entre 60 y 80 Qq/ha. El sistema se caracteriza por la ausencia de sombra, es un monocultivo a plena exposición solar. Utiliza variedades mejoradas de porte bajo, densidades de hasta 5,000 plantas por hectárea, elevado e imprescindible uso de agroquímicos, alta inversión financiera y uso intensivo de mano de obra. Este modelo está restringido a los grandes productores generalmente con superficies mayores a 20 hectáreas en áreas óptimas, preferentemente altas (entre los 1,000 y 1,500 msnm).

2.4. Importancia del cultivo de café en México

En México, principalmente se produce café a pequeña escala, por las familias campesinas e indígenas. El 92% de la superficie cultivada corresponde a propietarios con predios de menos de 5 hectáreas, el 60% de los productores pertenecen a ejidos y comunidades indígenas (Moguel y Toledo, 1996).

El 81% de los cafecultores mexicanos utilizan la variedad Typica, la cual recibe diferentes nombres tales como arabigo, criollo, corriente y nacional (Escamilla, 1993). La distribución del cultivo de café en México es muy amplia (Cuadro 3), con altitudes que van desde 300 hasta 2000 m, con una gran diversidad de climas, suelos y vegetación, encontrándose fundamentalmente en zonas montañosas de las dos vertientes: Golfo de México y Pacífico. Los principales estados productores son Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Puebla, Guerrero e Hidalgo. En las áreas donde se produce café en México el 40% de la superficie corresponde a selvas altas y medianas (zona tropical húmeda), 23%

a bosques de pino y encino, 21% a selvas bajas caducifolias y 15% a bosques mesófilos de montaña. En general, las regiones cafetaleras coinciden con las regiones de mayor diversidad de flora y fauna (Moguel y Toledo, 1996).

Cuadro 3. Predominancia de sistemas de cultivo por regiones cafetaleras (%), 1994

Región	Rusticano	Policultivo tradicional	Policultivo comercial	Especializado	A pleno sol
Atoyac, Gro.	70	30	-	-	-
Selva Lacandona y Norte de Chiapas	3	28	60	8	1
Soconusco, Chis.	-	15	50	5	30
Cuetzalan, Pue.	-	85	5	5	5
Xicontepec, Pue.	-	20	20	10	50
Zona centro de Ver.	1	32	54	12	1
Pluma Hidalgo y Pochutla Oaxaca	65	5	25	5	-

Fuente: Santoyo *et al.*, 1994

En México, la producción cafetalera es la principal actividad económica para alrededor de 3 millones de personas que viven en más de 4,500 comunidades indígenas (CCA, 1999). De acuerdo a la Organización Internacional del Café (OIC), el café mexicano esta clasificado en la categoría de “otros suaves”, grupo del tipo arábica calificado por debajo de la categoría de “suaves colombianos” en calidad y precio, pero por encima de la categoría de las variedades brasileñas y otras de tipo arábica (CCA, 1999).

2.4.1. Beneficios del café bajo sombra en México

El café bajo sombra ofrece beneficios ambientales, sociales y económicos (CCA, 1999); en muchos lugares de México, los cafetales son las únicas zonas arboladas que quedan en las laderas de las montañas, como el café arábica que crece en pronunciadas pendientes.

El hecho de que el café mexicano principalmente se cultiva por pequeños propietarios, significa que la producción bajo sombra rinde múltiples beneficios a las familias de los cafecultores, aparte de los ingresos que reciben por la venta del café, obtienen otros beneficios como: leña, plantas medicinales, frutas, hierbas y verduras. Entre otros beneficios esta una mayor integración familiar, una mejor cohesión dentro de la

comunidad y la protección de los valores comunitarios, en contraposición a lo que ocurre en el cultivo intensivo de café a gran escala.

La producción del café bajo sombra se considera una actividad económicamente viable de largo plazo con respecto al cultivo de café a pleno sol. Varias razones se han dado para esto, como la naturaleza volátil de los mercados mundiales del café, lo que significa que a los pequeños agricultores les resulta imposible pagar los altos precios de los insumos químicos durante periodos de depresión de los precios mundiales del café.

2.5. Erosión

El termino erosión según Fournier (1975), proviene del verbo latino *erodere* que significa roer, refiriéndose al desgaste de la superficie terrestre bajo la acción de los agentes erosivos.

Según Miller (1994), la erosión es el proceso o grupo de procesos por los que los materiales sólidos de la tierra, sueltos o consolidados, son disueltos, aflojados o desgastados y removidos de un lugar, para depositarlos en otro.

Morgan (1997) menciona que la erosión del suelo es un proceso con dos fases: el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos (corrientes de agua y viento). Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas se produce una tercera fase, su depositación.

Muchos de los factores que aceleran la erosión son provocadas por una actitud antropocéntrica. La erosión inducida por el hombre incluye la descomposición de los agregados del suelo y la eliminación acelerada de partículas minerales y orgánicas, como consecuencia de una labranza inadecuada y de la eliminación de la vegetación natural (Glenn *et al.*, 1993).

2.5.1. Factores de la erosión

Dvorak y Navak (1994) mencionan que los factores causales más importantes de la erosión son climáticos, hidrológicos, topográficos, del suelo, geológicos y condiciones de vegetación, así como también técnicos y socioeconómicos; ninguno de los factores

actúa aisladamente, sino que se combinan e interactúan influenciados por los mecanismos de los procesos erosivos.

2.5.2. Formas de erosión

2.5.2.1. Erosión eólica

Kirkbi (1991) describe a la erosión eólica como un proceso por el cual el viento desprende y transporta el material superficial suelto; las partículas llevadas por el viento desgastan al demás material superficial suelto. Este proceso tiene su origen en el patrón del viento que incide sobre la superficie del suelo por sus efectos al iniciar el movimiento de las partículas, al transportarlas a lo largo de la superficie o en el aire y depositarlas en otro lugar (Baver *et al.*, 1991).

2.5.2.2. Erosión hídrica

La erosión hídrica es el proceso físico de desprendimiento, transporte y depositación de las partículas del suelo por el agua (Hudson, 1977a).

Suárez y Morgan (1979) citados por Ríos (1987), establecen que los factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Factores acelerantes o factor de energía, compuestos por la precipitación, el escurrimiento y la pendiente.
- b) Factores atenuantes o factor de resistencia, determinados por la erosionabilidad del suelo, el manejo del suelo y por la cobertura vegetal.

La magnitud del deterioro del suelo por erosión hídrica se manifiesta tanto por la pérdida de las partículas del suelo como por el abatimiento de los niveles de productividad del mismo.

Las gotas de lluvia golpetean el suelo desnudo, desprenden y salpican en todas direcciones las partículas del suelo, algunas van a dar cerca de la vegetación, otras permanecen indefinidamente, algunas son lavadas de la superficie bajo la vegetación para nuevamente ser salpicadas. Algunas partículas son salpicadas y transportadas directamente por el escurrimiento superficial. Después de la depositación, estas

partículas pueden permanecer en reposo *in situ* hasta que el escurrimiento se incremente después de un incremento en la lluvia o hasta el siguiente evento, o quedarse por años, hasta nuevamente ser movidas pendiente abajo (Foster *et al.*, 1985).

El desprendimiento y el arrastre de las partículas del suelo se manifiestan, tanto por la acción de la lluvia como por el flujo del escurrimiento superficial, según las condiciones bajo las cuales se presenta el proceso (Meyer y Wischmeier, 1969). Los materiales sueltos son transportados en canalillos o pequeños surcos por la acción combinada del salpicamiento y la lámina de flujo superficial (Meyer *et al.*, 1975).

En las regiones tropicales los factores físicos que inducen altas tasas de erosión hídrica según El-Swaify y Fownes (1988) son:

- a) Precipitaciones de larga duración y/o alta intensidad.
- b) Altos gastos de escurrimientos superficial de las áreas de aporte.
- c) Suelos con pobre estructura, poca agregación, baja infiltración y mal drenaje.
- d) Suelos poco profundos.
- e) Pendientes escarpadas, continuas y/o de gran longitud.
- f) Prácticas de labranza en sentido de la pendiente.
- g) Terrenos desprovistos de cobertura de residuos de cosecha.
- h) Prácticas agrícolas destructivas.

Las formas de la erosión hídrica son resultado de los estados progresivos de concentración del escurrimiento superficial. El proceso inicia con la erosión laminar o entre canalillos, las gotas de lluvia desprenden las partículas del suelo de manera relativamente uniforme en toda la superficie del terreno y las transporta en forma laminar, consiste en la pérdida de suelo de la parte superficial del terreno; después el proceso continua con la erosión en canalillos y si este no se detiene se da origen a la erosión en cárcavas, esto es cuando los canalillos erosionados se hacen grandes, y finalmente la erosión en las márgenes de las corrientes superficiales, cuando van socavando sus riberas (Hudson, 1977a).

La erosión en canalillos es resultado principalmente de la concentración del escurrimiento en una red de canales pequeños perceptibles formados principalmente por el esfuerzo cortante del flujo del agua sobre el suelo. Las concentraciones del escurrimiento que forman los canalillos son resultado de las irregularidades de la superficie del terreno que provocan el flujo superficial tales como las variaciones de densidad y erosionabilidad del suelo y los patrones de labranza; la erosión en canalillos ocurre solo en aquellas partes de la superficie del terreno donde el escurrimiento superficial se concentra a velocidades erosivas; la erosión en canalillos varía directamente con el esfuerzo cortante del flujo aunque la geometría del canalillo depende de otros procesos. La contribución respectiva de las fuentes entre canalillos y en canalillos afectan la erosión relativa para diferentes suelos en diferentes condiciones (Van Liew y Saxton, 1983; Meyer y Harmon, 1984).

Los procesos entre canalillos contribuyen significativamente en la pérdida de suelo, particularmente de las partículas finas, las cuales son en mucho responsables de la contaminación de las aguas superficiales con partículas en suspensión y agroquímicos (Bajracharya, Elliot y Lal, 1992).

2.6. Tolerancia de pérdida de suelo

El suelo es un recurso de formación lenta, debido a que se genera por la acción conjunta de factores como son el agua, viento, material parental, biota, tiempo, etc. En áreas tropicales y templadas, la renovación de 2.54 cm de suelo toma de 100 a 200 años dependiendo del clima y tipo de suelo, si la tasa media de erosión del suelo superficial supera la tasa de formación del mismo en una porción de terreno, éste se convierte en un recurso no renovable por agotamiento (Miller, 1994).

La tolerancia o límite a la pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión de suelo que permite mantener un alto nivel de productividad en forma sostenida indefinidamente (Wischmeier y Smith, 1978).

El concepto de tolerancia (T) está basado en consideraciones acerca de las tasas de desarrollo del horizonte superficial del suelo y los procesos de intemperismo (Johnson, 1987).

Smith (1941) citado por Johnson (1987) es probablemente el primero en estudiar la erosión hídrica y su control al expresar la necesidad de un nivel estándar de control de erosión; la pérdida de suelo permisible lo define como “la tasa de pérdida con la cual se permite un decremento constante o preferentemente un incremento gradual en tiempo de la fertilidad del suelo”. Wischmeier y Smith (1978) definen que el término de tolerancia de pérdida de suelo denota el máximo nivel de erosión del suelo que permite un nivel alto de productividad agrícola que puede ser sostenible económica e indefinidamente.

La productividad agrícola del suelo es función de las relaciones entre el suelo y sus componentes físicos, químicos y biológicos con los procesos del desarrollo vegetal. En la práctica, el concepto de T se aplica y enfoca al mantenimiento de la productividad agrícola *in situ* del suelo. La prevención de una reducción excesiva de la profundidad del horizonte superficial es un criterio de la eficiencia de las prácticas de control de la erosión (Johnson, 1987).

McCormack y Larson (1981) citados por Johnson (1987) consideran que se necesitan conocer las tasas de formación de la zona favorable para el desarrollo de raíces en varios materiales parentales, acerca de los métodos de labranza que pueden reducir la erosión a niveles mínimos y acerca de la recuperación de la productividad de suelos severamente erosionados. Algunos suelos pueden recuperarla si son suficientemente profundos. La factibilidad de la recuperación depende de los costos de corrección o bien de las deficiencias en la capacidad productiva resultado de la excesiva erosión.

McCormack *et al.*, (1982), clasifica el suelo en renovable y no renovable, asignando valores de tolerancia de pérdida de suelo a diferentes profundidades (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de tolerancia de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

Profundidad del suelo (cm)	Suelo renovable [†]	Suelo no renovable [‡]
0 – 25	2.0	2.0
26 – 50	4.5	2.6
51 – 100	6.5	4.5
101 – 150	9.0	6.5
> 150	11.0	11.0

[†] Sobre un sustrato favorable para la formación de suelo mediante roturaciones, labranza y aplicaciones económicas de fertilizantes y materia orgánica.

[‡] Sobre un sustrato rocoso donde la renovación del suelo no es económicamente viable.

Fuente: McCormack *et al.*, 1982.

Para las condiciones de los terrenos agrícolas, Meyer (1984) considera que generalmente los valores de T tienen un rango de 5 a $11\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$. Para el caso de México, según las variaciones de clima y suelo se da como promedio permisible una pérdida de suelo máxima de $5\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ (Figueroa, 1991).

2.7. Conservación de suelos en las plantaciones de café

El uso intensivo del suelo produce su degradación, disminuye su capacidad productiva y genera cambios adversos en sus propiedades (Lal y Stewart, 1992). Los procesos de degradación del suelo pueden ser físicos, químicos o biológicos. Los procesos físicos comprenden entre otros la modificación de la estructura del suelo, el afloramiento de horizontes subsuperficiales, la compactación, el encostramiento y la disminución de su capacidad de infiltración. Los procesos químicos comprenden la lixiviación de nutrientes, la acidificación y el desbalance de algunos elementos. Los procesos biológicos comprenden principalmente el abatimiento y la pérdida de la materia orgánica del suelo y la reducción en el carbono de la biomasa (FAO, 1980; Lal y Stewart, 1992).

La presencia de árboles y sus raíces dificulta el establecimiento de terrazas y desagües para control de la erosión; por otro lado, los árboles pueden ser incluidos en estructuras de control de erosión; asimismo, la mayoría de los efectos negativos de los árboles se puede evitar con una selección juiciosa de las especies de sombra para cada sitio y con un manejo apropiado (Beer, 1996).

En Guatemala un estudio de conservación de suelo y agua basado en una precipitación pluvial anual de 3,138 mm, reportó los datos que se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Pérdida de agua en dos sistemas de café bajo sombra y cultivo de maíz

Cultivo	Escorrentamiento (mm)	Escorrentamiento (%)
Maíz	2,271	72.4
Cafetal joven bajo sombra	471	15.0
Cafetal adulto bajo sombra	133	4.2

Fuente: Anónimo, 1992.

Se observa que el cultivo de maíz pierde mayor agua por escorrentamiento que los sistemas cafetaleros y que la pérdida de agua en estos sistemas depende de la edad.

2.7.1. Barreras vivas

Las barreras vivas son hileras de plantas perennes y de crecimiento denso, se construyen con plantas que se siembran o plantan *exprofeso* para formar una barrera o cordón transversal a la pendiente, su objetivo principal es reducir la velocidad del agua que corre sobre la superficie del terreno y retener el suelo. Las plantas que se usen deben ser de fácil propagación, de crecimiento rápido y formar amacollamiento. El establecimiento de la barrera se hace siguiendo las curvas a nivel del terreno, alejadas lo más posible de las hileras del cultivo, la separación entre barreras depende del grado de pendiente del terreno (Cuadro 6). El mantenimiento de la barrera consiste en replantes en aquellos sitios que lo requieran y podas periódicas para evitar invasiones inconvenientes (Suárez de Castro, 1979; Villaseñor, 1987; ANACAFE, 1999).

Cuadro 6. Distanciamiento de las barreras vivas y/o muertas en el cultivo del café

Pendiente del terreno (%)	Distancia entre barreras (m)
5	25
10	20
15	18
20-25	15
30-40	12
40-55	9
60 o más	6

Fuente: ANACAFÉ (1988) citado por ANACAFÉ, 1999.

2.7.1.1. Barrera viva de palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.)

La palma camedor se ha localizado principalmente en climas cálido subhúmedos Aw2(w) en los que las temperaturas mensuales fluctúan entre los 21 y 29 °C durante el año y semicálidos húmedos (A)C(fm) con variaciones entre los 15 y 24 °C por mes (Martínez, 1969 y Inchaustegui, 1977) citados por Castro (1992).

La palma camedor mide hasta 2 m de alto, generalmente más pequeña, ocasionalmente florece cuando es acaulescente. Su tallo es de 0.8 –1.5 cm de diámetro; entrenudos hasta 3 cm de largo; hojas de hasta 80 cm de largo, pinnadas; peciolo de 10-30 cm de largo, ligeramente acanalados adaxialmente, redondeado abaxialmente; raquis de 20-50 cm de largo; pinnas de 14-20 en cada lado, alternas o ligeramente alternas opuestas, lineares o angostamente lanceoladas, de 11-30 cm de largo, de 1-1.2 cm de ancho. Inflorescencia interfoliar, erecta, las masculinas de 5-35 raquillas, más ramificadas que las femeninas; pedúnculo de 12-28 cm de largo; raquis de 2-20 cm de largo; raquillas de 6-30, hasta 15 cm de largo; flores masculinas, globosas; cáliz escasamente trilobulado; corola fusionado en toda su longitud, abierta sólo en el ápice por un orificio triangular; pétalos amarillos de alrededor de 2.5 mm de largo, estambres de hasta 2 mm de largo, filamentos connados en la base. Fruto de color negro, esférico de 4-6 mm de diámetro, semilla globosa de 4-6 mm de diámetro (Quero, 1994).

El sistema café-palma camedor se compone de tres estratos: los árboles de sombra, el café y por último la palma camedor. Tanto el café como la palma son plantas umbrófilas, pero esta última requiere más sombra que el café (Licona *et al.*, 1995).

2.7.1.2. Barrera viva de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill)

Esta planta crece en las áreas húmedas como son las orillas de los arroyos y las barrancas. Es un arbusto de 6 a 7 m de altura y 10 cm de diámetro basal; sus ramas son de 5 a 7 m de longitud, simples o espaciadamente ramificadas, muy gruesas, los tallos teretados, con costillas y huecos, glabros o un poco villosos o tomentosos; hojas largas, de color verde pálido bastante tiesas, en largo o cortos peciolo, ovado-redondeadas a ovado-oblongas, la mayoría de 10-20 cm de largo, pero a veces mucho más largas, agudas o acuminadas, con la base subcordada, redondeada u obtusa, penninerves pero

más o menos triplinervadas en la base, serradas o dentadas; un poco pubescentes cuando jóvenes, pero glabras con la edad, reticulado-venadas; inflorescencias usualmente muy largas y hojosas, redondeado-paniculadas, densas o bastante abiertas; cabezuelas muy numerosas, blanco-verdosas o blanco manchadas, de 5 mm de largo, densamente aglomeradas, sésiles o corto pediceladas; aquenios glabros; florece de febrero a abril (McVaugh, 1984). En las plantaciones de café del municipio de Tlachichilco, Ver. se ha utilizado con éxito por su fácil propagación vegetativa, en la formación de barreras vivas para detener los procesos de erosión en las áreas más escarpadas.

2.7.2. Terrazas individuales

Las terrazas individuales son estructuras que se hacen en cada planta, con el fin de proporcionar condiciones apropiadas de humedad, aislando las plantas de la pendiente general del terreno donde estarían expuestas a la acción destructora de los escurrimientos superficiales. Esta práctica consiste en la formación de un terraplén de forma semicircular sensiblemente inclinado de adelante hacia atrás, que es en donde se acumulará el agua de los escurrimientos superficiales y de cuya humedad se proveen las plantas para su desarrollo (SAG, 1975).

2.7.3. Terrazas continuas

Este tipo de terrazas se adaptan bien a plantaciones trazadas en curvas a nivel o en contorno, se construyen a lo largo de las líneas de café. Su costo de construcción es mayor que las terrazas individuales, pero su función es más eficiente (SAG, 1975).

Con las terrazas individuales y continuas se logra aumentar la absorción del agua y evitar la erosión del suelo, porque se reduce la velocidad con que el agua arrastra el suelo y la materia orgánica; además de ayudar en gran medida a la acumulación de materia orgánica en la base de las plantas de café, proveniente de ellas mismas, de los árboles de sombra y de los cultivos asociados.

2.7.4. Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura cumplen la función de proteger al suelo contra la erosión durante las estaciones del año en que no hay otros cultivos; de preferencia deben ser de

establecimiento rápido y suficientemente agresivos para eliminar las hierbas no deseadas. Las cubiertas vegetales también se siembran bajo los cultivos arbóreos para proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia que caen desde la copa, principalmente donde hay árboles de gran porte (Morgan, 1997).

De acuerdo a CIDICCO (1997), los cultivos de cobertura tienen los siguientes beneficios:

- Reducción de la erosión. La cobertura protege el suelo del golpe de las gotas de lluvia y reduce la escorrentía, incrementando la filtración del agua en el suelo.
- Incremento en la fertilidad del suelo. El cultivo de cobertura contiene nutrimentos que son liberados al suelo conforme se van descomponiendo.
- Reducción de malezas y costos de limpieza. Con la sombra proporcionada, los cultivos de cobertura pueden reducir la germinación de semillas de malezas y el crecimiento de éstas, aunque también el cultivo de cobertura puede actuar como maleza si no se maneja adecuadamente.
- Incremento de la disponibilidad de agua. La cobertura favorece la infiltración, además reduce la cantidad de agua pérdida por evaporación. Sin embargo, en lugares secos, los cultivos de cobertura pueden competir por agua con el cultivo principal cuando ambos crecen al mismo tiempo.
- Enfermedades y plagas. Los cultivos de cobertura funcionan como un cultivo de rotación, reduciendo de esta manera la posibilidad de ataques de plagas, pero igual podrían actuar como hospederos de insectos, pestes y enfermedades que más tarde atacarían al cultivo principal.
- Provisión de otros ingresos. Muchos cultivos de cobertura pueden servir como alimento humano o animal.

2.7.4.1. Cobertura con canavalia (*Canavalia ensiformis* (Linneo) De Candolle)

La canavalia (*Canavalia ensiformis* (Linneo) De Candolle) pertenece a la familia Fabaceae, es una especie nativa de Centroamérica y las Antillas (McKee, 1930; Binder, 1997), específicamente de México, el sur de Brasil y Perú (Duke, 1981).

Tolera un amplio rango de textura y fertilidad del suelo; crece bien en suelos de tierras bajas tropicales altamente lixiviadas, pobres en nutrientes y pedregosos, así como en suelos ácidos y salinos con un rango de pH entre 4.3 a 7.5; al igual que en suelos arcillosos y húmedos (SECAB, 1990). El rango óptimo de crecimiento de la Canavalia oscila entre 0 y 900 msnm (Binder, 1997).

Es una especie de día corto, anual, pero se vuelve perenne en zonas de abundante humedad y puede sobrevivir de 2 a 4 años; posee la capacidad de rebrote después del corte, lo que permite producir más de una cosecha; el crecimiento inicial es rápido y el productivo es alto; el sistema radical presenta alta capacidad de reciclaje de nutrientes; el proceso de germinación es muy rápido, de 2 a 3 días; su ciclo es de 170 a 240 días (Binder, 1997).

Marmolejo y Ruiz (1985), citados por SECAB (1990), realizaron un estudio fenológico del cultivo de canavalia donde evaluaron el hábito de crecimiento encontrando tres tipos: arbustivo determinado (15%), arbustivo con guía corta (80%), indeterminado con guía larga trepador (5%). Con respecto a estos tres tipos de crecimiento no hallaron diferencias en la forma y color de la flor, tamaño de la inflorescencia y de la vaina; observaron una marcada variación en la altura de la planta y la longitud de entrenudos para los tres hábitos, concluyendo que existen biotipos. De acuerdo a los mismos autores la especie responde positivamente a los rayos del sol, puesto que la época de floración coincide con los mayores promedios de intensidad lumínica, de acuerdo a estos mismos autores el desarrollo fenológico de la canavalia en su fase vegetativa es de 69 días, su fase reproductiva es de 122 días. De acuerdo a Reyes y Orta (1977) citados por SECAB (1990), las plantas de esta especie nunca llegan a alcanzar una altura superior al metro. Uno de los problemas agronómicos que se presenta en canavalia es la maduración no

uniforme (SECAB,1990). En América Central se utilizan 39.2 kg por hectárea, para obtener semilla y 67 kg para abono verde (SECAB,1990).

2.7.4.2. Cobertura con cacahuatillo forrajero (*Arachis pintoi* Krap & Greg nom. Nud. (Cook)).

El cacahuatillo forrajero es una planta leguminosa de cobertura perenne, con hábito de crecimiento rastrero bajo, se reproduce por semilla y estolones, para su rápido establecimiento el control de malezas es mucho más importante que la densidad de siembra. Altos niveles de sombra favorecen un buen establecimiento inicial de cacahuatillo forrajero, pero después la falta de luz solar limita su crecimiento; es muy importante no dejarlo crecer en la base de cualquier cultivo perenne, como café o frutales. Una vez establecido mantiene una cobertura completa del suelo y se convierte en problema cuando las condiciones de humedad son limitadas porque puede competir por agua con el cultivo de café, afectando la producción de éste (Staver, 1997).

El cacahuatillo forrajero pierde muchas hojas durante la época seca, pero siempre mantiene protegido al suelo con su masa de estolones. Con las primeras lluvias rebrota rápidamente, en parcelas con una cobertura completa, crecen muy pocas malezas. Principalmente se recomienda sembrarlo en zonas con mucha lluvia y nubosidad, donde los cafetos no toleran mucha sombra (Staver, 1997).

2.8. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

La EUPS es un modelo empírico y lineal simple de multiplicación de factores, aceptado para estimar la erosión del suelo (Wischmeier y Smith, 1978). La EUPS se usa principalmente para estimar el promedio anual de la erosión laminar y en canalillos de la lluvia, excluye la erosión en cárcavas o en márgenes de los ríos (Meyer, 1984).

La EUPS se expresa como sigue:

$$A = RKLSCP \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde:

A = Tasa de pérdida promedio anual de suelo ($t\ ha^{-1}$)

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

K = Factor erosionabilidad del suelo ($\text{t ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)

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

C = Factor manejo y cobertura (adimensional)

P = Factor prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional)

2.8.1. Factor erosividad (R) de la lluvia

La erosividad es la capacidad o energía potencial de la lluvia para causar erosión, depende de las características físicas de la lluvia como la intensidad, duración y frecuencia (Hudson, 1977a; 1977b, 1980). En las regiones tropicales, los eventos de lluvia son más erosivos que las lluvias de zonas templadas, debido principalmente a la mayor frecuencia de lluvias de alta intensidad, la velocidad del viento y la distribución del tamaño de gotas de lluvia (Lal, 1976b; 1977; Lal *et al.*, 1980; Hudson, 1977a; El-Swaify y Dangler, 1982).

La mayoría de las lluvias tropicales caen en la categoría de tormentas “erosivas”, en clima templado sólo del 5 al 10% de las tormentas se consideran como tal. Las tormentas tropicales están acompañadas generalmente por vientos de alta intensidad, lo que incrementa su agresividad (Lal, 1979).

Wischmeier (1959) y Hudson (1981) reportan que las interacciones de tamaño, velocidad de caída y forma de las gotas de lluvia, la cantidad, intensidad y duración de la tormenta, así como la velocidad del viento, controlan el poder erosivo de la lluvia. Lal (1979) señala que los factores que afectan la energía cinética de una tormenta son: intensidad de la precipitación, distribución del tamaño de la gota, velocidad terminal, velocidad del viento y dirección de la pendiente.

La intensidad de la lluvia es definida como la tasa de cambio de una cantidad de lluvia P , en un tiempo dado t , y se expresa generalmente en mm h^{-1} . Diversos estudios han mostrado la relación estrecha entre la intensidad de la lluvia y la erosión del suelo (Wischmeier y Smith, 1958).

Para el control de la erosión por lluvia, más que el dato de cantidad precipitada, es necesario el conocimiento de la erosividad, las intensidades máximas y la relación intensidad-duración-frecuencia (Hudson, 1981).

Hays *et al.*, (1948), Mookerjee (1950) citados por Amezquita y Forsythe (1985), Meyer (1981) y Wischmeier y Smith (1958), han encontrado altas correlaciones entre intensidades de lluvia y suelo erosionado. Esta correlación es todavía mejor cuando se relaciona el suelo erosionado con la energía cinética o el momento de la lluvia (Wischmeier, 1959; Hudson, 1981; Lal, 1979).

El tamaño, distribución y forma de la gota influyen por completo la energía, fuerza y erosividad de la tormenta. Laws y Parsons (1943) citados por Lal (1979) reportaron un incremento en el tamaño medio de la gota con un incremento en la intensidad de la lluvia.

La energía cinética de una tormenta está relacionada con la velocidad de las gotas de lluvia y el tiempo de impacto con el suelo. La distancia a través de la cual una gota de lluvia debe caer antes de que alcance su velocidad terminal es una función de la distribución del tamaño de la gota. La velocidad del viento como la energía cinética de la lluvia determinan la capacidad erosiva de una tormenta. La dirección de la pendiente en relación con la dirección de la tormenta puede alterar significativamente la energía cinética actual del impacto de la gota en el suelo debido al ángulo en el cual ésta golpea a la partícula del suelo, el impacto máximo se da en el ángulo de 90° (Lal, 1979).

2.8.2. Índices de erosividad de la lluvia

Los índices de erosividad más importantes y de aplicación geográfica amplia son: índice de Wischmeier (EI_{30}), índice de Hudson ($KE > 25$), índice de Lal (AI_m), índice de Roose-Delwaulle (Ram), (Wischmeier, 1959; Hudson, 1981; Lal, 1979; Roose, 1979; Arnoldus, 1980). Existen otros índices con aplicaciones locales.

2.8.2.1. Índice de Wischmeier (EI_{30})

El índice de erosividad EI_{30} fue propuesto por Wischmeier (1959), se ha aplicado en diversas partes del mundo con buenos resultados en la estimación de pérdidas de suelo.

Se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}). Mide el efecto en que la erosión por salpicamiento y la turbulencia del flujo se combinan con el escurrimiento para remover del terreno las partículas del suelo separadas de éste.

Para el cálculo de éste índice, se toman en cuenta únicamente aquellas lluvias con una lámina precipitada mayor o igual a 12.7 mm (0.5 pulgadas) o en las que al menos 6 mm precipitan en 15 minutos. Para que un evento se considere como independiente de otro debe existir una separación mínima entre ambos de 6 horas (Wischmeier y Smith, 1978).

Aunque la energía cinética de la lluvia es aceptada como la fuerza conductora de la erosión, varios investigadores, indican que la cantidad y la intensidad de lluvia no están altamente correlacionadas con la pérdida de suelo. Wischemeier determinó que una combinación de la energía y la cantidad de lluvia no provee una correlación elevada con la erosión del suelo. Basándose en un análisis que efectuó durante 1958, mostró que la correlación de pérdida de suelo con la cantidad de lluvia en tormentas individuales, así como la máxima cantidad que cae en intervalos de 5, 15 ó 30 minutos, fue pobre. Sin embargo, el producto de la energía cinética de la tormenta y la intensidad máxima de la lluvia durante los primeros 30 minutos de una tormenta (EI_{30}) fue el más significativamente correlacionado con la pérdida de suelo, determinada en parcelas estándares (Lal, 1979).

2.8.2.2. Índice de Hudson ($KE > 25$ mm)

Este índice fue propuesto por Hudson (1981), surge de trabajos realizados en Zimbabwe, África, su cálculo incluye solo la energía cinética total de la lluvia que cae a intensidades mayores de 25 mm h⁻¹, según el autor, las lluvias a intensidades menores no son erosivas. El cálculo de la energía cinética es esencialmente igual al EI_{30} , salvo la restricción del valor umbral de la intensidad. A diferencia del EI_{30} , no requiere multiplicarse por la intensidad máxima en 30 minutos; así

$$KE > 25 = \sum_{i=1}^n [0.119 + 0.08731 \log_{10} I_j(p_j)]; I_j \geq 25 \text{ mm h}^{-1} \quad \left| \begin{array}{l} I_j < 25 \text{ mm h}^{-1} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.2)$$

$$KE > 25 = 0;$$

Donde:

$KE > 25$ = Índice de erosividad de Hudson

I_j = Intensidad de la lluvia en el intervalo j

P_j = Cantidad de la lluvia en el intervalo j

N = Número total de eventos de lluvia

2.8.2.3. Índice de Lal (AI_m)

Lal (1979) en Nigeria, África, reporta que el producto de la cantidad total de lluvia y la intensidad máxima de la misma (AI_m) proporciona mejores resultados como índice de erosividad que el EI_{30} y el $KE > 25$ para regiones de lluvias tropicales con alta intensidad, trabajando en Nigeria, África. La expresión algebraica de este índice es:

$$AI_m = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^n (ai_j) \dots\dots\dots (3.3)$$

Donde:

AI_m = Índice de erosividad Lal

a = Lámina total de la lluvia en el mes (cm)

i = Intensidad máxima de la lluvia en el mes j (cm h^{-1})

n = Número de lluvias en el mes

2.8.2.4. Índice de Roose-Delwaulle (Ram)

Existen diversas aproximaciones al índice de erosividad de Wischmeier, así Delwaulle (1973) citado por Bergsma (1981) encontró que para el Oeste de África puede utilizarse como aproximación a (R) la ecuación:

$$Ram = (0.0158) (H) (I_{30}) - 1.2 \dots\dots\dots (3.4)$$

Donde:

Ram = Índice de erosividad de Roose-Delwaulle para un evento de lluvia

H = Precipitación total en el evento (mm)

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos (mm h^{-1})

2.8.2.5. Índice de Fournier modificado (Fm)

Arnoldus (1980) tratando de correlacionar el índice originalmente propuesto por Fournier con el generado por Wischmeier (EI_{30}) encontró que haciendo una modificación al primero, lograba buenos resultados al trabajar con algunas estaciones de Estados Unidos y el oeste de África. El índice propuesto es:

$$Fm = \sum_{i=1}^{12} (p_i^2 / P) \dots\dots\dots (3.5)$$

Donde:

Fm = Índice de erosividad de Fournier modificado

p_i = Precipitación total en el mes i (mm)

P = Precipitación total en el año (mm)

2.8.3. Factor erosionabilidad (K) del suelo

De acuerdo a Figueroa *et al.* (1991) el término erosionabilidad del suelo fue propuesto por Cook (1936), se usa generalmente para indicar la susceptibilidad de un suelo particular a ser erosionado.

La erosionabilidad del suelo esta determinada por algunas de sus propiedades, como la distribución del tamaño de las partículas primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, uniones electroquímicas, contenido inicial de humedad y procesos de humedecimiento y secado (Wischmeier *et al.*, 1971; Grissinger, 1966, Römken *et al.*, 1977, Partheniades, 1972) citados por Figueroa *et al.*, (1991). Otros investigadores señalan que los cambios en la erosionabilidad dependen de la influencia de esas propiedades y características en la capacidad de infiltración, la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento de agua y su efecto en la dispersión, la abrasión, el salpicado y las fuerzas de transportación de la lluvia y el escurrimiento (Beasley, 1972; Wischmeier y Smith, 1978). Las características y algunas propiedades pueden ser modificadas en el tiempo bajo diferentes usos de la tierra y manejo de la

superficie del suelo (labranza, uso de residuos vegetales) y por distintos sistemas de manejo de cultivos (Lal, 1988).

La resistencia del suelo a la erosión depende de sus propiedades que están mutuamente relacionadas como la textura, la cohesión y la agregación. El desprendimiento es la disgregación de las partículas del suelo; los suelos de textura fina son comúnmente cohesivos y difíciles de desprender; sin embargo, por el tamaño de las partículas sus sedimentos son fácilmente transportados. En cambio, los suelos de textura gruesa generalmente son fáciles de desprender, pero sus sedimentos son difíciles de transportar, algunas veces producen menos escurrimiento que los suelos de textura fina. Los suelos de textura media como los limos y migajones se desprenden y son transportados fácilmente, característica que los hace más erosionables (Meyer y Harmon, 1984; Foster *et al.*, 1985).

La textura es un factor importante que influye en la erosionabilidad del suelo debido a que afecta los procesos de desprendimiento y transporte. Mientras las partículas grandes de arena resisten el transporte, suelos con textura arcillosa resisten el desprendimiento al formarse agregados más estables. El rango de textura con mayor susceptibilidad a la erosión se encuentra entre arenas finas y limos. Al respecto, algunos autores expresan la erosionabilidad en función del contenido de arcilla y mencionan que suelos con un contenido de arcilla mayor de 30 a 35% forman agregados estables y por lo general son menos susceptibles a la erosión (Morgan, 1986). En general, los suelos con altos contenidos de limos y con bajos porcentajes de arena, arcilla y materia orgánica son los más susceptibles a la erosión. Evans citado por Morgan (1979), considera la erosionabilidad del suelo como una función del contenido de arcilla, suelos con un contenido de 9 a 30% de arcilla son los más erosionables.

La diferencia en textura, especialmente en el contenido de limo, si puede afectar la resistencia a la erosión. Los suelos con mayor contenido de limo son más erodables (Wischmeier y Mannering, 1969).

La materia orgánica junto con otros constituyentes químicos del suelo participan en gran medida en la formación de agregados estables. Los suelos con menos de 3.5% de

materia orgánica pueden ser considerados como erosionables; la erosionabilidad del suelo disminuye proporcionalmente con los aumentos en el contenido de materia orgánica (Figuerola *et al.*, 1991). En combinación con la fracción mineral, al incrementarse la materia orgánica se modifican algunas propiedades del suelo, produciéndose un incremento en la capacidad de absorción y retención de agua, así como una mejora de la estructura e incremento de la porosidad y permeabilidad del suelo (Wischmeier y Mannering, 1969; Suárez de Castro, 1979). Alteraciones en la capa superficial modifican la erosionabilidad durante una tormenta, debido a que se producen cambios en la orientación de las partículas que sellan la superficie del suelo (Lal, 1988).

La tasa de erosión del suelo (*A*) en la EUPS puede ser influenciada más por la pendiente del terreno, las características de la precipitación, la cobertura y el manejo que por las propiedades inherentes al suelo. Sin embargo, algunos suelos son más erosionables que otros cuando los demás factores son iguales. Esta diferencia causada por las propiedades del suelo mismo se denomina erosionabilidad del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

Las diferencias en la susceptibilidad natural de los suelos a la erosión son difíciles de cuantificar a partir de observaciones de campo. Un suelo con un valor del factor erosionabilidad relativamente bajo puede mostrar signos de erosión seria cuando se encuentran en pendientes muy pronunciadas o en regiones con lluvias de alta intensidad, mientras que, un suelo con alta erosionabilidad puede mostrar poca evidencia de erosión bajo pendiente e intensidad de lluvia moderadas.

A partir del conocimiento de los demás factores de la EUPS es posible determinar el valor de *K* en condiciones naturales resolviendo la ecuación:

$$K = \frac{A}{R} \dots\dots\dots (3.6)$$

para condiciones estándar: inclinación de la pendiente 9%, longitud de la pendiente 22.13 m, en barbecho continuo, terrenos que han sido cultivados y mantenidos libre de vegetación por más de dos años y sin prácticas mecánicas de conservación. Cuando esto sucede, *L*, *S*, *C* y *P* permanecen constantes y son iguales a 1.

O bien:

$$K = \frac{A}{RLSCP} \dots\dots\dots (3.7)$$

para condiciones no estándar.

2.8.4. Factor longitud y grado (*LS*) de la pendiente

El efecto de la topografía en la erosión se representa como el factor (*LS*) en la EUPS. La erosión aumenta conforme se incrementan la longitud (*L*) y la inclinación (*S*) del terreno.

El tamaño de las partículas, así como la cantidad del material que el agua puede arrastrar o llevar en suspensión, depende de la velocidad de la misma que fluye en la superficie del suelo. La velocidad por su parte es una función del grado y longitud de la pendiente (Ríos, 1987).

La cantidad o volumen de la escorrentía desempeña también un importante papel sobre la erosión, y ésta viene determinada, para unas condiciones dadas, por la extensión del terreno que contribuye a la aportación de aguas. Tanto la extensión como la forma de las vertientes afectan a la cantidad de escorrentía en un punto dado, y en las laderas la longitud de la pendiente es más importante que la anchura (Ayres, 1960).

2.8.4.1. Longitud (*L*) de la pendiente

La longitud de la pendiente se define como la distancia comprendida desde el punto donde se origina el escurrimiento, a cualquiera de los siguientes puntos: a) punto donde la pendiente decrece y se presenta depositación; b) punto donde el agua de escorrentía entra en un canal bien definido que puede ser parte de una red de drenaje o un canal construido, por ejemplo el de una terraza o zanja de desvío (Wischmeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991). La acumulación de volumen escurrido a lo largo de la pendiente incrementa la capacidad de desprendimiento y transporte del escurrimiento, a mayor longitud de la pendiente mayor erosión por unidad de superficie (Ríos, 1987; Hudson, 1971). Sin embargo, Djrovic (1977) citado por (Perles, 1997), afirma que la inclinación de la pendiente afecta mucho más a la erosión que la longitud de la misma.

Hudson (1982), indica que los problemas más fuertes de erosión en los trópicos se encuentran en pendientes entre 50 y 100%, con longitud arriba de 100 m, además no existen suficientes estudios bajo esas condiciones. También anota que los factores de longitud y grado de pendiente de la EUPS se obtuvieron en condiciones con un máximo de 18% de pendiente y que en la mayoría de los casos en pendientes menores.

Lal (1976b) evaluó el efecto de la longitud y grado de la pendiente sobre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial. Los resultados, que se presentan en el Cuadro 7, no mostraron ninguna relación entre esas variables, lo cual se atribuyó a la irregularidad natural de la pendiente, a distancias cortas dentro de las longitudes de pendiente evaluadas.

Cuadro 7. Efecto de la longitud y grado de pendiente sobre la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial.

Longitud de pendiente (cm)	Grado de pendiente (%)	Pérdida de suelo (t ha^{-1})	Escurrimiento superficial (mm)
12.5	10.0	31.3	19.3
	19.2	33.8	20.0
37.5	9.3	21.5	89.0
	13.4	15.8	81.0

Fuente: Lal (1976b)

2.8.4.2. Grado (*S*) de la pendiente

En igualdad de condiciones ambientales, conforme aumenta el grado de la pendiente, el agua fluye con mayor velocidad y en consecuencia el tiempo de oportunidad para la infiltración del agua es menor. La pérdida de suelo aumenta más rápidamente con la inclinación de la pendiente, que con la longitud (Ríos, 1987; Figueroa *et al.*, 1991).

Duley y Hays (s/f) citados por Ayres (1960) manifiestan que la escorrentía aumenta rápidamente desde la pendiente de 0% hasta la de 3%, y que luego, es relativamente pequeño el crecimiento por cada 1% adicional de aumento de la pendiente. Las pérdidas de suelo aumentan gradualmente hasta una pendiente de aproximadamente 4%, luego aumenta más rápidamente hasta pendientes de 7 a 8%, y en pendientes mayores el ritmo del aumento es todavía más rápido.

Howeler (1984) menciona que la pérdida de suelo se incrementa exponencialmente con el aumento del grado de la pendiente, mientras que la longitud tiene un efecto similar, dependiendo si la pendiente es cóncava o convexa. Existe una relación de tipo potencial entre las pérdidas de suelo y el grado de pendiente (Hudson, 1971) como sigue:

$$E = S^a \dots\dots\dots (3.8)$$

Donde:

E = Pérdida de suelo

S = Grado de pendiente

Los valores del exponente "a" varían de 0.8 a 1.5 de acuerdo a la región.

Lal (1976a) evaluó el efecto de la pendiente y prácticas de manejo del suelo y cultivos sobre las pérdidas de suelo y escurrimiento en el Oeste de Nigeria. En el Cuadro 8 presenta las pérdidas de suelo y el escurrimiento superficial para diferentes grados de pendiente.

Cuadro 8. Efecto de la pendiente y manejo del suelo sobre las pérdidas de suelo ($t\ ha^{-1}$) y el escurrimiento superficial (mm) durante la primera estación de 1973.

Tratamiento	Pérdida de suelo en pendiente de				Escurrimiento en pendiente de			
	1%	5%	10%	15%	1%	5%	10%	15%
1. Suelo desnudo	7.5	80.4	152.9	155.3	315.7	347.3	311.0	316.5
2. Maíz+LC+Residuos	0.0	0.0	0.1	0.0	0.10	6.9	20.3	16.8
3. Maíz+LC	1.2	8.2	4.4	23.6	55.1	158.7	52.4	89.9
4. Maíz+No labranza	0.0	0.2	0.1	0.1	1.4	1.8	20.3	21.0
5. Cowpea+LC	0.6	5.6	3.2	7.6	19.8	81.2	51.4	46.1

LC = Labranza Convencional; precipitación anual = 781 mm.

Fuente: Lal, 1976b.

La relación entre las variables pérdidas de suelo con el grado de pendiente que reportó, fue de tipo exponencial (Cuadro 9). Señalando, que la adición de residuos de cosecha como cobertura y la labranza cero, resultaron ser prácticas efectivas para reducir las pérdidas de suelo y el escurrimiento superficial, aún en las condiciones de mayor grado de pendiente.

Cuadro 9. Relación entre pérdidas de suelo con el grado de pendiente para diferentes tratamientos durante 1973.

Tratamiento	Lluvias >25 mm		Lluvias <25 mm	
	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación
1. Suelo desnudo	0.86	$E = 9.57S^{1.21}$	0.98	$E = 4.26S^{1.26}$
2. Maíz+LC+Residuos	0.47	$E = 0.02S^{0.66}$	0.14	$E = 0.08S^{0.15}$
3. Maíz+LC	0.52	$E = 0.59S^{1.18}$	0.29	$E = 0.10S^{0.09}$
4. Maíz+No labranza	0.17	$E = 0.04S^{0.16}$	0.12	$E = 0.10S^{0.09}$
5. Cowpea+LC	0.45	$E = 0.13S^{1.19}$	0.21	$E = 0.27S^{0.44}$

LC = Labranza Convencional; E = pérdidas de suelo (t ha⁻¹)

S = grado de pendiente (%).

Fuente: Lal, 1976b.

2.8.5. Factor cobertura y manejo (C) del suelo

Las cantidades de suelo erosionado no se relacionan tanto con la escorrentía como con las proporciones de suelo desnudo, esto se debe a que el suelo arrastrado frecuentemente no llega a la corriente sino que es atrapado cuesta abajo por la vegetación o redepositado en los fondos de los valles o en las grietas cóncavas en la pendiente (Evans, 1994).

El factor *C*, es la relación de pérdidas de suelo de un terreno cultivado bajo condiciones específicas, con las correspondientes pérdidas de un suelo desnudo y en barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo y pendiente, y bajo la misma precipitación (Wischmeier, 1960 y Wischmeier y Smith, 1978). Este factor estima el efecto combinado de todas las variables interrelacionadas de cobertura y manejo, su valor varía de 0 a 1. Es 1 cuando no existe vegetación y el suelo permanece en barbecho continuo, y conforme se incrementa la cobertura vegetal su valor disminuye.

Las primeras evaluaciones cuantitativas del factor *C*, de interacción con otros factores, fue realizada por Wischmeier y Smith (1965 y 1978). Para determinar el valor numérico del factor *C*, señalan que es necesario conocer el grado de protección que las plantas brindan al suelo y la distribución de las fuerzas erosivas de la lluvia, ambos a través de los doce meses del año, con relación a un suelo sin protección y en condiciones estándar de longitud, pendiente y manejo, para conocer las pérdidas relativas; entendiendo como pérdidas relativas al cociente que resulta de dividir las pérdidas de suelo de un terreno

bajo cultivo y manejo específicos, entre las pérdidas obtenidas en un suelo desnudo y en barbecho continuo.

2.8.6. Coberturas del suelo

Con respecto a las labores culturales realizadas, Zazueta (1984) establece que la pérdida de suelo es mayor en presencia de labranza tradicional que en la no labranza, la primera aumenta el escurrimiento, disminuye la velocidad de infiltración, modifica la estructura, y disminuye el contenido de materia orgánica. Concluye que la no labranza reduce la pérdida de suelo hasta un 43.3% en relación a la labranza tradicional.

El tipo, frecuencia, intensidad y oportunidad de las prácticas de labranza, originan diferentes cambios en las condiciones internas y condiciones externas del suelo. Estos cambios son función del tipo de suelo y del tipo de implemento de labranza utilizado. La estructura, porosidad, rugosidad y microtopografía afectados por la labranza tiene efecto en la infiltración, almacenamiento superficial, inicio y velocidad del escurrimiento superficial, desprendibilidad de las partículas del suelo y sobre la alteración del grado de cobertura por los residuos de cosecha, (Wischmeier y Smith, 1978 y Mannering y Fenster, 1977).

Suárez de Castro (1952 y 1979) considera que tanto la hojarasca como las coberturas vegetales, constituyen la mejor defensa natural del suelo contra la erosión, lo protegen del impacto de las lluvias, reduciendo el desprendimiento de las partículas, obturación de los poros y separación de agregados; reconociendo además en el caso de la primera sus beneficios indirectos como la formación de agregados a través de la incorporación de materia orgánica.

2.8.6.1. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal constituye el primer obstáculo contra el impacto directo de las gotas de lluvia al suelo. La protección incluye la intercepción, dispersión y evaporación de las gotas de lluvia que no alcanzan a llegar al suelo; el sistema radicular de las plantas ejerce un efecto sujetador sobre las partículas del suelo, produciendo mejoras en la estructura de éste, que también es favorecida al descomponerse las raíces, incrementando el contenido de materia orgánica y dejando cavidades tubulares que

mejoran el movimiento de aire y agua en el suelo; incremento de la rugosidad hidráulica del escurrimiento superficial, lo cual aumenta la fricción y disminuye la velocidad del flujo, incrementando el tiempo de oportunidad para la infiltración, y por último, mejora la calidad del volumen escurrido como del volumen infiltrado al llevar estos pocos sedimentos en suspensión (Ayres, 1960; Wischmeier y Smith, 1965; Figueroa, 1975; Holy, 1980; Hudson, 1977a y Brenneman y Laflen, 1982).

La relación cobertura vegetal contra pérdidas de suelo, fue estudiado por Gumbs y Lindsay (1982), llegando a la conclusión que cualquier cultivo reduce la erosión y los escurrimientos superficiales. También Hofmann, Ries y Gilley (1983), señalan que la erosión hídrica en áreas agrícolas recientemente recuperadas se reduce en un 51% cuando la cobertura alcanza un 54% y, en 92% cuando la cobertura es de 72%. Lang y McCaffrey (1984), analizaron datos de pérdida de suelo en terrenos de pastoreo con diferentes porcentajes de cobertura de pasto, en 10 años de observación promedio encontraron que con una cobertura del 100% las pérdidas de suelo fueron de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y con una cobertura del 20% la erosión fue de $4000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, los resultados muestran claramente que el grado de cobertura afecta, tanto la frecuencia como la cantidad de suelo erosionado. Señalan también que cuando el suelo tiene una cobertura de 50 a 75%, la erosión es igual al supuesto rango de formación del suelo y que, cuando el suelo tiene menos de 50% de cobertura la erosión es mayor a la cantidad de suelo formado, indican que un balance entre el suelo formado y el suelo erosionado requiere de una cobertura entre 50 y 75%.

Wischmeier (1960), indica que la distribución de la erosión producida por las tormentas durante el año, cambia de una localidad a otra y que el efecto de un cultivo o práctica de éste sobre la erosión, varía de acuerdo al estado de desarrollo del cultivo; consecuentemente, el efecto de una práctica de cultivo para controlar la erosión en promedio a nivel anual, esta en función de la distribución de las lluvias erosivas durante el año.

Con base al grado de protección del suelo durante el año, las coberturas vegetales vivas se agrupan en permanentes y temporales. Las primeras consideran los usos del suelo forestal y de pastizal, también puede incluirse otros tipos de vegetación.

Holy (1980) compara la eficiencia en la protección al suelo contra la erosión entre coberturas permanentes y temporales. La eficiencia de las coberturas vegetales para reducir el proceso erosivo depende del porcentaje y tipo existente, considerando como las coberturas vegetales más eficientes para disminuir la erosión en orden de importancia a las forestales, pastizales permanentes, pastizales en rotación con cultivos agrícolas y finalmente los cultivos anuales.

2.8.6.1.1. Coberturas vegetales permanentes

Los bosques son considerados como las coberturas vegetales permanentes más eficientes en la reducción de la erosión. Holy (1980), indica que el bosque con un denso follaje, un buen estrato secundario de arbustos y hierbas y, con una capa de mantillo imperturbado, reduce de manera importante los escurrimientos superficiales, lo que disminuye la intensidad y grado de la erosión. Señala también, que el escurrimiento superficial en suelos forestales, como regla general, no excede del 10% de la precipitación total anual. Sin embargo, los efectos de la cobertura de buenos pastizales, sobre los escurrimientos superficiales y pérdidas de suelo, pueden ser similares a los efectos que se presentan en condiciones de bosque. Al respecto Kirkby y Morgan (1984), indican que los escurrimientos superficiales y pérdidas de suelo procedentes de buenos pastizales o de bosque son pequeños y con frecuencia representan menos del 1 al 55% de las pérdidas generadas en suelo sin protección.

Elwell y Stocking (1976), indican que para una adecuada y eficiente protección contra la erosión, al menos el 70% de la superficie debe estar cubierta, lo cual coincide con lo indicado por Lang y McCaffrey (1984). Coberturas vegetales con esos porcentajes se alcanzan bajo condiciones de bosque, pastizal y algunos cultivos forrajeros (Hudson, 1977a).

En los Cuadros 10 y 11 se presentan los resultados de investigaciones realizadas en Colombia y Brasil, respectivamente, por Suárez de Castro (1979), sobre el efecto de diferentes tipos de vegetación en la infiltración, escurrimiento superficial y pérdidas de suelo.

Cuadro 10. Infiltración del agua en áreas con diferentes coberturas vegetales en Colombia.

Tiempo (min)	Agua infiltrada (cm ³)		
	Bosque	Pastizal	Suelo desnudo
5	60	21.0	5.3
10	117	45.8	11.0
30	360	127.0	35.5
60	715	250.0	63.0

Fuente: Suárez de Castro, 1979.

Cuadro 11. Pérdidas de suelo y escurrimiento superficial con diferentes coberturas vegetales en Brasil.

Vegetación	Erosión(t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Escurrimiento (%)
Bosque	0.001	1.10
Pastizal	1.000	1.60
Cafetal sin sombra	1.400	1.60
Algodón	36.000	8.20

Fuente: Suárez de Castro, 1979.

En condiciones naturales y dependiendo de las características de los suelos la cubierta vegetal puede influir de dos maneras: primera, al favorecer la infiltración del agua propicia la inestabilidad de las laderas y taludes, que pueden ponerse en movimiento por la incorporación del agua y el consiguiente aumento de peso y/o la disminución de la resistencia al corte, y segunda, puede actuar a favor de la estabilidad gracias al drenaje que conlleva la evapotranspiración y al efecto mecánico de unión entre las partículas del suelo que ejercen los sistemas radicales (Baver *et al.*, 1991).

2.8.6.1.2. Coberturas vegetales temporales

Las coberturas vegetales temporales son aquellas que protegen gradualmente al suelo durante una o dos épocas del año. Considera áreas agrícolas, las cuales son menos eficientes en el control de la erosión, en comparación con áreas de bosque y pastizal (Figuerola, 1975; Suárez de Castro, 1979).

Independientemente de las variaciones asociadas a la frecuencia e intensidad de tormentas aisladas, las tasas de erosión siguen un patrón estacional. Tal como ocurre en un régimen de lluvias que presenta una estación lluviosa y una estación seca; el crecimiento de la vegetación sigue patrones similares, pero la presencia estable de la

vegetación se produce más tarde que la de la lluvia, la época más vulnerable para la erosión hídrica corresponde a la primera parte de la estación húmeda, cuando la lluvia es importante pero aún no se ha desarrollado suficientemente la vegetación para proteger al suelo, en consecuencia el máximo de erosión precede al máximo de lluvia (Kirkby y Morgan, 1984).

2.8.7. Manejo de residuos de cosecha

De acuerdo con Mannering y Fenster (1977), el efecto de los residuos de cosecha en el control de la erosión varía de acuerdo a la cantidad, distribución y durabilidad de los mismos. Dependiendo del manejo dado a los residuos de cosecha, será el grado, eficiencia y rapidez de la protección al suelo, éstos son más efectivos en el control de la erosión cuando se dejan sobre la superficie del suelo, que cuando son dejados de pie en el terreno o que cuando son incorporados a la capa arable (Mannering y Fenster, 1977; Wischmeier y Smith, 1978; McGregor y Mutchler, 1983). Al respecto, las hojas y ramas que no están en contacto directo con el suelo, tienen un menor efecto sobre la cantidad y velocidad del escurrimiento, en relación a los residuos en contacto directo con el suelo (Wischmeier y Smith, 1978). Asimismo, cuando los residuos son incorporados a la capa arable del suelo, su efecto protector es minimizado, pero mejora las condiciones físicas y químicas del suelo por el incremento de la materia orgánica.

Cuando los residuos son dejados sobre la superficie del suelo, a la vez que lo protegen contra el impacto directo de las gotas de lluvia, crean pequeños almacenamientos que ayudan a la deposición de sedimentos y, estos almacenamientos al tener una lámina de agua amortiguan el impacto de las gotas e incrementan el tiempo de oportunidad para la infiltración (Brenneman y Laflen, 1982).

Hudson (1977a), indica que la cantidad de suelo erosionado depende no del porcentaje de la superficie del suelo protegida del impacto directo de la lluvia, sino del porcentaje de suelo sin protección. Señala también que para el rango de cobertura por follaje en cultivos, la variación en la densidad de cobertura puede tener más influencia sobre la erosión, que cualquier otro factor de manejo.

Wischmeier y Smith (1965), al evaluar el factor C en la EUPS incluyen condiciones de manejo del suelo y la vegetación, y la distribución de la erosividad de la lluvia durante el ciclo. Algunas de las variables que incluyen dentro de las condiciones de manejo del suelo y la vegetación son: tipos y rotaciones de cultivo, manejo y cantidad de residuos de cosecha, sistemas de labranza y labores de cultivo, fertilización y nivel de productividad, y grado de cobertura por follaje y altura del mismo. Elwell y Stocking (1976), indican que las variables antes mencionadas alteran la cantidad de cobertura protectora sobre el suelo y las propiedades físicas y químicas del mismo, modificando su erosionabilidad. La interacción planta-suelo debido a la labranza produce modificaciones en las propiedades del suelo y en la erosionabilidad del mismo.

En coberturas permanentes, no es necesario la división en etapas de crecimiento, ni la distribución de la erosividad para determinar el valor del factor C , además de que en áreas con vegetación permanente no existe ninguna alteración física del suelo periódicamente, como sucede en áreas de cultivo; Wischmeier y Smith (1978), señalan que para calcular el factor C en coberturas permanentes debe considerarse la altura efectiva del follaje, el porcentaje de cobertura por follaje y la cobertura por residuos y vegetación en contacto directo con el suelo.

La escasa información sobre pérdidas de suelo para áreas imperturbadas, dio pauta para que Wischmeier y Smith (1978), determinaran y propusieran valores de C para coberturas permanentes, mediante un método simple, basado en la utilización de subfactores:

$$C = C_1 C_2 C_3 \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde:

C = factor C de la EUPS.

C_1 = efecto de la cobertura del follaje, incluye factores tales como altura del follaje, porcentaje del área cubierta por el follaje y tamaño de gota (efecto tipo I)

C_2 = efecto de la cobertura del follaje y de residuos y vegetación en contacto directo con el suelo (efecto tipo II)

C_3 = efecto residual del uso del suelo (efecto tipo III).

De acuerdo a Wischmeier (1976), la EUPS puede usarse para los siguientes fines:

- a) En la predicción del volumen medio de suelo transportado bajo ciertas circunstancias biofísicas y de manejo específico del suelo.
- b) En la determinación de sistemas de manejo, cultivos y prácticas de conservación específicas para sitios específicos.
- c) Para estimar los cambios en pérdida de suelo, como resultado de los cambios introducidos por el agricultor en su sistema de cultivo.
- d) En la determinación del cultivo intensivo que podría soportar un terreno en condiciones de conservación específicas: contornos, terrazas, cultivos en franjas, etc.
- e) En la determinación de la máxima longitud de la pendiente tolerable para sistemas de cultivo y manejo.
- f) En la proporción de datos de pérdida de suelo locales, útiles en la discusión de las necesidades de control y planes de conservación.
- g) Para la estimación de pérdidas de suelo producto de construcción, pastizales, plantaciones y áreas recreativas

Se debe cuidar el uso de la ecuación en los siguientes aspectos:

- a) Se puede calcular adecuadamente la pérdida de suelo anual media en una cuenca, pero sí la complejidad de ésta lo exige debe subdividirse en áreas que representen los valores de los seis factores de la ecuación.
- b) Si la ecuación se aplica a un evento de lluvia en particular, usando el índice de erosividad de un evento (EI_{30}) para la erosividad de la lluvia (R) y la tasa de pérdida de suelo del estado de cultivo relevante para la cobertura vegetal (C), se estimará la

pérdida de suelo media para n repeticiones de ese evento, en tales circunstancias biofísicas, pero puede diferir del promedio.

- c) Las tasas de pérdida de suelo tienen una tabulación para periodos que cubren intervalos de 1 a 3 meses, es más alta al inicio que el promedio debido al gradual desarrollo de la cobertura, posteriormente desciende a niveles más bajos que el promedio. El efecto de la cobertura en un año específico puede estar influido por la desviación de la distribución estacional de EI_{30} .
- d) Las condiciones a ser evaluadas deben ser claramente definidas, para que los valores seleccionados representen las condiciones estudiadas.
- e) Si la ecuación se usa para generar datos de pérdida de suelo y correlacionarlos con otros parámetros como la deposición o sedimentación; la precisión en la evaluación del factor es fundamental, por lo tanto debe ejercitarse un mayor juicio en la selección de los valores del factor, considerando las diferencias de los promedios y condiciones en operaciones normales de campo; reconvertir una práctica de manejo no desaparece los efectos residuales en forma inmediata, la influencia del sistema precedente puede permanecer por varios años.

2.9. Conclusiones de revisión de literatura

El estudio de la erosión es relativamente viejo en los sistemas de producción agrícola; sin embargo, en los sistemas agroforestales existen pocos estudios sobre este problema. Específicamente, en los sistemas de café bajo sombra de manera teórica se mencionan muchas de las ventajas que puede tener el uso de los árboles de sombra para la conservación y fertilidad de los suelos, pero hace falta investigación aplicada sobre la erosión bajo diferentes condiciones de manejo, tipos de suelo, especies asociadas y arreglos topológicos en las plantaciones de café que generen conocimiento científico sobre la importancia de este tipo de sistemas de producción para la conservación del suelo.

La EUPS es un modelo que presenta algunas limitaciones en su aplicación para el estudio de la erosión en los sistemas agroforestales, por dos razones: a) esta diseñada

para lotes muy pequeños, donde para el caso de la agroforestería se dificulta su instalación por la presencia de árboles que muchas veces poseen fustes de gran grosor y b) para el factor cobertura no ha determinado valores que representen las condiciones de una cobertura multiestrato, como se presenta en los sistemas de producción bajo sombra, donde se combinan herbáceas, arbustos y árboles.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivos

Con el propósito de generar información que sustente la toma de decisiones y las acciones de conservación de los productores y su organización para mantener e incluso mejorar la productividad de sus sistemas agroforestales de café en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver., en la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos:

3.1.1. Objetivo General

Estudiar la erosión hídrica en los sistemas agroforestales de café de la región Huasteca Alta de Veracruz.

3.1.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar la escorrentía superficial y la erosión en los sistemas agroforestales rusticano y policultivo tradicional mejorado, de plantación de café.
- 2) Evaluar el efecto de la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, longitud y grado de la pendiente, la cobertura aérea y superficial, y las prácticas de conservación, sobre la erosión del suelo en los sistemas agroforestales de café estudiados con fines de estimación.

3.2. Hipótesis

Acorde con los objetivos específicos que guiaron el desarrollo de la presente investigación, se plantearon las siguientes hipótesis:

- 1) La escorrentía superficial y la erosión del suelo es menor en los sistemas agroforestales de café en policultivo tradicional mejorado que en el sistema tradicional rusticano.

- 2) Considerando que el efecto de la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo y la pendiente pueden ser iguales en los sistemas agroforestales rusticano y policultivo tradicional mejorado de producción de café, la mayor pérdida de suelo esperada en el sistema tradicional rusticano se explica por la falta de prácticas de conservación del suelo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la comunidad de El Coyol, perteneciente al municipio de Tlachichilco, Ver. (Figura 3), siendo sus coordenadas geográficas 20° 40' 32'' de latitud norte y 98° 10' 12'' de longitud oeste (SPP, 1983a). El municipio se localiza en la porción norte del estado, en la región denominada Huasteca Alta, limita al norte con el municipio de Zontecomatlán, al sur con el estado de Hidalgo, al este con el municipio de Ixhuatlán de Madero, al oeste con los municipios de Zacualpan y Texcatepec. El municipio tiene una extensión territorial de 291.18 km², se integra por dos comunidades agrarias y seis ejidos, con un total de 67 localidades. Su altura promedio sobre el nivel del mar es de 861 m (SEGOB, 1988 y 2001; INEGI, 2000a).

4.1.2. Geología

Tlachichilco se formó durante el Cretácico, periodo durante el cual se formaron grandes depósitos de sedimentos calcáreos de facies de plataforma que junto con las secuencias marinas arcillosas y calcáreo-arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior, conforman el edificio sedimentario de la Sierra Madre Oriental. Esta secuencia mesozoica, se ve afectada en algunas localidades por emplazamientos plutónicos de edad Terciaria (SPP, 1983c).

4.1.3. Fisiografía y relieve

La región Huasteca Alta forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, la cual se caracteriza por presentar una topografía abrupta, siendo mayor hacia el este que hacia el oeste (SPP, 1983a). El área de estudio corresponde a laderas de una sierra compleja de materiales fuertemente plegados con pendientes superiores al 20 %. Las rocas que afloran en la Sierra Madre Oriental son sedimentarias, donde se desarrolla un patrón de drenaje dendrítico-subparalelo de densidad media y controlado por fallas y

fracturas sobre rocas de naturaleza clástica como son lutita-arenisca, arenisca y conglomerado cementado (SPP, 1983c).

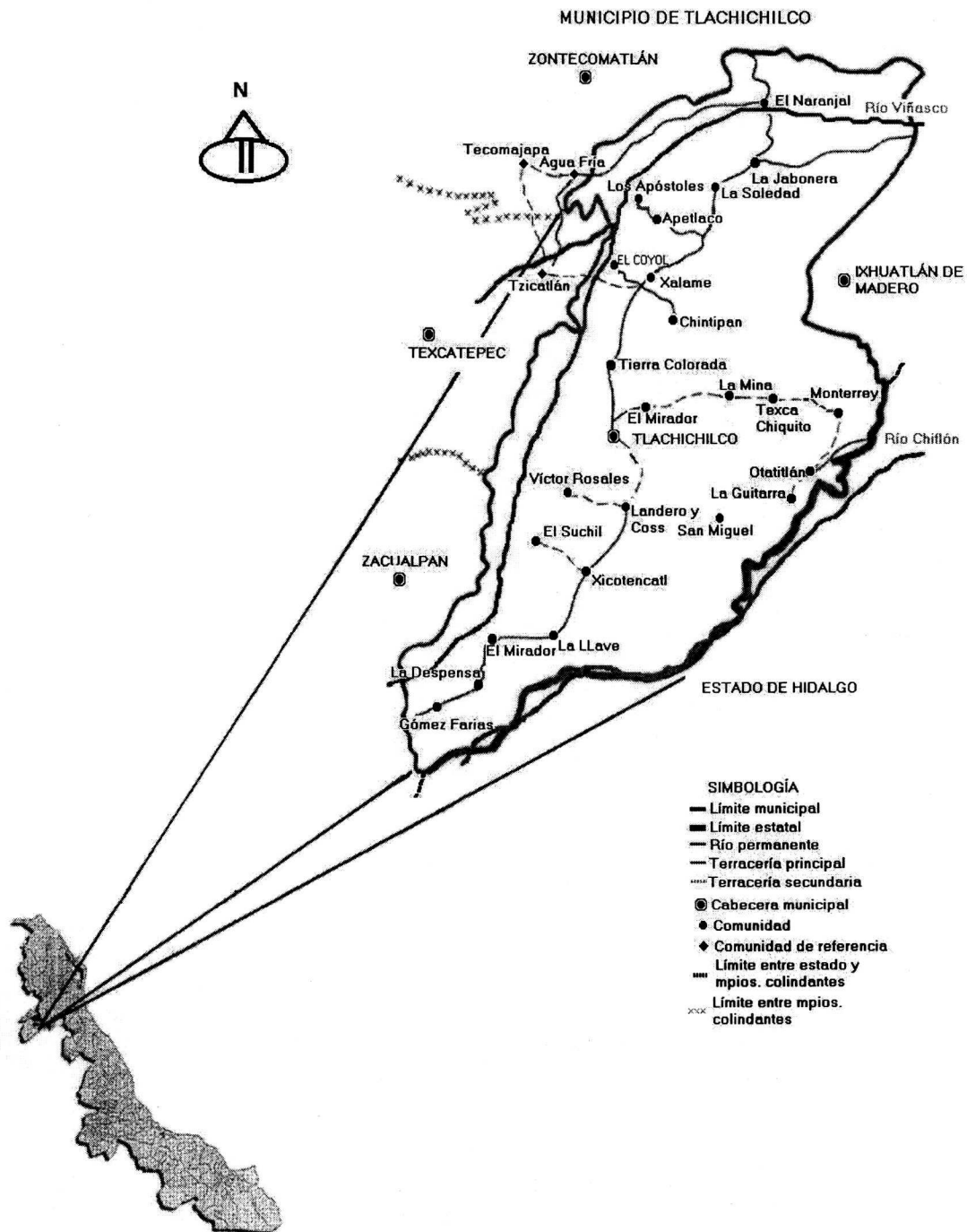


Figura 3. Ubicación geográfica de la comunidad de El Coyo, Tlachichilco, Ver.

4.1.4. Clima

El isoyeta media anual es de 2000 mm y el isoterma media anual es de 22° C, el clima es semicálido húmedo, entre los 500 y 1000 msnm (SPP, 1983b), intervalo en el que se ubica el área de estudio.

4.1.5. Hidrología

La zona pertenece a la región hidrológica Tuxpan-Nautla en la que las corrientes principales son los ríos Viñasco, Zacualpan, Chiflón, Pantepec, Acalman, San Marcos, Tlalcoxitla y Texcapa que escurren con dirección noreste. Los seis primeros ríos son afluentes del río Tuxpan (SPP, 1983b). Por el municipio pasan ríos de caudal corto que vierten sus aguas al río Viñasco mismo que cruza al municipio de poniente a norte (SEGOB, 1988).

La unidad de escurrimiento más alto, donde más del 30% de la precipitación tiende a fluir superficialmente, se localiza en sectores de la sierra que se conforman con materiales impermeabilizables y donde las lluvias son muy abundantes, mayor de 1800 mm donde la cubierta vegetal es moderadamente densa y mayor de 2100 mm donde esta es densa (SPP, 1983b).

4.1.6. Suelos

Los suelos de la zona de influencia de la comunidad de El Coyol, por lo general tienen un estrato superficial muy rico en materia orgánica y se pueden distinguir dos clases principalmente, las cuales están relacionadas con las características del material parental. En las áreas donde predominan las lutitas en la parte superior, se tienen suelos más arcillosos y con mal drenaje interno, lo que genera condiciones de saturación en buena parte del año, desde los 50 cm a más profundidad, así como una permeabilidad muy lenta con altos escurrimientos.

Los suelos derivados de materiales donde predomina la arenisca en el estrato superior, tienen mejor permeabilidad y presentan una cantidad apreciable de piedras en la superficie y a lo largo del perfil, como consecuencia de la mejor permeabilidad tienen un buen drenaje interno y son de colores rojizos en las capas subsuperficiales.

En este estudio, se realizó la clasificación del suelo en dos sitios representativos de las dos clases de suelos dominantes de la zona.

4.1.6.1. Clasificación de los suelos

- **Descripción del sitio 1**

Localización. El perfil representativo del sitio 1 se ubica a 3 m al NNW de la parcela experimental denominada tratamiento T2, definido más adelante.

Relieve. El relieve particular del sitio 1 es una ladera media con orientación al NE.

Drenaje superficial. El drenaje particular del sitio va de rápido a muy rápido.

Drenaje interno. Debido a que las capas inferiores presentan condiciones de saturación y la permeabilidad del agua a través del perfil es muy lenta, el drenaje es imperfecto.

Material parental. Predominan las lutitas calcáreas con pequeños estratos de areniscas.

Pedregosidad. En la superficie del suelo se encuentran muy pocas rocas y piedras que son fragmentos de arenisca parcialmente intemperizada.

- **Descripción del perfil del sitio 1**

Ap 0-22 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; migajón arcillo limoso; estructura de bloques angulares medios a gruesos fuertemente desarrollados en la mayor parte del horizonte, presentando algunas áreas superficiales con estructura granular mediana a gruesa, moderadamente desarrollada; muy friable en húmedo, muy plástico y adherente en mojado; muchos poros finos, muy finos y gruesos, tubulares, verticales y con localización dentro y fuera de los agregados; raíces muy finas, finas y gruesas comunes y muchas medias, localizadas dentro de los poros y sobre las caras de los agregados; permeabilidad lenta; transición a la siguiente capa clara y horizontal.

AB 22 – 43 cm; pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; migajón arcillo limoso; estructura de columnas que rompen a bloques angulares gruesos, fuertemente

desarrollada; muy firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; muchos poros finos y los muy finos son comunes, tubulares y verticales, dentro y fuera de los agregados; raíces comunes de muy finas, finas, medias y gruesas; permeabilidad muy lenta; como rasgo especial se encuentran a lo largo de esta capa fragmentos de arenisca parcialmente intemperizada como de 5 cm de diámetro; transición a la siguiente capa clara y ondulada.

Btg 43-63 cm; el 70% de la capa presenta color pardo amarillento (10YR 5/6) y el otro 30% se caracteriza por grisáceo oscuro (10YR 4/2), ambos en húmedo; arcilla; estructura de columnas muy gruesas fuertemente desarrolladas; muy firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; muchos poros muy finos y finos, tubulares, verticales y dentro y fuera de los agregados; raíces muy finas comunes y pocas de las finas, medias y gruesas; permeabilidad muy lenta; transición a la siguiente capa clara y horizontal.

Bg 63-100 cm; el 85% de la capa es de color gris (10YR 5/1) y en el resto el color es pardo amarillento (10YR 5/6) ambos en húmedo; migajón arcillo limoso; estructura masiva que rompe a columnas grandes; muy firme en húmedo, plástico y adherente en mojado; poros comunes finos y muy finos, tubulares, verticales y localizados a lo largo de toda la capa; pocas raíces muy finas, finas y gruesas; permeabilidad muy lenta.

En el Cuadro A1 de anexos se presentan las características físicas y químicas del suelo del sitio 1 y en la Figura 4 se presenta una fotografía representativa del sitio 1.

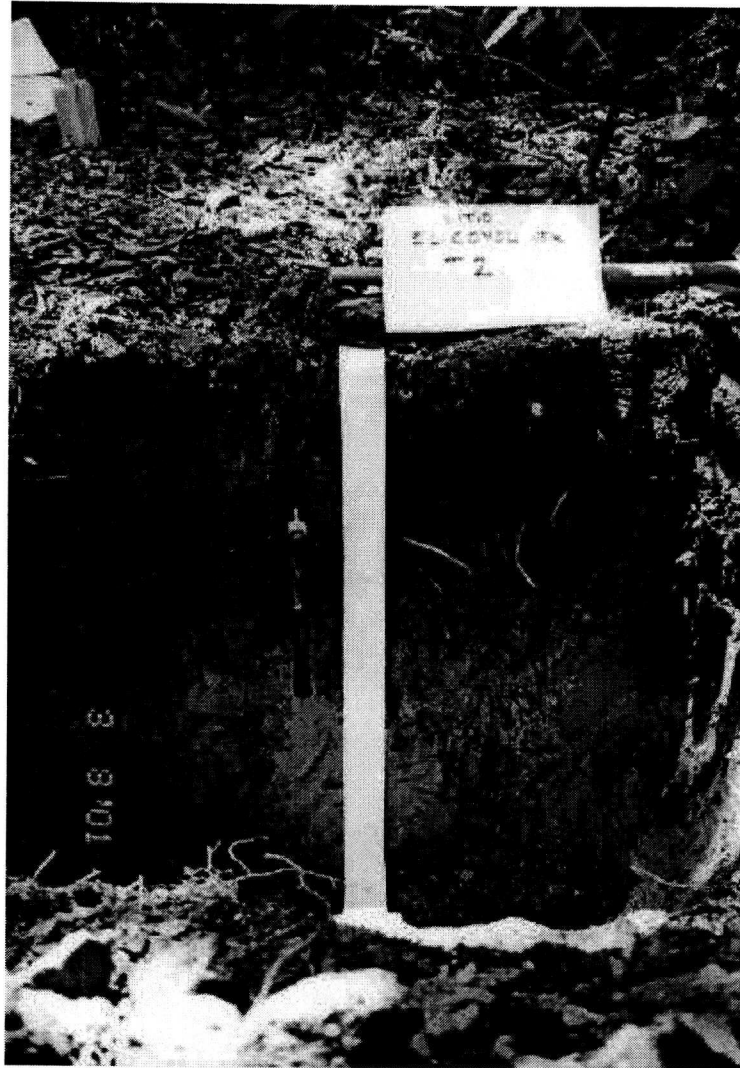


Figura 4. Perfil del sitio 1 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

De acuerdo con el sistema del USDA (Soil Survey Staff, 1998) el suelo del sitio 1 se clasifica en el orden Mollisol, como consecuencia de que su capa superficial y la subyacente son muy ricas en materia orgánica y de colores oscuros; además, a pesar de que el pH del suelo a lo largo del perfil es ácido a moderadamente ácido, la saturación de bases es alta y no presenta problemas con la acidez intercambiable. Se cuenta con humedad aprovechable en la zona de influencia al perfil del suelo la mayor parte del año, siendo el déficit de la misma menor de 90 días acumulativos, por lo que su régimen de humedad es Udico siendo el suborden Udoll. A nivel de subgrupo se indica que se tienen condiciones de saturación del suelo a una profundidad mayor de los 40 centímetros, en buena parte del año lo que se aprecia por los colores de la matriz del

suelo en estas capas, sobre todo a profundidades mayores de los 63 cm, resultando Oxiacuic Haludoll.

De acuerdo con el sistema FAO (1998) y considerando las características descritas con anterioridad, en las que se denota la capa superficial rica en materia orgánica, colores oscuros y la condición de mal drenaje a partir de los 43 cm, el suelo corresponde al taxa Phaeozem Gleyico (PHg).

- **Descripción del sitio 2**

Localización. El perfil representativo del sitio 2 se ubica a 3 m al E de la parcela experimental denominada tratamiento T5, definido más adelante.

Relieve. El relieve particular del sitio 2 es una ladera media tendida con orientación al N.

Drenaje superficial. El drenaje particular del sitio va de rápido a moderadamente rápido.

Drenaje interno. El sitio presenta capas inferiores con condiciones de oxidoreducción debido a que la permeabilidad del agua a través del perfil es de moderada a lenta con flujo lateral del agua, por lo que el drenaje es moderadamente bueno.

Material parental. Predominan las areniscas calcáreas con áreas pequeñas de lutitas calcáreas estratificadas.

Pedregosidad. En la superficie del suelo se encuentran pocas rocas y piedras, las cuales son areniscas.

- **Descripción del perfil del sitio 2**

Ap	0-15 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; migajón arcillo limoso; estructura de bloques angulares medios a gruesos fuertemente desarrollados; firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; muchos poros finos, muy finos y gruesos, comunes medios, tubulares,
----	---

verticales y con localización dentro y fuera de los agregados; raíces muy finas, finas, medias y gruesas comunes, localizadas dentro de los poros y sobre las caras de los agregados; permeabilidad media a lenta; como rasgos especiales se tiene como 3% de fragmentos de carbón, producto de la quema de material vegetal; transición a la siguiente capa clara y ligeramente ondulada.

- AB 15-48 cm; pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo; Arcilla limosa; estructura de columnas gruesas fuertemente desarrollada; firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; poros muy finos, finos, medios y gruesos comunes, tubulares y verticales, dentro y fuera de los agregados; raíces muy finas, finas y medias comunes y pocas gruesas; permeabilidad lenta; como rasgo especial se encuentran a lo largo de esta capa como el 5% de fragmentos de arenisca parcialmente intemperizada, como de 5 a 10 centímetros de diámetro y como 1% de fragmentos de carbón; transición a la siguiente capa clara y ondulada.
- BC 48-105 cm; el 70% de la capa presenta color pardo fuerte (7.5YR 4.5/6), el 20% se caracteriza por pardo amarillento (10YR 6/6), el 9% por Rojo oscuro (2.5YR 3/6), el 1% por Rojo oscuro (2.5YR 3/6) todos en húmedo; Arcilla limosa; estructura masiva; firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; poros muy finos y finos comunes, tubulares y verticales; pocas raíces muy finas, finas y medias; permeabilidad lenta; como rasgos especiales se tiene como 50% de fragmentos de arenisca intemperizada, de tamaños variables que van de 5 a 15 cm, además de algunos revestimientos de manganeso sobre la cara de los fragmentos de rocas.

En el Cuadro A2 de anexos se presentan las características físicas y químicas del suelo y en la Figura 5 se presenta una fotografía representativa del sitio 2.



Figura 5. Perfil del sitio 2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

De acuerdo con el sistema USDA (Soil Survey Staff, 1998), el suelo del sitio 2 se clasifica en el orden Inceptisol, dado que la capa superficial rica en materia orgánica solo tiene 15 cm de espesor y la capa subyacente a pesar de que también es rica en materia orgánica sus colores son menos oscuros que los que se requieren para que el horizonte sea Mólico. El segundo y tercer horizonte se consideran como Cambicos debido a la acumulación de arcilla y los colores rojizos (del tercer horizonte). A nivel de suborden el redimen de humedad Udico es característico de estos suelos, aunque con tendencia a que sea mayor el número de días en que la sección control del suelo presente mayor déficit de humedad que los anteriormente descritos. A nivel de gran grupo se refleja que a pesar de que el pH del suelo sea moderadamente ácido, la saturación de bases es alta y no se tienen problemas de acidez intercambiable, por lo que se denota como un Eutroudepts, que señala la buena fertilidad del mismo. A nivel de subgrupo es el típico de estos suelos por lo que en el nombre de la taxa resulta como Typic Eutroudepts.

De acuerdo al sistema FAO (1998) y considerando las características descritas con anterioridad, el suelo del sitio 2 pertenece al grupo de los Cambisoles como

consecuencia de la presencia del horizonte cambico y a la unidad de los crómicos por el color del tercer horizonte cuyas características son de un alto grado de oxidación debido al flujo lateral del agua a través de él, tomando en cuenta también el buen nivel de fertilidad del suelo cuya capa superior es muy rica en materia orgánica y alta saturación de bases. Así, el suelo corresponde al taxa Cambisol crómico (ortieutricto) (CMx).

4.1.7. Vegetación

En la vertiente exterior de las Huastecas y la Sierra Norte de Puebla, chocan los vientos húmedos procedentes del Atlántico, lo que da origen al bosque tropical perenne (Bassols, 1987) característico de la región donde se encuentra el área de estudio. Actualmente la vegetación natural de la Huasteca se encuentra muy perturbada, por la actividad agrícola y ganadera. Las características climáticas existentes en el lugar son favorables para la agricultura que se puede llevar a cabo casi ininterrumpidamente por la abundante agua y los fotoperiodos largos. La limitante es el relieve accidentado del terreno y las propiedades del suelo que a menudo no son las adecuadas para una agricultura intensiva, la única que puede practicarse con cierto éxito es el cultivo intermitente que afecta fuertemente a la vegetación, es un sistema de agricultura seminómada, característico de muchas áreas del este y sureste de México, consiste en la secuencia de desmonte, incendio, siembra de maíz durante una o algunas temporadas sucesivas y abandono por unos años, al cabo de los cuales se repite el mismo proceso. El resultado de esta práctica es la afectación de enormes extensiones de terreno de los cuales desaparece el bosque original y el área se convierte en un mosaico formado por una serie de comunidades vegetales secundarias de tipo herbáceo, arbustivo y arbóreo, conocidos comúnmente como “acahuales” (Rzedowski, 1988).

El cultivo de café en México es propio de terrenos cerriles, por las características topográficas y climáticas del municipio de Tlachichilco se practica en esas condiciones, al igual que el cultivo de maíz. Los pastos inducidos también cobran importancia en esas condiciones de terreno por la actividad ganadera que se desarrolla en la región.

4.1.8. Características sociales

El municipio de Tlachichilco de acuerdo a la SEGOB (2001), es considerado de alta marginación. A partir de la década de los 80's se da cierta presencia institucional (comunicación personal del Sr. Ignacio Montes de Oca)¹, principalmente con programas del Instituto Nacional Indigenista (INI) y del desaparecido Instituto Mexicano del Café (INMECAFE). Actualmente aun persisten en la región problemas de analfabetismo, desnutrición y desempleo, situación común de todas las comunidades indígenas del país.

La tasa de crecimiento poblacional anual del municipio se encuentra por encima de la nacional. De 1995 a 2000 se presentó una tasa de crecimiento anual de 4.3% (INEGI 1997a; INEGI, 2000b). Aunque la calidad de vida no sea la adecuada, en los últimos años a través del establecimiento de centros de salud y programas asistencialistas como ahora el Programa de Educación, Salud y Alimentación (PROGRESA), han bajado los índices de mortandad; estos apoyos han sido un atenuante a la pobreza existente en la región.

4.1.8.1. Educación

En la década de los 90's hubo un importante impulso en los aspectos educativos del municipio; en el periodo de 1990 a 1995, alcanzó una tasa de crecimiento anual de alfabetismo del 14.7%, la cual está muy por encima de la tasa registrada en el mismo periodo para el crecimiento poblacional que fue del 2.8%. Sin embargo, falta mayor atención a la educación, porque el índice de población analfabeta es alto, para el mismo periodo apenas se logró reducir un 4.7%; nuevamente, como un problema atribuible a la marginación en que viven muchas familias indígenas, donde por problemas económicos personas en edad de estudiar no lo hacen por contribuir a temprana edad al ingreso familiar para satisfacer las necesidades presentes (INEGI, 1991b; INEGI, 1997b).

4.1.8.2. Salud

De acuerdo a INEGI (1999) la población del municipio de Tlachichilco cuenta con siete centros de atención médica, seis del IMSS Solidaridad norte y uno de la SSA. Sin

¹ Promotor de Desarrollo de la UENOT y vecino de la comunidad de El Coyol.

embargo, para recibir asistencia médica especializada, la gente tiene que desplazarse cientos de kilómetros.

4.1.8.3. Cultura

El municipio de Tlachichilco es eminentemente rural, con una importante composición étnica integrada en orden de importancia por la cultura Tepehua, Otomí y Nahuatl, 44.3%, 31.7% y 24.0%, respectivamente. De la población total que habla lengua indígena, el 94.4% es bilingüe, además de su lengua materna hablan el español. Esta población en términos de la sustentabilidad es importante por su cosmovisión y conocimiento tradicional del manejo integrado de los recursos naturales, que se caracteriza por emplear métodos menos intensivos en favor de la regeneración de los ecosistemas y del ciclaje de nutrientes, así como por sus prácticas solidarias de apoyo mutuo y herbolaria. Sin embargo, son características que se van perdiendo por los procesos de transculturización, influidos principalmente por la emigración de la población joven que posteriormente regresa con nuevas ideas a su comunidad (INEGI, 1996b; INEGI, 1997a).

4.1.9. Características económicas

La economía de Tlachichilco de acuerdo a (SEGOB, 2001) se basa en el sector primario (87.5%), principalmente en el cultivo de maíz y café. Actualmente el bajo precio del café afecta a los productores, lo que estimula más el flujo de emigración hacia la Ciudad de México y a las ciudades maquiladoras del norte del país, así como hacia los Estados Unidos de Norteamérica.

4.1.9.1. Población ocupada

De la población total en edad de trabajar solo el 27.4% percibe un ingreso, el 26.3% se suma a las actividades productivas pero no percibe remuneración económica, característica común en la economía campesina, donde la esposa y los hijos se suman al trabajo de la parcela sin percibir ningún ingreso. De la población ocupada, la mayor parte se canaliza hacia el sector primario con un 90.7%, el sector secundario y terciario, se integra por el restante 9.3%. De esta población el 84.5% percibe menos de un salario

mínimo, situación que refleja la pobreza del campo en el municipio de Tlachichilco (INEGI, 1997b, SEGOB, 2001).

4.1.9.2. Agricultura

La actividad agrícola es de temporal y la producción se destina principalmente al autoconsumo. La actividad con fines comerciales es la cafecultura y la ganadería de bovinos de doble propósito, esta última en manos de la población mestiza del municipio. Los principales cultivos son el maíz, el frijol, el chile, la naranja, la mandarina y otros cultivos que forman parte de la dieta local, en el caso de la naranja se tiene una producción importante pero no existen los canales de comercialización.

De acuerdo a INEGI (1997b), en el municipio de un total de 19,935.5 ha, en 1991 la mayor parte estaba dedicada a la agricultura con el 67.9%, seguida por la ganadería con el 29.4%, con selva el 2.5% y el área sin vegetación fue del 0.2%. Lo que demuestra, la importancia de la actividad agrícola, compuesta por el cultivo de maíz y café, principalmente, como se muestra en el Cuadro 12. En el ciclo 1998/99, 70 ha fueron fertilizadas en el municipio y 680 ha fueron atendidas con servicios de sanidad vegetal (INEGI, 2000a), lo que da un porcentaje de atención muy reducido con ese tipo de servicios, situación que refleja un manejo rústico de la tierra en Tlachichilco, con un uso muy reducido de agroquímicos y apoyada con las herramientas de trabajo básicas.

Cuadro 12. Superficie sembrada y cosechada por año agrícola y tipo de cultivo. Tlachichilco, Ver.

Año agrícola	Cultivo	Superficie (ha)	
		Sembrada	cosechada
1995/96	Caña de azúcar	60.00	60.00
1995/96	Naranja	70.00	70.00
1998/99	Naranja	70.00	70.00
1995/96	Café	2500.00	2500.00
1998/99	Café	2500.00	2500.00
1995/96	Maíz	3345.00	3345.00
1998/99	Maíz	3410.00	3002.00
1995/96	Frijol	728.00	728.00
1998/99	Frijol	717.00	717.00

Fuente: INEGI, 1998; INEGI, 2000a.

4.1.9.3. Ganadería

La actividad ganadera ha adquirido importancia en el municipio durante los últimos años. En 1991, el municipio contaba con una superficie de 5,863.6 ha reportadas como agostadero (INEGI, 1997b), para el ciclo 1998/99 se registra una superficie total de 11,335 ha, de las cuales 30% son pastos inducidos y 70% son pastos naturales (INEGI, 2000a). La ganadería de bovinos que se práctica es de doble propósito y de tipo extensivo.

4.1.9.4. Forestal

La actividad forestal en el municipio es escasa, situación que obedece a las pocas especies cuya madera tienen demanda comercial, con este fin sólo el cedro rojo (*Cedrela odorata* L) se explota a pequeña escala producto de la regeneración natural. En la región, el aprovechamiento forestal se orienta básicamente a la satisfacción de necesidades locales: construcción, producción de muebles y obtención de leña.

4.1.9.5. Volumen y valor de la producción del café

En el municipio de Tlachichilco el volumen de la producción de café de 1995 a 1999 se mantuvo casi constante, mientras que el valor de la producción se redujo en un 50% (INEGI, 1998; INEGI, 1999; INEGI, 2000a), lo que refleja la fuerte caída del precio internacional del café.

4.1.9.6. Apoyos a la producción

Los apoyos a la producción en el municipio han fluido principalmente a través del PROCAMPO, respecto a productores beneficiados ha bajado el número, pero la superficie beneficiada aumentó de manera importante (INEGI, 1996a; INEGI, 2000a; INEGI, 1997b).

4.2. Características del manejo de los cafetales en la comunidad de El Coyol

Las variedades de café que cultivan en El Coyol, son de porte alto (Typica, Bourbon, Mundo Novo), que comúnmente se plantan a bajas densidades, de 1,000 a 1,800 plantas por hectárea y de porte bajo (Catuaí, Caturra, Garnica y Oro Azteca), con las cuales se pueden tener densidades de hasta 5,000 plantas por hectárea (Arellano, 1990). En este

caso, la mayoría de los productores introducen dentro de las parcelas más de una variedad, empleando el mismo distanciamiento de siembra. La distancia de siembra que domina es la de 2.5 por 2.5 m entre planta y planta (1,600 plantas por ha), trazada en tres bolillo, marco real o curva a nivel.

La sombra que se proporciona al café principalmente es de *Inga* spp., aunque técnicamente se recomienda que se establezca a un distanciamiento de 10 m por 10 m entre planta y planta, en cada una de las parcelas evaluadas no existe un distanciamiento definido, es común encontrar una alta densidad de árboles de sombra. Otras especies como la macadamia, naranja, aguacate, plátano, pioche, cedro y jobo, se encuentran asociados al cafeto, algunas de ellas también cumplen la función de proporcionar sombra, pero sus densidades son mucho menores, su establecimiento dentro de los cafetales principalmente es para satisfacer el consumo familiar.

La cosecha de café se hace cuando el fruto presenta una maduración uniforme, durante el ciclo se realizan tres cortes, en ocasiones más. Los primeros cortes son de selección y el último de arrase, la cosecha se realiza de noviembre a enero.

4.3. Descripción de los sistemas y tratamientos estudiados

El estudio evaluó la pérdida de suelo y agua en dos sistemas de producción de café bajo sombra, característicos del municipio de Tlachichilco. Los sistemas son: el Sistema Rusticano de Café que utiliza como árboles de sombra especies nativas y de gran tamaño, el cual se consideró como sistema testigo y el Policultivo Tradicional Mejorado de Café que es un sistema bajo sombra con un estrato arbóreo y arbustivo compuesto por diversas especies de usos múltiples con una arquitectura irregular, donde la especie que domina es el café, los productos de las especies asociadas con el café se destinan al autoconsumo.

Las labores culturales en el cafetal se realizan en forma manual, con el uso de machete y lima, pala, talacho, cavahoyos y barreta, de acuerdo como se describe y en los tiempos indicados en el Cuadro 13. La producción es reconocida como orgánica, cuenta con la reciente certificación de Organic Crop Improvements Association (OCIA).

Cuadro 13. Labores culturales en los cafetales bajo sombra de la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Actividad	Descripción	Mes (es) en que se realiza la práctica
Control de hierbas	Se realiza dos veces al año, consiste en la eliminación de las hierbas no deseadas en la plantación de café.	Abril, septiembre u octubre
Fertilización	Es de tipo orgánico, se hace una aplicación antes de la floración, cada tres años.	Febrero
Poda y deshije	Esta práctica se realiza cuando termina la cosecha, antes de la floración. Con la poda se eliminan las ramas maltratadas y muertas. Mientras que el deshije consiste en la eliminación de chupones (brotes) que no producen.	Febrero o marzo
Recepa	Se hace cuando caen heladas o cuando se busca el rejuvenecimiento de la planta. La recepa se realiza a 10 cm de altura sobre el nivel del suelo.	Febrero o marzo
Regulación de la sombra	Se eliminan las ramas que producen mucha sombra y que obstaculizan el paso de la luz solar hacia las plantas de café.	Febrero o marzo
Renovación de cafetales o trasplante	Esta práctica consiste en la sustitución de planta enferma, dañada o de poca producción por planta nueva; en esta actividad las cepas se hacen con un cavahoyos.	Octubre, noviembre o diciembre
Control de plagas	No se realiza, actualmente se han detectado poblaciones de broca en algunas plantaciones, pero el problema no es considerado fuerte.	---
Control de enfermedades	No se realiza, porque no se ha identificado alguna que afecte de manera importante.	---

4.3.1. Medición del área de las parcelas experimentales

Para el estudio se seleccionaron cinco parcelas equivalentes a cinco tratamientos. Cada parcela experimental fue delimitada mediante una zanja y bordo con el propósito de medir el efecto del agua de lluvia que cayó directamente en ella y evitar que entrara o saliera agua del escurrimiento a los tratamientos a evaluar.

El área de cada una de las parcelas experimentales se obtuvo con la aplicación de dos métodos de campo. El primero fue el de la triangulación, consistió en la formación de triángulos sobre la parcela con el apoyo de estacas, hilos y cinta métrica. A cada triángulo se le midieron sus lados y mediante la aplicación de la ecuación 3.10 se obtuvo su área. Con la suma del área de cada triángulo trazado dentro de la parcela se obtuvo la superficie total. El segundo método consistió en un levantamiento topográfico con estación total, lo cual permitió obtener los planos topográficos y de cobertura vegetal para los cinco tratamientos presentados en las Figuras 6-10.

Para obtener el área del triángulo se utilizó la fórmula de Spiegel (1979):

$$a = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \dots\dots\dots (3.10)$$

Donde:

a = área

$$s = \frac{a + b + c}{2} = \text{semiperímetro}$$

a, b y c = lados

4.3.2. Características de los tratamientos

T1. Sistema agroforestal de café rusticano (Figura 6).

- Productor cooperante: Sr. Rosendo Rivera Cruz
- Suelo: Mollisol o Phaeozem.
- Área: 723 m², perímetro: 114.5 m, desnivel: 10 m, longitud: 42.5 m y pendiente: 27.5%.
- Altitud: 569 m.
- Edad del cafetal: 60 años.
- Variedad de café cultivada: criolla (Typica).
- Árboles de sombra: chalahuite de vaina grande (*Inga jinicuil* G. Don), chalahuite negro (*Inga* sp.) zapote amarillo (*Pouteria campechiana* Kunth), naranja criolla (*Citrus* sp.), cedro rojo (*Cedrela odorata*), tempesquite, palo de agua (*Dendropanax arboreus* (L) Planch et Decne).
- Trazo de la plantación: marco real.
- Distancia de trasplante: de 2.0 a 2.5 m entre planta y planta.
- Rendimiento de café cereza: 1604.43 kg/ha.

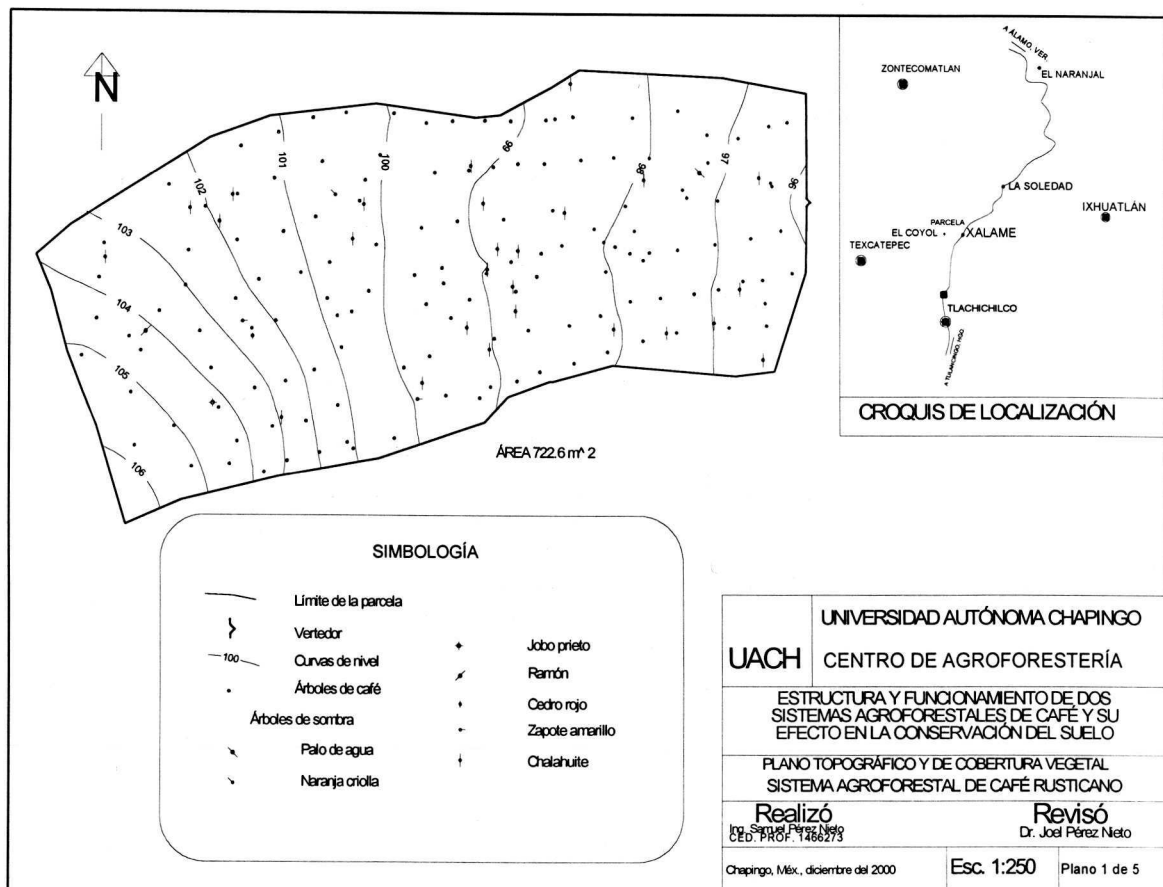


Figura 6. Plano del sistema agroforestal de café rusticano (T1)

T2. Policultivo de café tradicional mejorado con barreas vivas de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) y terrazas individuales (Figura 7).

- Productor cooperante: Sr. Clemente Rivera Rufino
- Suelo: Mollisol o Phaeozem.
- Área: 373 m², perímetro: 85.75 m, desnivel: 8 m, longitud: 33.8 m y pendiente: 37.8%.
- Altitud: 570 m.
- Edad del cafetal: 13 años.
- Variedades de café cultivadas: Garnica, Catuaí, Bourbon y Oro Azteca.
- Árboles de sombra: chalahuite de vaina grande (*Inga jinicuil* G. Don), pioche (*Melia azedarach* L) y jobo (*Spondias mombin* L), además existen otros cultivos en la parcela: plátano (*Musa* sp.), macadamia (*Macadamia* sp.) y cedro rojo (*Cedrela odorata*).
- Trazo de la plantación: curvas a nivel y tres bolillo.
- Sistema con terrazas individuales de piedra y tierra, y barreras vivas de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) establecidas en curvas a nivel.
- Distancia de trasplante: 2.5 m entre planta y planta.
- Rendimiento de café cereza: 2109.92 kg/ha.

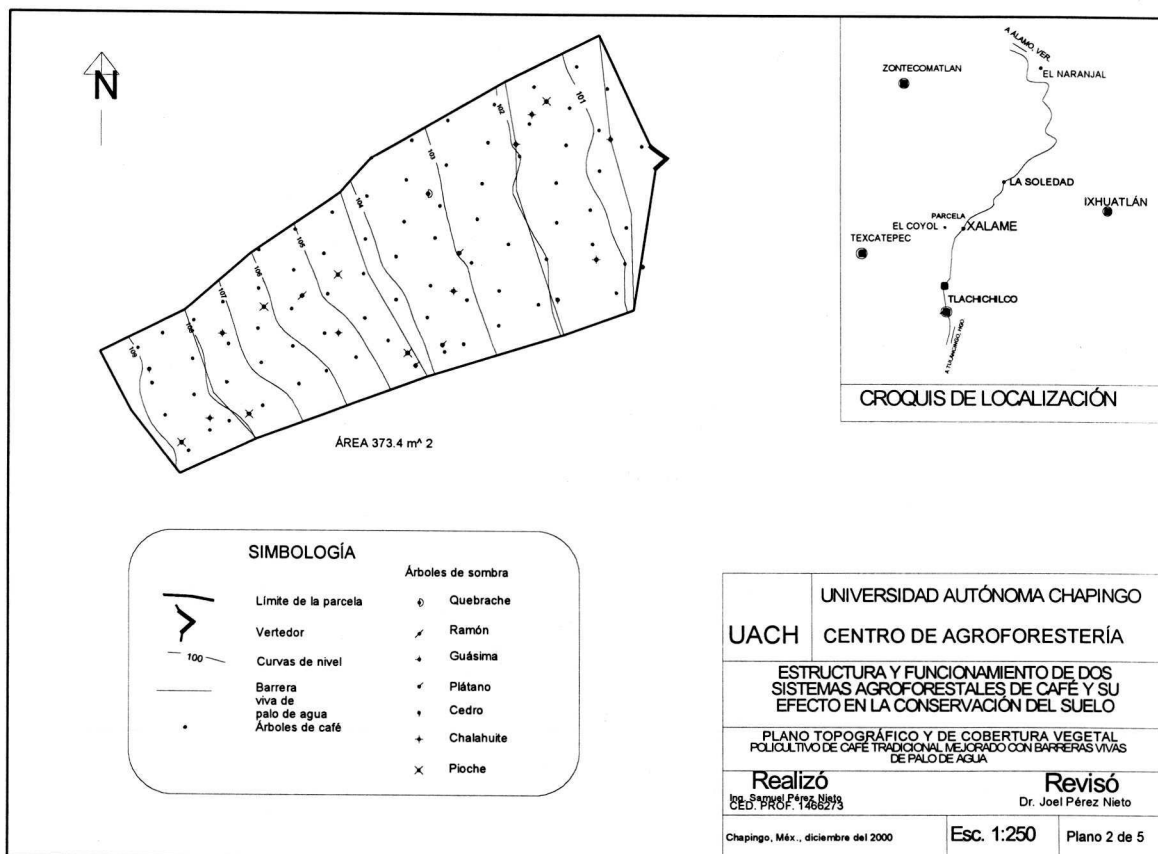


Figura 7. Plano del policultivo de café tradicional mejorado con barreas vivas de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) y terrazas individuales (T2)

T3. Plantación de café bajo sombra temporal con cobertura de canavalia (*Canavalia ensiformis* (Linneo) De Candolle) (Figura 8).

- Productor cooperante: Sr. Francisco Senobio Montes de Oca
- Suelo: Inceptisol o Cambisol.
- Área: 293 m², perímetro: 77.0 m, desnivel: 12 m, longitud: 32.5 m y pendiente: 41.9%.
- Altitud: 600 m.
- Edad del cafetal: 2 años.
- Variedades de café cultivadas: Oro Azteca, Bourbon y Garnica.
- Árboles de sombra: tesgua (*Miconia argentea* (Sw) Dc), ramón (*Brosimum alicastrum* Sw), guazima (*Guazuma ulmifolia* Lam), guaxem, jonote (*Heliocarpus donell-smithii* Rose), rabo de cojolite y chaca (*Bursera simaruba* (L) Sarg). Chalahuite chino (*Inga* sp.), chalahuite negro (*Inga* sp.) y chalahuite de vaina grande (*Inga jinicuil* G. Don) que en un futuro sustituirán a las especies nativas que actualmente proporcionan la sombra.
- Trazo de la plantación: marco real.
- Sistema con cultivo de cobertura de canavalia (*Canavalia ensiformis* (Linneo) De Candolle).
- Distancia de trasplante: 2.5 m x 2.0 m entre planta y planta.
- Rendimiento de café cereza: 211.60 kg/ha.

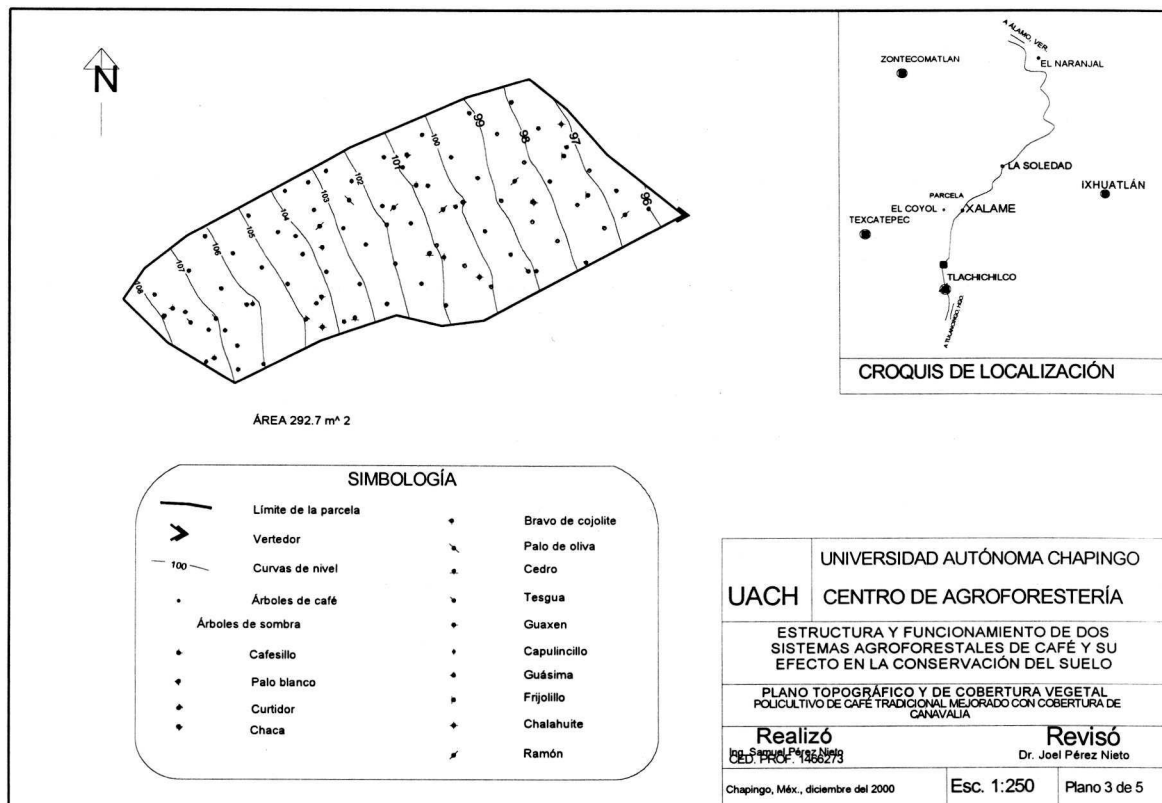


Figura 8. Plano de la plantación de café bajo sombra temporal con cobertura de canavalia (*Canavalia ensiformis* (Linneo) De Candolle) (T3)

T4. Policultivo de café tradicional mejorado con cobertura de cacahuatillo forrajero (*Arachis pintoi* Krap & Greg nom. nud. (Cook)) (Figura 9).

- Productor cooperante: Sr. Silvano Rivera Galván
- Suelo: Inceptisol o Cambisol.
- Área: 267 m², perímetro: 69.5 m, desnivel: 6 m, longitud: 17.5 m y pendiente: 37.2%.
- Altitud: 595 m.
- Edad del cafetal: 14 años.
- Variedades de café cultivadas: Catuaí y Gárnica.
- Árboles de sombra: chalahuite de vaina grande (*Inga jinicuil* G. Don), huevo de gallo, chaca (*Bursera simaruba* (L) Sarg) y naranja tardía (*Citrus* sp.)
- Trazo de la plantación: marco real.
- Sistema con cultivo de cobertura de cacahuatillo (*Arachis pintoi* Krap & Greg nom. nud. (Cook)).
- Distancia de trasplante: 2.5 x 2.0 m.
- Rendimiento de café cereza: 340.82 kg/ha.
- Rendimiento de naranja: 1241.57 kg/ha

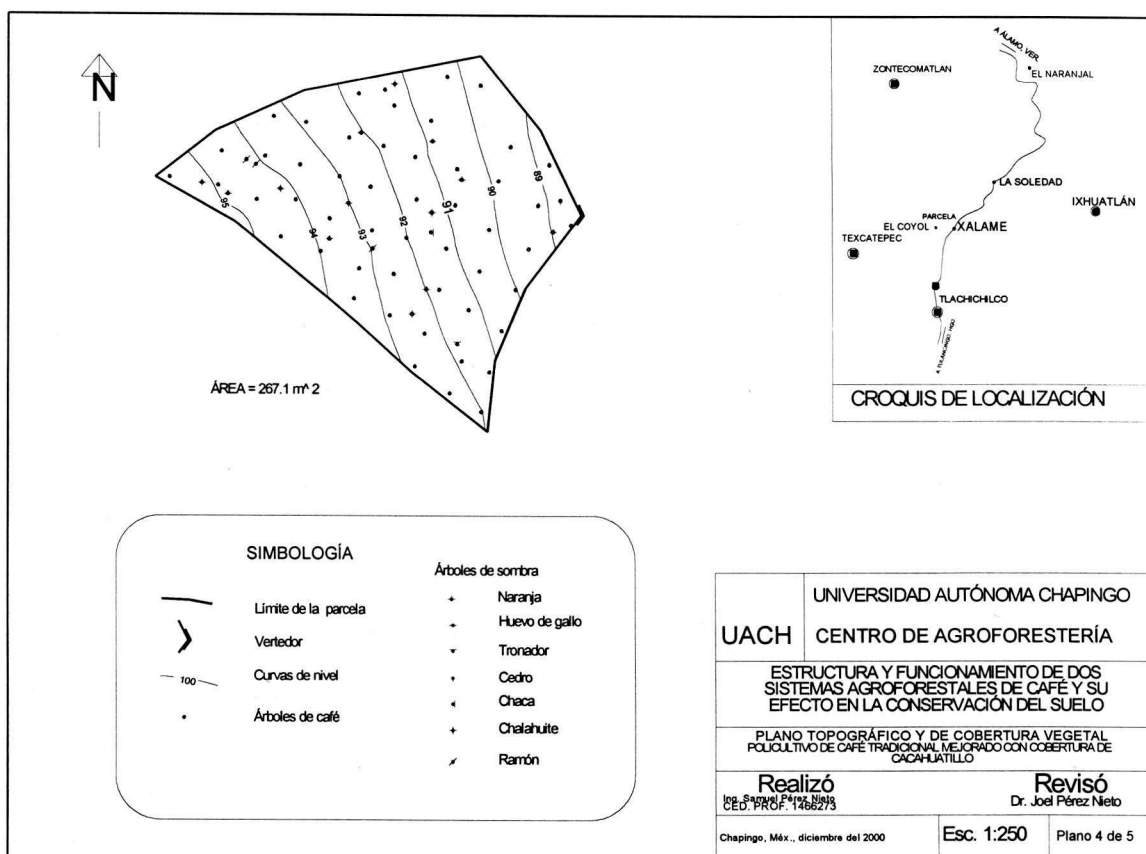


Figura 9. Plano del policultivo de café tradicional mejorado con cobertura de cacahuatillo forrajero (*Arachis pintoi* Krap & Greg nom. nud. (Cook)) (T4)

T5. Policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart), y palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) (Figura 10).

- Productor cooperante: Sr. Fernando Rivera Vicente
- Suelo: Inceptisol o Cambisol.
- Área: 515 m², perímetro: 88.5 m, desnivel: 5 m, longitud: 26.5 m y pendiente: 29.7%.
- Altitud: 545 m.
- Edad del cafetal: 12 años.
- Variedades de café cultivadas: Catuaí, Gárnica y Mundo Novo.
- Árboles de sombra: suchicuauhil (*Cordia alliodora*), chalahuite de vaina grande (*Inga jinicuil* G. Don), cedro rojo (*Cedrela odorata*), aguacate criollo (*Persea* sp.), pioche (*Melia azedarach* L), candalilla.
- Trazo de la plantación: curvas a nivel.
- Sistema con prácticas: terrazas individuales y barreras vivas de palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart) y palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) establecidas en curvas a nivel.
- Distancia de trasplante: 2 m entre planta y planta.
- Rendimiento de café cereza: 116.50 kg/ha.
- Rendimiento de semilla de palma camedor 77.67 kg/ha.

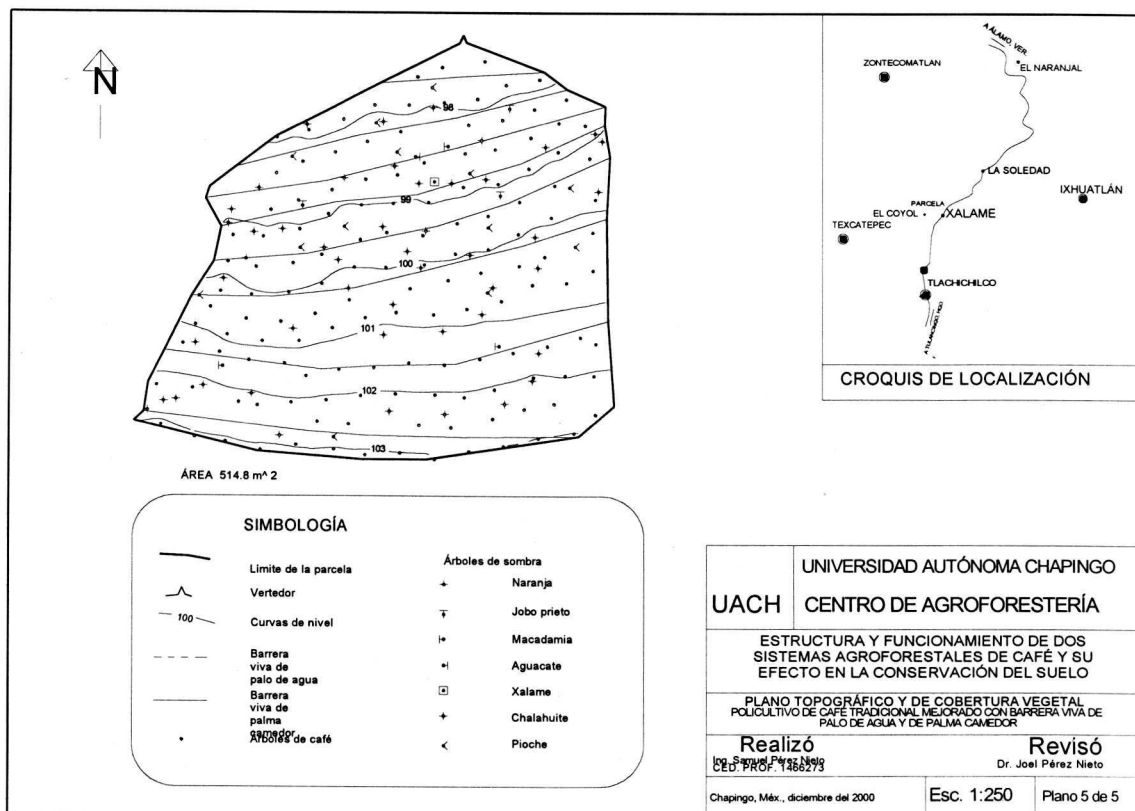


Figura 10. Plano del policultivo de café tradicional mejorado con barreras vivas de palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart) y palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) (T5)

4.3.3. Determinación de las características del suelo

En el mes de julio del año 2000 se realizó un muestreo de suelos en cada tratamiento, con el propósito de determinar algunas características químicas. El muestreo se hizo en zigzag dentro de cada parcela. Se escarbó en cinco sitios a una profundidad de 30 cm tomando cinco submuestras que conformaron una muestra compuesta de 2 kg a las profundidades 0–10, 10–20 y 20–30 cm (Figura 11). Las muestras de suelo se enviaron al laboratorio y se determinaron las siguientes características: pH, materia orgánica, nitrógeno total, contenido de nitratos, carbonatos de calcio, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables, mismas que se reportan en el Cuadro A3 de anexos.



Figura 11. Ejemplo del muestreo de suelo realizado en las parcelas experimentales en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

4.4. Determinación de la precipitación, el escurrimiento y la pérdida de suelo

4.4.1. Medición de la precipitación

De junio a diciembre del año 2000 se midió la precipitación con un pluviómetro manual marca Tru-Chek. De julio a diciembre la precipitación también se midió con un pluviómetro II marca Davis (Figura 12). Este aparato consiste en un sistema de balancín conectado a un contador que registra la acumulación sucesiva de 0.2 mm de

precipitación en un sistema de memoria computarizado, registrando además el tiempo transcurrido.

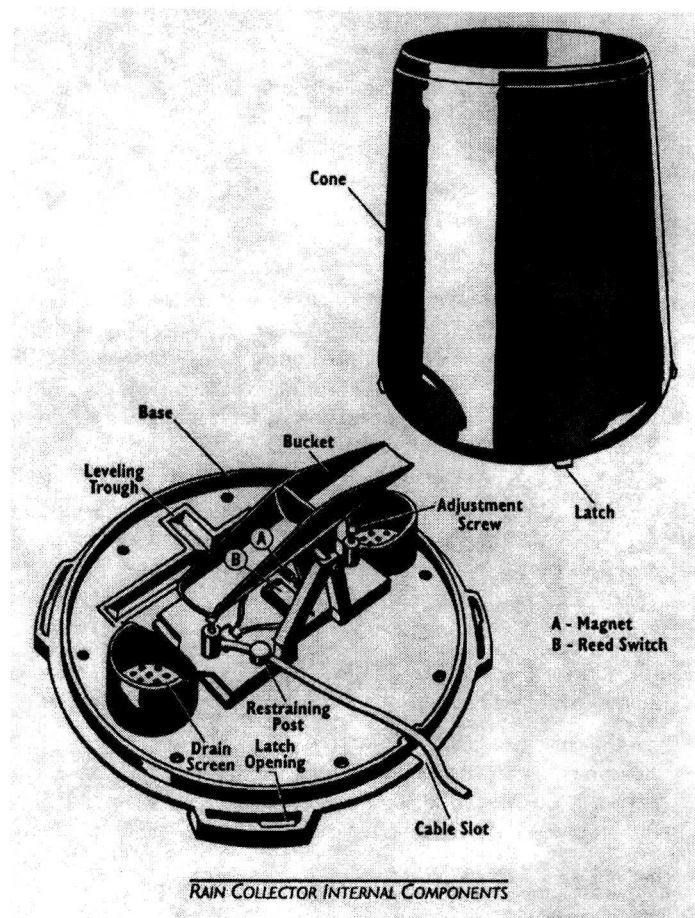


Figura 12. Pluviómetro II marca Davis utilizado para medir la precipitación en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

4.4.2. Determinación del escurrimiento

En cada parcela, se colocó un vertedor tipo “H” con capacidad de 12 L s^{-1} , un muestreador tipo Coshocton que tomó una alícuota de un centésimo del escurrimiento y dos tinacos de captación del agua tomada por el muestreador (Figura 13). El volumen de agua escurrida por tratamiento captada por los tinacos y expresada en litros (L) se presenta en el Cuadro A7 de anexos. Este volumen expresado en lámina (m) se multiplicó por el área (m^2) de la parcela experimental, obteniendo el volumen escurrido

en m³ (Cuadro A8 de anexos). Finalmente el escurrimiento se expresó por hectárea, tanto en volumen como en lámina.



Figura 13. Equipo de muestreo de escurrimiento y pérdida de sedimentos colocado en cada uno de los tratamientos en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Diariamente alrededor de las 8:00 horas después de un día lluvioso, se acudió a las parcelas y en caso de haber escurrimiento, se midió con una regla la lámina de agua captada en los tinacos, anotándolo en la libreta de campo. Una vez medida la lámina de agua escurrida, se agitó el agua para homogeneizar el contenido de sedimentos dentro del tinaco y se tomó una muestra en un frasco de aproximadamente un litro, los frascos se etiquetaron con la fecha, número de tratamiento y la lámina escurrida. Posteriormente se tiró el agua de los tinacos, dejándolos vacíos y limpios para captar el siguiente escurrimiento.

4.4.2.1. Determinación del coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determinó en función de la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido, utilizando la siguiente relación:

$$C_e = \frac{Q}{P} 100 \dots\dots\dots (3.11)$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento (%)

P = Precipitación total (mm)

Q = Volumen total escurrido (mm)

4.4.2.2. Pérdida de nutrientes por escurrimiento

Con el propósito de determinar la pérdida de nutrientes por escurrimiento se analizaron en el laboratorio tres muestras de agua de las siguientes fechas: 9 de agosto, 16 de septiembre y 7 de octubre, periodo que coincide con la etapa fenológica de crecimiento del fruto de café. Se determinó el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de NO_3^- , K^+ y Na^+ .

4.4.2.3. Condición de humedad antecedente

Para determinar la condición de humedad antecedente se acumuló la lámina precipitada de cinco días previos a partir del primer día en que se empezaron a tomar los registros de la precipitación, este procedimiento es consecutivo, de tal forma que incluye los días que no llueve, la lámina acumulada cada cinco días se ordenó según fuera el caso: seco (0 - 12.7 mm), intermedio (12.8 - 38.1 mm) y húmedo (> 38.1 mm), éstos parámetros directamente determinados por la acumulación de la precipitación durante los cinco días. Posteriormente, se separaron cada uno de los eventos por condición de humedad antecedente de acuerdo en el orden en que se fueron presentando y se relacionaron con la pérdida de suelo ocurrida bajo esa situación.

4.4.3. Determinación de la pérdida de suelo

La pérdida de suelo se determinó a partir de la concentración de sedimentos que presentaron las muestras de agua tomadas por tratamiento (Cuadro A11 de anexos). Para lo cual en el laboratorio a los frascos que contenían las muestras de sedimentos se aplicó alumbre (iones Al^{+++}) disuelto en agua en relación 1:10 para decantar los sedimentos. Después de 24 horas se vació la mayor cantidad de agua de los frascos y el excedente con todo y sedimentos se colocaron en frascos de cristal para ser secados en la estufa a 105 °C durante 24 horas. Finalmente, se obtuvo el peso de los sedimentos en una

balanza analítica para calcular con base al escurrimiento registrado en cada parcela la pérdida total de suelo por evento. La salida de sedimentos por tratamiento fue expresada en gramos por litro, en kilogramos por parcela de escurrimiento, en kilogramos por hectárea y en toneladas por hectárea.

4.4.4. Predicción de la pérdida de suelo mediante la EUPS

4.4.4.1. Erosividad de la lluvia (R)

El factor R se determinó a través del índice de Wischmeier (EI_{30}), considerando como un evento a la cantidad total de agua precipitada durante un día (24 horas a partir de las 8:00 A.M.). Para determinar el EI_{30} (ecuación 3.12) se consideró la energía cinética (ecuación 3.13 y 3.14) e intensidad máxima en 30 minutos (ecuación 3.15) para cada evento definido como erosivo. Con la suma total de todos los EI_{30} por evento se obtuvo el factor de erosividad R (ecuación 3.16).

El EI_{30} se calculó con la ecuación:

$$EI_{30} = (E)(I_{30}) \dots\dots\dots (3.12)$$

Donde:

EI_{30} = Índice de erosividad para un evento ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

E = Energía cinética total de la lluvia (MJ ha^{-1})

I_{30} = Intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (mm h^{-1})

La intensidad máxima en 30 minutos se obtuvo mediante la suma de las cantidades más grandes que se precipitaron hasta acumular 30 minutos durante un evento.

En el Cuadro A5 de anexos, aparece el procedimiento de cálculo de la energía cinética y del EI_{30} para una tormenta.

La energía cinética de la lluvia se obtuvo con la ecuación:

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \dots\dots\dots (3.13)$$

Donde:

e_j = Energía cinética para el intervalo de tiempo j ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

p_j = Cantidad de lluvia en el intervalo de tiempo j (mm)

n = Número de intervalos con diferente intensidad, durante un mismo evento.

El cálculo de e_j se realizó con la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978), adecuada a las unidades del Sistema Internacional por Foster, *et al.* (1981):

$$\begin{array}{ll} e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j; & I_j \leq 76 \text{ mm h}^{-1} \\ e_j = 0.283; & I_j > 76 \text{ mm h}^{-1} \end{array} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

Donde:

I_j = Intensidad de la lluvia en el intervalo j (mm h^{-1});

$$I_j = \frac{p_j(60)}{t_j} \dots\dots\dots (3.15)$$

Donde:

t_j = Tiempo del intervalo j (min)

p_j ya fue definido

La multiplicación por 60 convierte el tiempo de minutos a horas.

El valor e_j se vuelve constante para $I > 76 \text{ mm h}^{-1}$, pues se considera que a intensidades mayores el tamaño de las gotas ya no se incrementa (Wischmeier y Smith, 1978).

La suma de los valores de EI_{30} de todos los eventos durante el año formó el factor R de la EUPS. La expresión algebraica de R es:

$$R = \sum_{i=1}^n (EI_{30})_i \dots\dots\dots (3.16)$$

Donde:

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

n = Número de eventos erosivos durante el año

4.4.4.2. Erosionabilidad del suelo (*K*)

La erosionabilidad del suelo (*K*) se determinó con el método propuesto por Wischmeier *et al.* (1971), usando cinco parámetros del suelo: 1) porcentaje de limos+arenas muy finas, de 0.002 a 0.10 mm de diámetro; 2) porcentaje de arenas, de 0.10 a 2.0 mm de diámetro; 3) porcentaje de materia orgánica; 4) estructura; y 5) permeabilidad, con la aplicación de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - a) M^{1.14} + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3)}{100} \times 0.1317 \dots\dots\dots (3.17)$$

Donde:

K = Factor erosionabilidad del suelo ($\text{t ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)

a = Porcentaje de materia orgánica (Cuadros A3 de anexos)

b = Código de estructura del suelo (Cuadro A14 de anexos)

c = Código de permeabilidad del suelo (Cuadro A15 de anexos)

M = (Porcentaje de limos+arenas muy finas) (100-porcentaje de arcilla) (Cuadros A1 y A2 de anexos)

0.1317 = Factor de conversión al sistema métrico internacional.

4.4.4.3. Longitud (*L*) y grado (*S*) de la pendiente

Para el cálculo de *L* se aplicó la siguiente ecuación de Wischmeier y Smith (1978):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \dots\dots\dots (3.18)$$

Donde:

L = Factor longitud de la pendiente (adimensional)

λ = Longitud de la pendiente (m)

La longitud de la pendiente (λ) se considera equivalente al cateto adyacente de un triángulo rectángulo y se obtuvo con la siguiente fórmula trigonométrica:

$$b = \sqrt{(c+a)(c-a)} \dots\dots\dots (3.19)$$

Donde:

b = cateto adyacente del triángulo (longitud de la pendiente) (m)

c = hipotenusa del triángulo (longitud horizontal de la pendiente) (m)

a = cateto opuesto del triángulo (desnivel) (m)

La longitud horizontal de la pendiente (c) se determinó midiendo la distancia entre el punto de mayor altitud y el vertedor multiplicándola por el factor de escala en los planos topográficos presentados en las Figuras 6-10. El desnivel (a) se determinó considerando el número de curvas de nivel separadas a 1 m dibujadas en los mismos planos topográficos.

El exponente m se calculó conforme a los valores de la relación β para condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos, propuesta por McCool *et al.* (1989) citado por Figueroa *et al.* (1991), utilizando la relación:

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \dots\dots\dots (3.20)$$

Donde:

θ = Ángulo de la pendiente (radianes).

Calculado un valor de β se determinó el valor del exponente m , utilizando la siguiente relación (Foster *et al.*, 1977) citado por Figueroa *et al.* (1991):

$$m = \beta / (1 + \beta) \dots\dots\dots (3.21)$$

El factor S de la EUPS se determinó con la relación de McCool, *et al.* (1987), la cual se utiliza para pendientes mayores o iguales a 9%.

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.50 \dots\dots\dots (3.22)$$

Donde:

θ = ángulo de la pendiente (grados)

El grado de la pendiente se determinó aplicando el método de Horton (Sánchez, 1987) en los planos topográficos según se muestra en el Cuadro A16 de anexos.

4.4.4.4. Factor manejo y cobertura vegetal (C)

Cobertura arbórea y arbustiva. La cobertura arbórea y arbustiva se determinó mediante el método de intercepción en línea o Línea de Canfield (Hernández, 2001). En cada tratamiento se extendió una cinta métrica para marcar la línea entre dos puntos dados, sobre la cual se registró la longitud interceptada por cada especie. Se inició en uno de los extremos de la línea, se consideraron únicamente aquellas plantas que fueron tocadas por la línea o que fueron subyacentes o suprayacentes a ella. Para cada planta encontrada se registró:

- a) i = Especie (nombre).
- b) I = Longitud interceptada (cm).
- c) M = Anchura máxima de la planta en dirección perpendicular a la línea (cm).

Adicionalmente, se registró la longitud de la línea interceptada por suelo desnudo.

Con los datos obtenidos, se calculó para cada especie:

- c) N = Número total de intercepciones o de “individuos”

$$b) \sum_{i=1}^n I = \text{Longitud total interceptada para la especie } i \text{ (cm)}$$

- d) R = Número de intervalos en los cuales se presenta la especie

$$d) \sum_{i=1}^n 1/M = \text{Total de los recíprocos de las anchuras máximas}$$

- e) L = Sumatoria de longitudes de todos los transectos trabajados.

Posteriormente para obtener el porcentaje de cobertura tanto de especies arbóreas como arbustivas se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{Cobertura total} = \left(\frac{L - \text{Long. del suelo desnudo}}{L} \right) 100 \dots\dots\dots (3.23)$$

Donde L ya fue definido.

Cobertura herbácea. La cobertura herbácea se determinó por el método del área mínima (Hernández, 2001). Con este método se seleccionó un área al azar y se delimitó un metro cuadrado, en donde se midieron cada una de las plantas que quedaron dentro de esa área, se midió la altura, ancho y largo de la sombra.

La cobertura arbórea, arbustiva y herbácea se midió en dos ocasiones, la primera en julio y la segunda en diciembre del año 2000. Con el propósito de explicar la variación de la pérdida de suelo entre tratamientos. Tanto la cobertura arbórea, la arbustiva y herbácea se les aplicó un análisis de regresión con la pérdida de suelo, probando diversos modelos tales como: el lineal, polinómico, potencial, logarítmico y exponencial, usando el programa Excel de Windows.

La cobertura de estos estratos considerada en el presente trabajo fue la de diciembre del año 2000, ya que la de julio mostró muy baja relación estadística con la pérdida de suelo.

Cobertura por mantillo. La cobertura por mantillo se determinó con el método del cuadrante (Hernández, 2001). Para ello se utilizaron marcos de 0.5 m^2 , los cuales fueron divididos en 50 cuadros de 10 cm^2 . En cada tratamiento los cuadros se lanzaron al azar cinco repeticiones, distribuidos a lo largo y ancho de la parcela, en cada cuadrito se anotó lleno, medio, tercio o vacío, para después determinar el porcentaje de cobertura y sacar un promedio de los cinco lanzamientos. El espesor del mantillo se midió con una regla cinco veces y se promedió por repetición y tratamiento. Con base al espesor promedio del mantillo se obtuvo un coeficiente de ajuste en cada uno de los tratamientos, como se muestra en el Cuadro 14, esta determinación se realizó en marzo del año 2001. En la cobertura por mantillo también se hizo un análisis de regresión con

la pérdida de suelo probando los modelos: lineal, polinómico, potencial logarítmico y exponencial usando el programa Excel de Windows.

Cuadro 14. Determinación de la cobertura por mantillo ajustada por tratamiento

Tratamiento	Cobertura mantillo (%)	Espesor de mantillo (cm)	Factor de ajuste por espesor	Cobertura ajustada (%)
T1	89.9	9	1.00	90
T2	87.2	7	0.77	67
T3	47.4	2	0.22	11
T4	81.2	3	0.33	27
T5	86.5	3	0.33	26

Factor *C* de la EUPS. Una vez determinado que las coberturas arbustiva y por mantillo ajustada se relacionaron mejor con la pérdida de suelo y considerando los valores del factor *C* de la EUPS asignados por Wischmeier y Smith (1978) para tierras forestales no disturbadas a partir del porcentaje de área cubierta por el dosel de los árboles y los arbustos, y del porcentaje de área cubierta por el mantillo de más de 5 cm de espesor, se propusieron valores del factor *C* para sistemas agroforestales mismos que se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Valores propuestos del factor *C* de la EUPS para sistemas agroforestales de café

Cobertura arbustiva (%)	Cobertura por mantillo ajustada (%) [†]	Factor <i>C</i> propuesto
100-75	100-90	0.0005-0.001
74-45	89-75	0.001-0.003
74-45	74-40	0.003-0.006
74-45	<40	0.006-0.009
<44	<40	> 0.009

[†] Ajustada por el espesor del mantillo.

De acuerdo con los valores del factor *C* presentados en el Cuadro 15, se determinaron los valores para los tratamientos analizados en este trabajo.

4.4.4.5. Prácticas de conservación (*P*)

Para asignar un valor al factor *P* por efecto de las barreras vivas de palo de agua y palma camedor, se calculó el intervalo vertical y horizontal teórico de acuerdo al grado de

pendiente y la precipitación anual, aplicando las ecuaciones establecidas para terrazas mecánicas.

Para el intervalo vertical se empleó la siguiente ecuación:

$$IV = \left(2 + \frac{P}{3 \text{ o } 4}\right) (0.305) \dots\dots\dots (3.24)$$

Donde:

IV = Intervalo vertical (m)

P = Pendiente del terreno (%)

3 = Factor que se utiliza en áreas donde la precipitación anual es mayor que 1200 mm

4 = Factor que se utiliza en áreas donde la precipitación anual es mayor que 1200 mm

0.305 = Factor de conversión de pies a metros.

Para el intervalo horizontal se empleó la siguiente ecuación:

$$IH = \frac{IV}{P} \times 100 \dots\dots\dots (3.25)$$

Donde:

IH = Intervalo horizontal (m)

IV = Intervalo vertical (m)

P = Pendiente del terreno (%)

Una vez obtenido el intervalo horizontal que deben tener las barreras vivas en los tratamientos T2 y T5 (Cuadro A17 de anexos), se comparó con la distancia que dejaron los productores entre barreras, asignando un valor a *P* en función de la proporción de barreras vivas trazadas correctamente.

Finalmente, se realizaron análisis de correlación lineal simple para determinar el grado de asociación entre los factores y variables de la EUPS con la pérdida de suelo. El método empleado fue el programa de Sistema de Análisis Estadístico (SAS).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan corresponden al periodo de junio a diciembre del año 2000, que se obtuvieron en sistemas de café en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver. El análisis realizado comprende una caracterización de las parcelas experimentales, el análisis de la precipitación y su efecto erosivo; el efecto del escurrimiento sobre la pérdida de suelo y nutrientes, así como la estimación de la pérdida de suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) ajustada en los sistemas agroforestales rusticano y policultivo tradicional mejorado de café bajo sombra.

5.1. Caracterización de las parcelas experimentales

5.1.1. Área de las parcelas

Una vez delimitadas las parcelas experimentales para medir el escurrimiento y la pérdida de suelo en los sistemas agroforestales de café, se procedió a determinar el área de las mismas. El Cuadro 16 muestra el área para cada tratamiento, determinada por dos métodos: el de triangulación y el levantamiento topográfico con estación total.

Cuadro 16. Áreas de las parcelas experimentales por tratamiento según el método de medición

Tratamiento	Área (m ²)	
	Triangulación	Levantamiento topográfico
T1	730	723
T2	400	373
T3	314	293
T4	274	267
T5	542	515

Aunque con una sobreestimación promedio del 4.4%, un análisis de regresión lineal entre los resultados de la aplicación de los dos métodos indica una adecuada determinación del área por el método de triangulación en función del levantamiento topográfico con estación total que se considera más preciso ($R^2 = 0.99$, Figura 14).

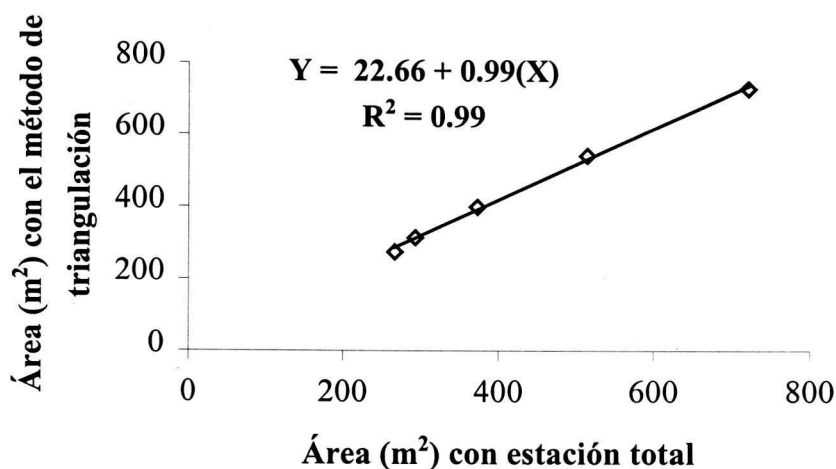


Figura 14. Relación del área de las parcelas experimentales de café bajo sombra determinada mediante dos métodos de medición.

El método de triangulación puede utilizarse para obtener el área de las parcelas del tamaño aquí utilizado, es útil para lugares donde no se cuenta con recursos suficientes o cuando se carece de estación total. Para los fines de cálculo que requieren del tamaño de la parcela en la presente investigación se usó el área que se obtuvo con el levantamiento topográfico con estación total. Como pudo observarse (Cuadro 16), el tamaño de las parcelas experimentales varió de 267 a 723 m², tamaño superior al de los lotes de escurrimiento usados por Bermudez (1980) y, Ataroff y Monasterio (1997), lo cual puede garantizar mejores resultados en sistemas agroforestales.

5.1.2. Propiedades físicas de los suelos en los tratamientos

Desde el punto de vista físico, los mejores suelos para café son profundos, permeables, friables y de textura franca. La buena aireación es fundamental, el suelo ideal para café debe tener un espacio poroso de 60%, del cual la mitad debiera permanecer ocupado por aire, cuando esta húmedo. Los suelos de textura franca y profundos son ideales para el desarrollo del cultivo (SAGAR y FPV, 1997). El análisis practicado a los suelos de las parcelas experimentales (Cuadro A1 y A2 de anexos), muestran que el Mollisol o Faeozem del sitio 1 al cual corresponden los tratamientos T1 y T2 es moderadamente profundo, de textura migajón-arcilloso-limoso prácticamente en todo el perfil, con una humedad aprovechable entre el 13 y 19% mayor en el horizonte superficial y una

densidad aparente que varía entre 1.6 y 1.9 (Mg m^{-3}) mayor en los horizontes inferiores que en el superficial. El Inceptisol o Cambisol del sitio 2 correspondiente a los tratamientos T3, T4 y T5 es también moderadamente profundo, de textura predominantemente migajón-arcillosa con una humedad aprovechable entre 14 y 19% mayor en el horizonte superficial y una densidad aparente entre 1.6 y 1.7 (Mg m^{-3}) mayor en los horizontes inferiores que en el superficial. De manera que el Mollisol parece más compactado en los horizontes inferiores que el Inceptisol.

5.1.3. Propiedades químicas de los suelos en los tratamientos

De acuerdo con el Cuadro A3 de anexos, a pesar de que el pH de los suelos va de moderado a fuertemente ácido, la saturación de bases es alta y no se tienen problemas de acidez intercambiable. Estos suelos son ricos en materia orgánica, siendo mayor en la parte superficial. El contenido de Nitrógeno total es muy bajo, en la capa de 0 a 10 cm es pobre y de 10 a 30 cm muy pobre para el caso de las cinco parcelas experimentales. Asimismo, el contenido de NO_3 es muy bajo en el T1 y T2, bajo en el T3 y T5 y medio en el T4; posiblemente se deba a los altos contenidos de humedad, los NO_3 por ser muy móviles se desplazan libremente con la humedad del suelo y con altas precipitaciones se mueven hacia abajo. Además, los suelos presentan una adecuada CIC, gracias a su buen contenido de arcilla, arriba del 30% y un alto contenido de materia orgánica, lo que les da mayor capacidad de retención de nutrimentos y agua.

5.2. Precipitación

Del 9 de junio al 31 de diciembre del año 2000 se registró la precipitación diaria. Adicionalmente, del 22 de julio al 31 de diciembre del mismo año, la precipitación se registró con un pluviómetro II automatizado marca Davis. Los datos de precipitación observada se presentan en el Cuadro A4 de anexos.

Los datos no registrados por el pluviómetro II automatizado del 9 de junio al 21 de julio, fueron estimados a partir de los registros obtenidos con el pluviómetro manual a través de la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$Y = -0.6266 + 1.1146(X) \quad R^2 = 0.95$$

Donde:

Y = Precipitación estimada para el pluviómetro II automatizado (mm)

X = Precipitación observada con el pluviómetro manual (mm)

El análisis de la precipitación que se presenta en este trabajo corresponde tanto a los datos observados como estimados para el pluviómetro II automatizado. Durante el periodo de estudio, se presentaron un total de 132 eventos de lluvia y la precipitación total registrada fue de 2227.90 mm. Los meses con mayor precipitación en orden descendente fueron agosto, junio, julio y octubre como se observa en la Figura 15.

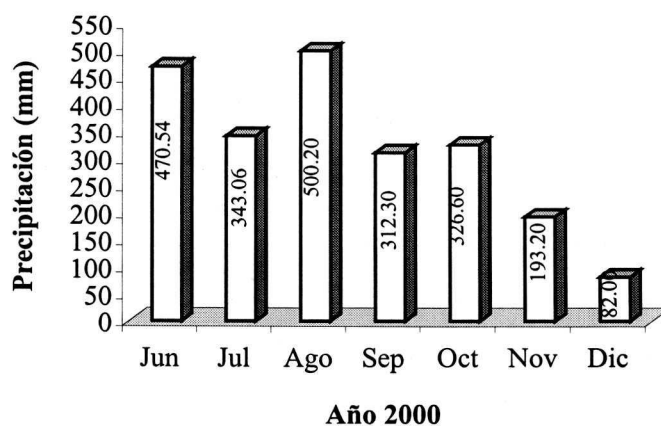


Figura 15. Precipitación mensual observada de junio a diciembre del año 2000 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

La precipitación expresada en lámina (mm) tuvo las siguientes características: sólo el 13.64% de los eventos aportó el 53.91% de la precipitación con eventos mayores de 38.2 mm (Cuadro 17). Eventos mayores de 38.2 mm se concentraron principalmente en los meses de junio a septiembre (Cuadro A4 de anexos).

Cuadro 17. Distribución de lluvias registradas de junio a diciembre del año 2000 en El Coyo, Tlachichilco, Ver.

Cantidad (mm)	Eventos		Lámina	
	(núm)	(%)	(mm)	(%)
0.2-12.6	84	63.64	339.02	15.22
12.7-25.4	20	15.15	370.35	16.62
25.5-38.2	10	7.58	317.58	14.25
>38.2	18	13.64	1200.95	53.91
Total	132	100.00	2227.90	100.00

5.3. Esguerrimiento superficial

Los meses que mayor esguerrimiento presentaron en orden de importancia fueron: agosto, octubre, junio y septiembre (Figura 16). Los meses de menor esguerrimiento fueron julio, noviembre y diciembre, lo cual se observó diferencialmente en los tratamientos.

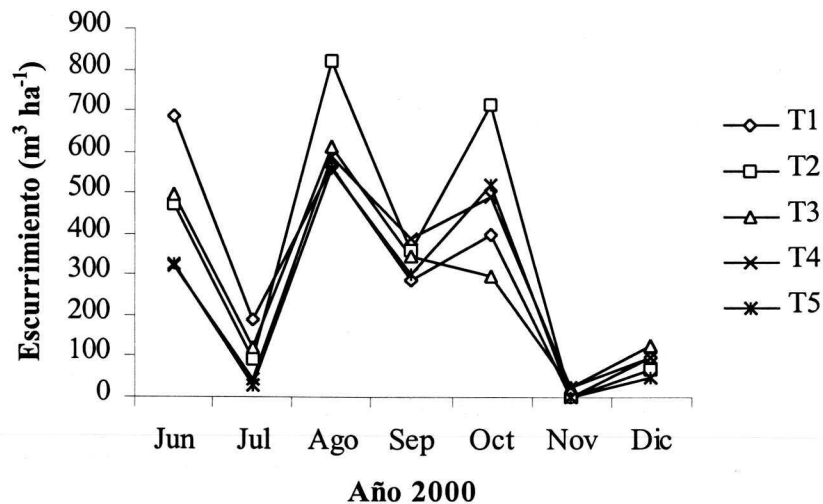


Figura 16. Esguerrimiento mensual observado por tratamiento en El Coyo, Tlachichilco, Ver.

El esguerrimiento total presentado en cada tratamiento se muestra en la Figura 17, los tratamientos T1 y T2 presentaron mayor esguerrimiento, con respecto a los tratamientos T3, T4 y T5. El mayor esguerrimiento observado en los tratamientos T1 y T2 obedece a que el Mollisol donde fueron establecidos presenta mal drenaje interno, mayor densidad aparente en los horizontes inferiores (Cuadro A1 de anexos) y probablemente menor tasa

de infiltración, contrario al Inceptisol donde fueron establecidos los tratamientos T3, T4 y T5 que presentan mejor permeabilidad y probablemente mayor tasa de infiltración. Puesto que en esta etapa del proyecto de investigación no se midió la velocidad de infiltración, se recomienda medirla para sustentar mejor estos resultados.

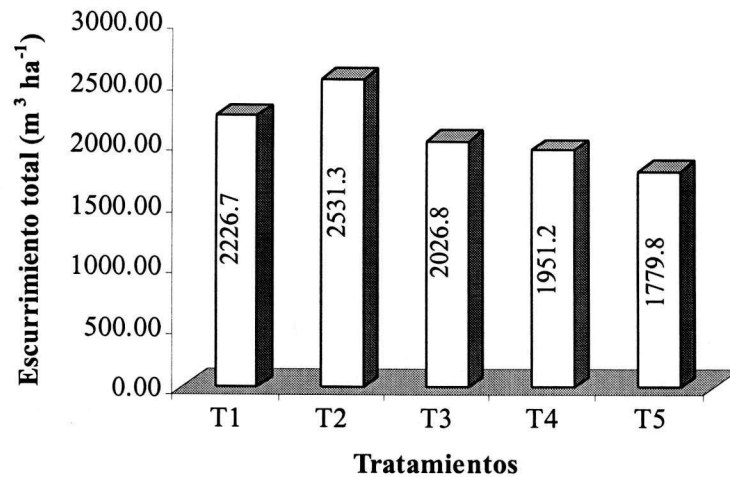


Figura 17. Ecurrimiento observado por tratamiento en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

La escorrentía no depende únicamente de la cantidad de lluvia, también depende de otros factores, como la condición de humedad antecedente del suelo (Barnett, 1958). En el Cuadro 18, se presentan pendientes de la curva de regresión (b) y coeficientes de determinación (R^2) entre el escurrimiento y la condición de humedad antecedente (CHA), en sistemas cafetaleros indican que existe una mayor relación entre el escurrimiento y la condición de humedad antecedente 3 (CHA_3) como se observa en la Figura A3 de anexos, de manera que lluvias de alta magnitud no producen mayor escorrentía porque el agua es absorbida por un suelo seco. En cambio si ha llovido con anterioridad y el suelo está saturado (CHA_3), una lluvia de baja magnitud puede producir mayor escorrentía.

Cuadro 18. Pendientes de la curva de regresión (b) y coeficientes de determinación (R^2) entre el escurrimiento y la condición de humedad antecedente (CHA)[†]

Tratamiento	CHA ₁		CHA ₂		CHA ₃	
	B	R ²	b	R ²	B	R ²
T1	0.17	0.73	0.08	0.24	0.26	0.85
T2	0.17	0.74	0.03	0.07	0.40	0.85
T3	0.07	0.47	0.09	0.50	0.23	0.77
T4	0.09	0.58	0.03	0.12	0.27	0.75
T5	0.001	0.03	0.04	0.05	0.29	0.84

[†] CHA = Condición de humedad antecedente (1 = seco, 2 = medio, 3 = húmedo)

5.4. Coeficiente de escurrimiento

En el Cuadro A9 de anexos se presentan los coeficientes de escurrimiento por evento de lluvia que provocó escurrimiento y tratamiento, y en el Cuadro 19 se presenta el promedio por tratamiento de la lámina escurrida y el coeficiente de escurrimiento. De acuerdo con la mayor lámina escurrida, los tratamientos T1 y T2 presentaron mayor coeficiente de escurrimiento superficial que los tratamientos T3, T4 y T5.

Los coeficientes de escurrimiento oscilan entre el 8 y 11%, comparados con los observados para el cultivo de maíz que en muchas partes del mundo superan el 50%, estos coeficientes son tan bajos como los observados en cafetales de Guatemala (Anónimo, 1992) aunque un poco mayores a los observados en las asociaciones café-poró y café-poró-laurel en Costa Rica (Bermudez, 1980).

Cuadro 19. Lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento en parcelas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Tratamiento	Lámina escurrida (mm)	Coeficiente de escurrimiento (%)
T1	222.67	10.0
T2	253.13	11.4
T3	202.69	9.1
T4	195.12	8.8
T5	177.98	8.0

5.5. Pérdida de nutrientes en el escurrimiento superficial

En el Cuadro A10 de anexos se presentan los resultados del análisis de laboratorio de la pérdida de nutrientes en el agua de escurrimiento por tratamiento. El promedio anual de la pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial en cada tratamiento se presenta gráficamente en la Figura 18.

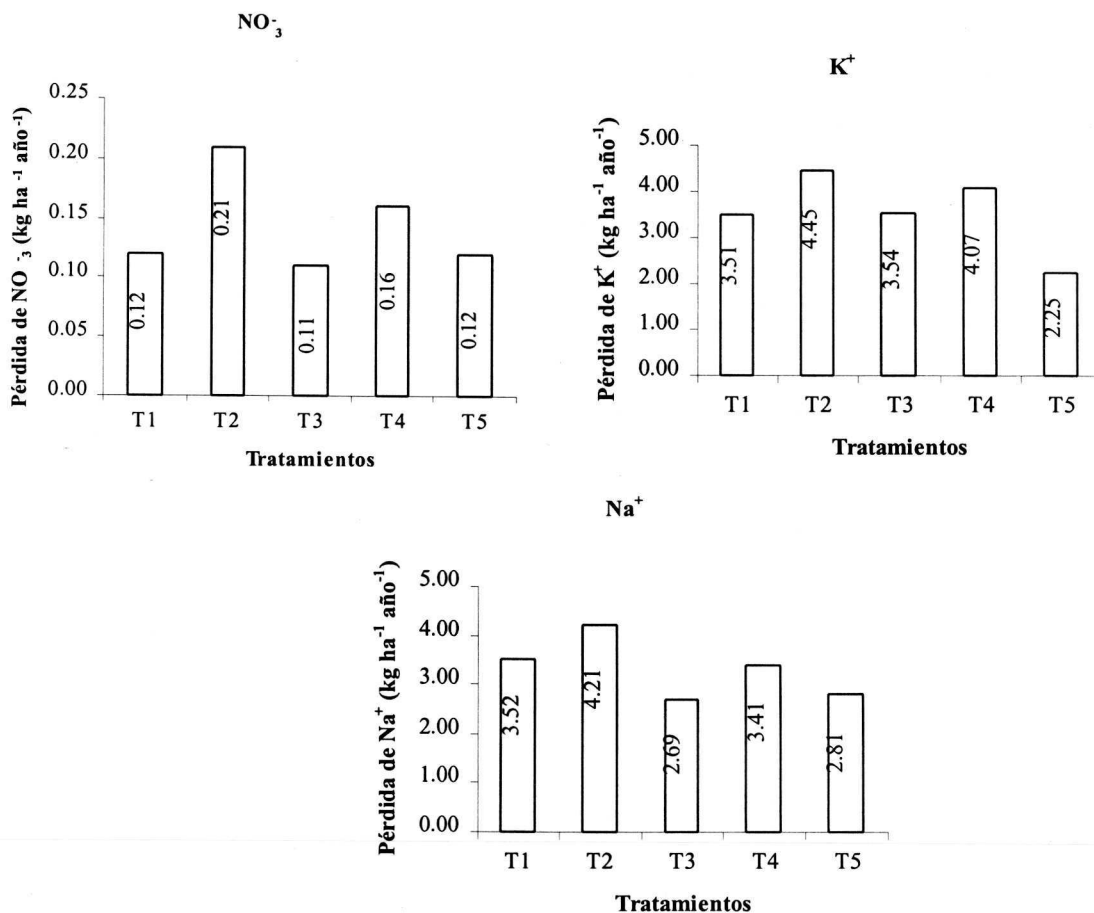


Figura 18. Pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Un análisis de correlación simple entre el escurrimiento y la pérdida de nutrimentos mostró una asociación positiva con la pérdida de NO_3^- ($r = 0.69$), de K^+ ($r = 0.75$) y con la pérdida de Na^+ ($r = 0.86$), lo cual permite aseverar en orden de significancia, que a mayor escurrimiento se espera mayor pérdida de nutrimentos como el Na^+ , K^+ y NO_3^- (Figuras A4 – A6 de anexos).

5.6. Pérdida de suelo

La pérdida de suelo por tratamiento y por evento de lluvia se presenta en el Cuadro A13 de anexos. La pérdida promedio anual de suelo por tratamiento se presenta en la Figura 19. La pérdida de suelo en los sistemas cafetaleros bajo sombra estudiados osciló entre 0.4 y 2.0 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, lo cual está por abajo del límite tolerable señalado por McCormack *et al.* (1982) de 6.5 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para un suelo renovable de 51 a 100 cm de profundidad; sin embargo, existen importantes diferencias entre tratamientos que se analizan en seguida.

Los tratamientos T1 y T2 a pesar de que tuvieron mayor volumen escurrido, fueron los tratamientos que presentaron menor pérdida de suelo, en contraste con los tratamientos T3, T4 y T5 donde escurrió menos con mayor pérdida de suelo, por la menor cobertura y la falta de prácticas de conservación. Esto implicó una correlación negativa entre el escurrimiento y la pérdida de suelo ($r = -0.62$), mientras que analizando la relación entre escurrimiento y pérdida de suelo por evento y tratamiento se obtienen relaciones recíprocas (Figura A7 de anexos), mostrando altos coeficientes de determinación entre el volumen escurrido y la cantidad de suelo perdido en orden de importancia los tratamientos T4, T2 y T3, lo que indica una relación más estrecha entre suceso y efecto (Figura A8 de anexos). Los cultivos de cobertura que se establecieron en T3 y T4, aunque ejercieron una función importante para proteger al suelo, no lo cubrieron de manera uniforme, lo que provocó el impacto directo de las gotas de lluvia. La canavalia, presentó el efecto de un cultivo anual, se sembró a fines del mes de junio por los requerimientos de humedad para la germinación de la semilla y posterior desarrollo de la plántula, por lo que su función de protección fue gradual conforme fue desarrollando su

área foliar, esto se observa claramente con el comportamiento de la pérdida del suelo en el T3, que al principio fue mayor, pero conforme la canavalia desarrolló su área foliar protegió mejor al suelo (Cuadro A13 de anexos). A partir de septiembre el T3 empezó a perder menos suelo que el T4, donde se estableció cacahuatillo como cultivo de cobertura, el cual también presentó un desarrollo gradual y sus estolones no alcanzaron a cubrir completamente la parcela debido principalmente a su lento crecimiento en las partes donde la penetración de los rayos del sol fueron limitados por la sombra que proyectan los árboles y arbustos.

La magnitud de pérdida de suelo encontrada para los tratamientos T1 y T2 es similar a la reportada por Ataroff y Monasterio (1997) para plantaciones de café con sombra y para las asociaciones café-poró y café-poró-laurel reportados por Bermudez (1980), no así para los tratamientos T3, T4 y T5 cuyas pérdidas son mayores a las reportadas para plantaciones sin sombra por Ataroff y Monasterio (1997). La mayor capacidad de los tratamientos T1 y T2 para reducir la pérdida de suelo obedece al mayor contenido de materia orgánica del suelo en T1 ($r = 0.52$), a la mayor cobertura arbustiva y superficial por mantillo en ambos ($r = 0.70$ y 0.87 , respectivamente), y a la presencia de barreras vivas y terrazas individuales en el tratamiento T2.

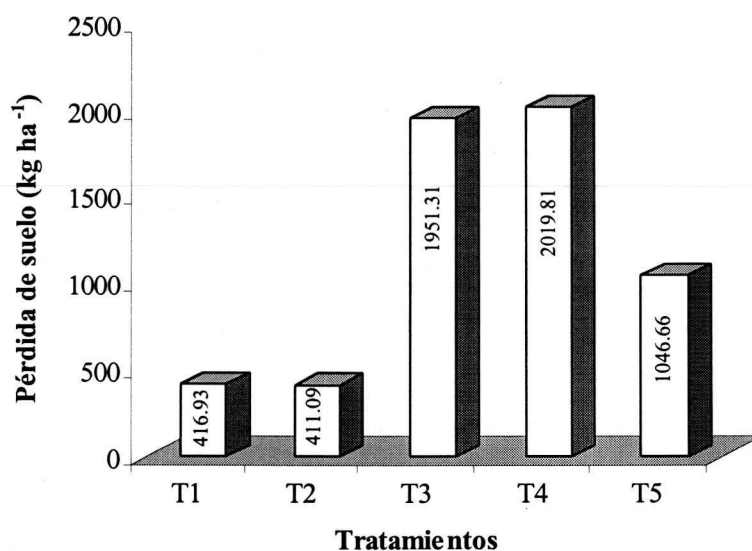


Figura 19. Pérdida de suelo total observada por tratamiento en café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

En la relación escurrimiento y pérdida de suelo, el modelo que mejor ajustó fue el exponencial, como se observa en la Figura 20, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.53$. Cabe destacar que esta relación de tipo exponencial negativa, significa que a mayor escurrimiento menor pérdida de suelo, lo cual solo puede ocurrir en sistemas agrícolas que mantengan una adecuada cobertura superficial (mantillo), tal como lo hacen los sistemas agroforestales de café bajo sombra.

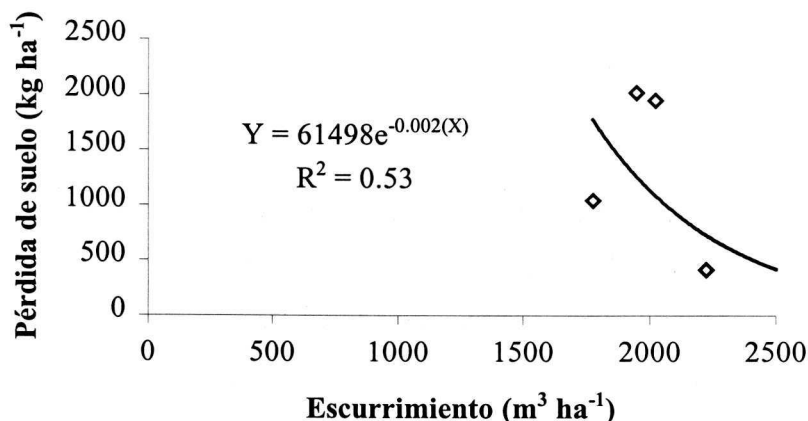


Figura 20. Relación escurrimiento y pérdida de suelo total en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

5.7. Pérdida de suelo estimada por la EUPS ajustada

5.7.1. Erosividad de la lluvia (R)

La erosividad total registrada fue de 18,610.39 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ para todos los tratamientos (Cuadro A6 de anexos y Cuadro 20 de texto), el mayor número de eventos erosivos se presentó en el rango de 12.7 a 25.4 mm, seguida por la de >38.2 mm.

Cuadro 20. Distribución del número de lluvias erosivas y EI_{30} de acuerdo a su magnitud

Magnitud (mm)	Eventos		Erosividad		
	Número	%	MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹	%	% acumulado
12.7-25.4	20	41.67	1398.85	7.52	7.52
25.5-38.2	10	20.83	2425.80	13.03	20.55
>38.2	18	37.50	14785.74	79.45	100.00
Total	48	100.00	18610.39	100.00	

Los meses con mayor erosividad fueron junio y agosto (Figura 21), acumulando entre ambos el 54.04% de la erosividad total registrada. De 132 eventos de lluvia registrados en el área de investigación (Cuadro A4 de anexos), de acuerdo con Wischmeier y Smith (1978) solo 48 (36.36%) se catalogan como erosivos (lluvias con una lámina precipitada mayor o igual a 12.7 mm), lo que indica que el 63.64% de los eventos de lluvia en el área de estudio no fueron erosivos como se observa en el Cuadro 17.

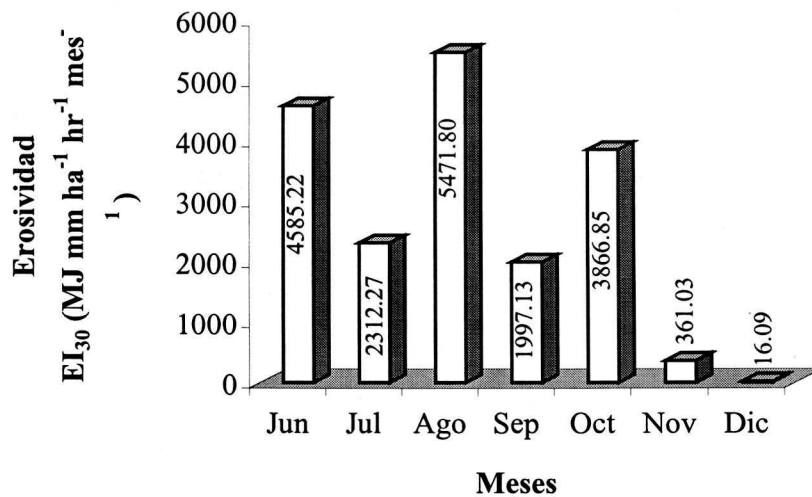


Figura 21. Erosividad mensual de la lluvia en El Coyol, Tlaxichilco, Ver. Año 2000.

La relación ajustada entre el EI_{30} calculado y la precipitación observada es de tipo lineal positivo con un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0.79$, Figura 22), lo cual indica que probablemente un índice derivado directamente de la magnitud de la precipitación puede estimar la erosividad de la lluvia.

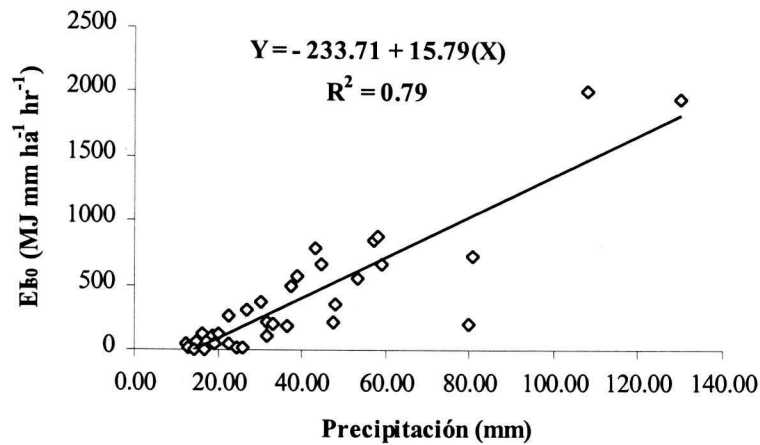


Figura 22. Relación EI_{30} y precipitación en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Del escurrimiento total, no todo causó erosión debido a la condición de humedad antecedente (Figuras A1-A3 de anexos), así como por el porcentaje de cobertura superficial que protege al suelo. De 48 eventos erosivos registrados, en solo 38 se presentó pérdida de suelo, lo que es igual al 79.17% de los eventos erosivos. Respecto al comportamiento de la pérdida de suelo por evento, de 48 eventos erosivos ocurridos para cada tratamiento se obtuvo el siguiente resultado: en T1 cinco eventos generaron el 74.36%, en T2 seis eventos produjeron el 68.63%, en T3 diez eventos causaron el 71.63%, en el T4 nueve eventos generaron el 74.19% y en el T5 tan sólo un evento produjo el 73.16%, de la pérdida de suelo (Cuadro A12 de anexos).

En el T1 y T2, tratamientos donde existe mayor estabilidad producto de un dosel uniforme, suficiente mantillo y prácticas de conservación de suelos (caso del T2), el efecto de los eventos erosivos sobre la pérdida de suelo tuvo un comportamiento similar entre ellos; es decir, entre 5 y 6 eventos produjeron entre el 69 y 74% de la pérdida de suelo. Los tratamientos T3 y T4 también se comportaron de manera similar entre ellos; es decir, entre 9 y 10 eventos produjeron entre el 71 y 74 % de la pérdida de suelo. Por último, en el tratamiento T5 se presentó un efecto singular, ya que un sólo evento produjo el 73.16% de la pérdida de suelo, lo cual estuvo relacionado con una alta concentración de sedimentos en el escurrimiento, este fenómeno se atribuye a una limpia que el productor realizó a principios de agosto, lo que coincidió con la lluvia más

erosiva del periodo (presentada el 9 de agosto de 2000), generándose ese suceso extraordinario.

Los eventos de mayor magnitud en lámina precipitada y erosividad (EI_{30}) generaron mayores pérdidas de suelo, a excepción de ciertos eventos que aunque de menor magnitud, provocaron mayores pérdidas de suelo debido al mayor escurrimiento resultado de la mayor humedad antecedente. En la Figura A9 de anexos se muestra la relación entre la distribución de la pérdida de suelo acumulada y la distribución de la erosividad acumulada por mes para los tratamientos evaluados. Las pérdidas de suelo siguen una tendencia paralela a la erosividad, a excepción del T5 donde se presentó un evento con la máxima erosión, muy por encima del promedio de los demás eventos sucedidos en ese tratamiento, incluso de los demás tratamientos.

5.7.2. Erosionabilidad del suelo (K)

La erosionabilidad del suelo se calculó utilizando la ecuación 3.17, resultando los valores de K reportados en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Erosionabilidad del suelo (K) obtenido para cada tratamiento de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Limos (%)	Arenas muy finas (%)	Arcilla (%)	Código de estructura	Código de permeabilidad	Valor $K^†$
T1	6.2	36	12	30	3	5	0.028
T2	5.3	48	12	34	3	5	0.034
T3	5.3	48	12	34	3	5	0.034
T4	4.1	32	12	30	3	5	0.032
T5	5.5	38	12	32	3	5	0.030

[†] Una vez obtenido el valor de K con los parámetros establecidos en la ecuación, este se multiplicó por el factor 0.1317 para convertirlo a unidades del sistema métrico internacional.

5.7.3. Longitud y grado de la pendiente (LS)

En el Cuadro 22 se presentan los valores del factor longitud de la pendiente (λ) de la EUPS, que se obtuvieron por tratamiento.

Cuadro 22. Longitud de la pendiente (λ) por tratamiento

Tratamiento	Longitud horizontal en m (c)	Desnivel en m (a)	(c+a)*(c-a)	$\lambda = b^{\dagger}$ (m)
T1	42.5	10	1706.25	41.31
T2	33.75	8	1075.06	32.79
T3	32.5	12	912.25	30.20
T4	17.5	6	270.25	16.44
T5	26.5	5	677.25	26.02

[†] Cateto adyacente del triángulo (longitud de la pendiente).

El cálculo del factor longitud de la pendiente de la EUPS se obtuvo con la ecuación 3.18, antes se calculó el valor del exponente m en función de β . El valor de β fue calculado con la ecuación 3.20, aplicable para suelos moderadamente susceptibles a la erosión y el valor de m con la ecuación 3.21, los resultados se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Cálculo para obtener el valor de β y m por tratamiento

Tratamiento	Pend (%)	Tan θ	Atan θ (radianes)	Angulo ($^{\circ}$) [†]	sen θ	Sen $\theta/0.0896$	3.0 * (sen θ) ^{0.8} +0.56	β	m
T1	27.5	0.275	0.268	15.38	0.27	2.96	1.60	1.85	0.65
T2	37.8	0.378	0.361	20.71	0.35	3.95	1.87	2.11	0.68
T3	41.9	0.419	0.397	22.73	0.39	4.31	1.96	2.20	0.69
T4	37.2	0.372	0.356	20.41	0.35	3.89	1.85	2.10	0.68
T5	29.7	0.297	0.289	16.54	0.28	3.18	1.66	1.92	0.66

[†] El ángulo fue convertido a radianes para obtener el seno de θ en Excel de Windows.

Los valores de L que se obtuvieron con la ecuación 3.18 y los valores de S que resultaron de la ecuación 3.22 considerando el seno del ángulo θ del Cuadro 23, y la multiplicación de L y S por tratamiento, se presentan de manera adimensional en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Valores de LS por tratamiento de café bajo sombra en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Tratamiento	L	S	LS
T1	1.50	3.96	5.93
T2	1.31	5.44	7.10
T3	1.24	5.99	7.42
T4	0.82	5.36	4.38
T5	1.11	4.28	4.76

La relación entre longitud, grado y su efecto combinado, contra la pérdida de suelo da coeficientes de determinación que estadísticamente no son significativos: $R^2 = 0.55$, $R^2 = 0.36$ y $R^2 = 0.11$, respectivamente (Figura A10 de anexos). Además, en el caso de la longitud la línea de tendencia indica que a menor longitud mayor pérdida de suelo, lo cual no es real, porque a mayor longitud de la pendiente debería haber mayor erosión por unidad de superficie (Hudson, 1971; Ríos, 1987). El grado de pendiente si muestra una tendencia correcta ya que a mayor grado de pendiente se registra mayor pérdida de suelo; esta situación demuestra la importancia de las prácticas de conservación del suelo, de la cobertura vegetal y del mantillo, para protegerlo del efecto erosivo producto de la energía cinética de la lluvia y del escurrimiento que se genera.

5.7.4. Cobertura y manejo del suelo

La cobertura del suelo juega un papel importante en la conservación del mismo, lo protege contra el impacto directo de las gotas de lluvia, lo que evita su disgregación y favorece mayor infiltración de agua disminuyendo el escurrimiento. En los sistemas estudiados existe una cobertura permanente, compuesta por árboles, arbustos, herbáceas y mantillo (Cuadro 25), que se modificó ligeramente durante las labores de poda, recepa y regulación de sombra que los productores efectuaron como parte de su manejo normal de febrero a marzo, y dos deshierbes, el primero en abril y el segundo de septiembre a octubre (Cuadro 13).

Cuadro 25. Cobertura (%) en los tratamientos de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Tratamiento	Arbórea		Arbustiva		Herbácea		Mantillo
	Julio 2000	Diciembre 2000	Julio 2000	Diciembre 2000	Julio 2000	Diciembre 2000	Marzo 2001
T1	100.00	100.00	92.00	100.00	62.84	19.06	89.90
T2	74.08	100.00	40.00	71.62	53.70	21.23	67.82
T3	100.00	87.11	12.00	12.88	74.47	96.71	10.53
T4	100.00	100.00	40.60	48.61	33.67	69.83	27.07
T5	61.50	100.00	23.60	35.52	44.51	44.27	28.83

Hipotéticamente la cobertura multiestrato protege al suelo contra la erosividad de la lluvia y el escurrimiento. Para buscar elementos que apoyen esta hipótesis, se realizó un análisis de regresión entre la cobertura y la pérdida de suelo cuyos resultados se presentan en las Figuras A11 y A12 de anexos.

En estudios de la cobertura vegetal para cultivos anuales el modelo que mejor ajusta es el exponencial, porque a medida que el cultivo desarrolla aumenta la superficie de suelo cubierta disminuyendo la pérdida de suelo; sin embargo, en este caso se obtuvieron valores de R^2 mayores con otros modelos para algunos estratos; pero debido a que las relaciones no son lógicas, se tomaron los valores del modelo exponencial (Cuadro 26).

Cuadro 26. Coeficientes de determinación (R^2) entre cobertura y pérdida de suelo con distintos modelos de predicción

Estrato herbáceo			
Julio de 2000		Diciembre de 2000	
Modelo	R ²	Modelo	R ²
Polinómico	0.95	Logarítmico	0.94
		Polinómico	0.96
		Potencial	0.96
		Exponencial	0.87
		Lineal	0.89
Estrato arbustivo			
Modelo	R ²	Modelo	R ²
Potencial	0.46	Potencial	0.60
Logarítmico	0.39	Logarítmico	0.55
Exponencial	0.44	Exponencial	0.70
Polinómico	0.37	Polinómico	0.61
Estrato arbóreo			
Modelo	R ²	Modelo	R ²
Polinómico	0.34	Polinómico	0.31
		Logarítmico	0.30
		Potencial	0.27
		Exponencial	0.27
Mantillo (Marzo de 2001)			
Modelo		R ²	
Lineal		0.77	
Potencial		0.82	
Logarítmico		0.77	
Exponencial		0.86	
Polinómico		0.81	

De los tres estratos vegetales, el arbustivo mostró tener un mayor efecto para reducir la erosión ($R^2 = 0.70$), probablemente se deba a su mayor densidad, dado que es el cultivo principal en los sistemas evaluados (Figura 23); además, los cafetos ocupan una posición intermedia al recibir el impacto de las gotas de mayor tamaño que se forman en las copas de los árboles que les proporcionan la sombra o que están asociados a él.

Asimismo, la relación entre la cobertura por mantillo y la pérdida de suelo observó un aceptable ajuste por el modelo exponencial ($R^2 = 0.86$) y en consecuencia un gran efecto de contribución en la reducción de la erosión del suelo.

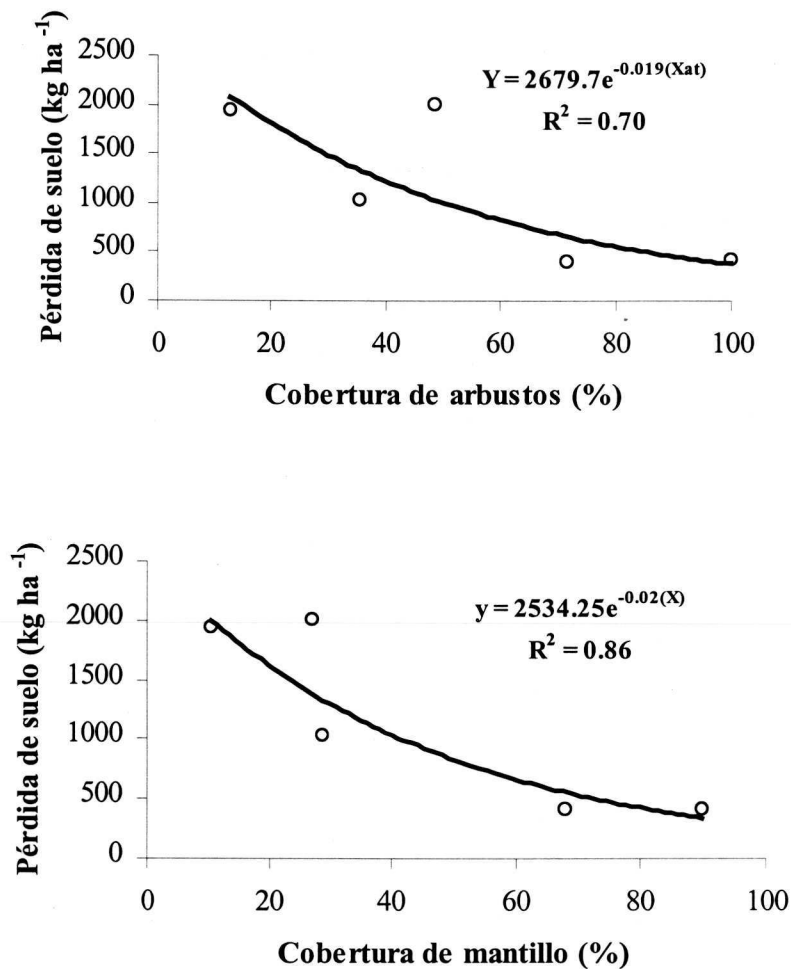


Figura 23. Coberturas de suelo para calcular el factor C

Por lo anterior, la cobertura arbustiva y por mantillo fueron considerados para determinar el factor C de la EUPS, a partir del Cuadro 25 obteniendo los valores por tratamiento que se muestra en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Factor C de la EUPS en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Tratamiento	Cobertura arbustiva (%)	Cobertura por mantillo ajustada (%)	Factor C
T1	100.00	90	0.001
T2	71.62	68	0.003
T3	12.88	11	0.009
T4	48.61	27	0.008
T5	35.52	29	0.009

Para asignar un valor al factor C de la EUPS se tomó el porcentaje de la cobertura del estrato arbustivo del muestreo de diciembre del 2000 y del mantillo del muestreo de marzo del 2001.

Aunque con el método empleado para medir la cobertura no fue posible determinar el grado de protección de la cobertura vegetal bajo un efecto combinado de los diferentes estratos que se encuentran en los sistemas, es muy evidente que su intercepción tiene un efecto importante sobre el impacto que pudiera tener el tamaño de gota sobre un suelo desnudo o sobre una cobertura compuesta solamente por árboles. Una cobertura proporcionada únicamente por árboles puede ser perjudicial, ya que la energía cinética de las gotas de lluvia puede aumentar por la presencia de un dosel alto, donde se funden gotas que al caer de alturas de hasta 30 m pueden alcanzar una gran velocidad y causar erosión (Nair, *et al.*, 1994).

Beer *et al.*, (1998) también señala que los árboles pueden redistribuir adversamente la precipitación, porque durante una baja a moderada intensidad de la lluvia, ocurre la formación de gotas grandes a partir de la unión de gotas pequeñas y su caída desde las partes altas de los árboles puede incrementar la erosión por salpicado, sobre todo cuando no se cuenta con un estrato intermedio y suficiente mantillo en el suelo.

Respecto al estrato herbáceo, en los dos muestreos que se realizaron se presenta un resultado que si no se analiza con detenimiento podría tomarse como erróneo, ya que hipotéticamente la cubierta proporcionada por plantas herbáceas se considera negativa en los procesos de la erosión hídrica, por las mismas características de crecimiento de las hierbas que son de porte bajo o rastreras y de alta densidad,; sin embargo, en este caso por las características de los cafetales bajo sombra el estrato herbáceo no desarrolla homogéneamente por la falta de luminosidad y su efecto se observó en forma positiva, lo cual es incongruente.

Los tratamientos T3 y T4 registraron mayor porcentaje de cobertura herbácea, dado que son los tratamientos donde se introdujeron los cultivos de cobertura de canavalia y cacahuatillo, respectivamente, y el T5 que también registró alta cobertura herbácea debido a una gramínea nativa no identificada de tipo rastrero que se extiende sobre los claros que dejan los árboles de sombra y el cafeto, en respuesta a la sombra irregular que presenta este tratamiento; son los tratamientos que mayor pérdida de suelo mostraron.

La mayor pérdida de suelo en T4 con respecto a T3 fue de apenas 68.5 kg por ha. El T4 a pesar de ser una plantación relativamente vieja, con cierta estabilidad, no tiene una capa de mantillo densa en comparación con los tratamientos T1 y T2. Asimismo, la falta de prácticas mecánicas de conservación del suelo también influyeron directamente para una mayor pérdida del suelo, en estos tratamientos.

Bermudez (1980) encontró que en el sistema de café con sombra de *Erythrina poeppigiana* asociada con árboles maderables de *Cordia alliodora*, el efecto negativo del goteo de agua desde las copas altas de *Cordia alliodora* fue minimizado por la presencia de un segundo estrato vegetal de árboles de *Erythrina poeppigiana* y por el abundante mantillo que cubre casi completamente el suelo, también menciona como ventaja la reducción de malezas, concluyendo que en los sistemas agroforestales la estratificación de la vegetación y la hojarasca producida por los árboles, son una práctica efectiva de conservación de suelos. Como lo señala este autor, la cantidad de hojarasca que cubre el suelo, influye sobre la incidencia de hierbas, por lo que no se encontraron muchas malezas en suelos completamente cubiertos por mantillo, como es el caso del tratamiento T1 y T2, con la observación de que durante el primer muestro aparecen

porcentajes importantes de hierba, como se pudo observar en el Cuadro 25 y que correspondió principalmente a plántula de café que nació de los frutos que cayeron al suelo.

5.8. Pérdida de suelo estimada

En el Cuadro 28 se presentan de manera concentrada los valores de los cinco factores de la EUPS, así como la pérdida de suelo estimada y observada. La EUPS sobreestimó la magnitud de la erosión; sin embargo, la relación existente entre la pérdida de suelo observada y la estimada es alta (Figura 24). La sobrestimación posiblemente obedece a una sobrestimación del factor *R* debido a la mayor precisión con que se registró la precipitación en el pluviometro II automatizado, es decir, cada 0.2 mm de lluvia, lo que de alguna forma pudo haber contribuido a elevar su valor.

Cuadro 28. Estimación de la pérdida de suelo en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Tratamiento	K (t ha h MJ ⁻¹ mm ⁻¹ ha ⁻¹)	LS Adim	C Adim	P Adim	AE (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	AO (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Sobrestimación
T1	0.028	5.93	0.001	1.00	3.05	0.42	7.32
T2	0.034	7.10	0.003	0.60	8.16	0.41	19.84
T3	0.034	7.42	0.009	1.00	42.59	1.95	21.83
T4	0.032	5.70	0.008	1.00	26.82	2.02	13.28
T5	0.030	4.76	0.009	0.90	21.51	1.05	20.55

Erosividad de la lluvia (*R*) = 18,610.39 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹; K = Erosionabilidad del suelo, LS = Longitud y grado de la pendiente, C = Cobertura y manejo; P = Prácticas de conservación; AE = Pérdida de suelo estimada; AO = Pérdida de suelo observada.

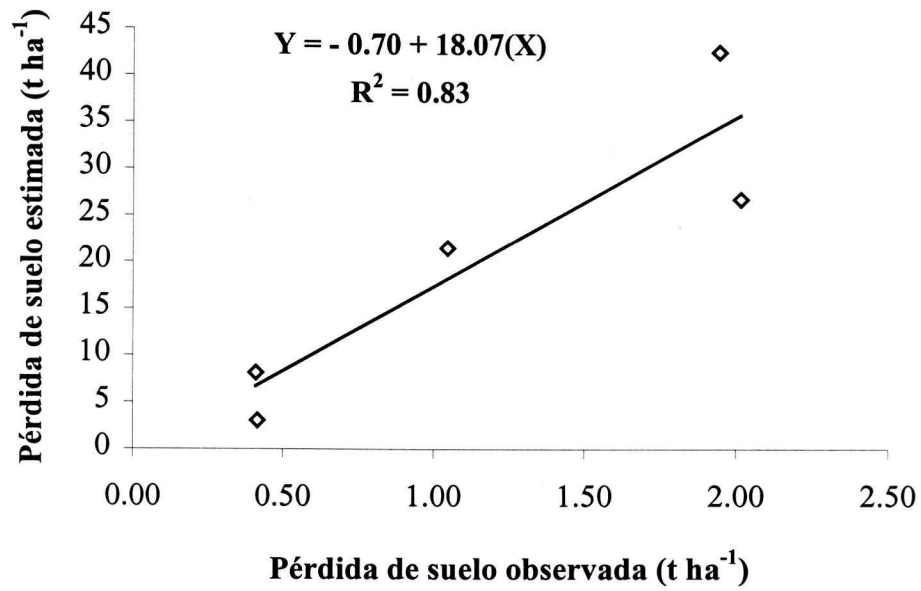


Figura 24. Relación entre la pérdida de suelo estimada y observada en sistemas agroforestales de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

6. CONCLUSIONES

Relacionado con los objetivos e hipótesis planteados en este trabajo de investigación realizado en los cafetales de los productores de la UENOT en Tlachichilco, Ver., se llega a las siguientes conclusiones:

Los sistemas agroforestales de café bajo sombra rusticano (T1) y policultivo tradicional mejorado con barreras vivas y terrazas individuales (T2) mostraron mayor escurrimiento superficial y menor pérdida de suelo que los sistemas de policultivo tradicional mejorado con cobertura de canavalia (T3), cobertura de cacahuatillo (T4) y barreras vivas de palma camedor y palo de agua (T5) estudiados.

Considerando una erosividad igual de la lluvia, la menor pérdida de suelo encontrada en los sistemas agroforestales de café bajo sombra en los sistemas de café rusticano y policultivo tradicional mejorado con barreras vivas y terrazas individuales, se asocia a un mayor contenido de materia orgánica en el suelo, mayor cobertura arbustiva y superficial y a la presencia de barreras vivas y terrazas individuales correctamente establecidas.

La EUPS ajustada simuló satisfactoriamente la tasa anual de pérdida de suelo con una sobreestimación de 7 a 22 veces mayor a lo observado.

En los sistemas agroforestales de café bajo sombra estudiados, la pérdida de suelo se asoció de manera exponencial negativa con el escurrimiento superficial, lo cual significa que a mayor escurrimiento no necesariamente existe mayor pérdida de suelo debido principalmente a que el mantillo y las barreras vivas existentes funcionan como un filtro que permite el paso del agua y retiene el paso de sedimentos.

En los sistemas agroforestales estudiados, la pérdida de suelo se asoció en forma exponencial negativa y de manera significativa con la cobertura de arbustos representada principalmente por el cultivo del café y con la cobertura del mantillo, no existiendo relación importante y congruente con la cobertura arbórea y herbácea.

Con las prácticas de conservación, una cobertura de follaje densa y suficiente mantillo en el suelo, las pérdidas de suelo fueron bajas con respecto a los sistemas donde no existen prácticas de conservación de suelo y suficiente cobertura tanto vegetal como de mantillo.

7. RECOMENDACIONES

Con el propósito de comparar resultados, se recomienda realizar el análisis de los datos registrados durante el año 2001 sobre escurrimiento superficial y pérdida de suelo en los tratamientos establecidos durante el año 2000.

A pesar de que las actividades culturales que realizan los productores sobre sus parcelas encajan dentro de un periodo establecido en la región, sería importante para el análisis de los datos registrados sobre escurrimiento y pérdida de suelo durante el 2001, anotar el día en que se realiza la actividad en cada tratamiento, como son las limpias, podas y cosecha, principalmente, y, de esa manera poder relacionar más directamente algún acontecimiento peculiar sobre la erosión.

En el caso del registro de la lluvia con el pluviómetro II marca Davis, sería importante probar otra calibración mayor a 0.2 mm, que permita conocer como influye sobre el cálculo de la erosividad de la lluvia, ya que en esta ocasión el factor R se consideró un poco elevado, posiblemente obedezca a la forma en que se tomaron los registros (cada 0.2 mm).

Es importante determinar la velocidad de infiltración del agua en el suelo en diferentes periodos por cada tratamiento y de esa forma poderlo relacionar más directamente con los volúmenes de escurrimiento que presenta cada tratamiento.

Por las limitantes que presenta la EUPS para ser aplicada a los sistemas agroforestales de café, es importante poner en práctica otros modelos que simulen la erosión en este tipo de sistemas.

8. REVISIÓN DE LITERATURA

8.1. Literatura citada

- Alarcón M., O.; M., Aldazábal R.; J., Terencio M. 1996. Influencia del sol y la sombra en la calidad y el rendimiento del grano de café. In: Centro agrícola. Revista del ministerio de educación superior de la República de Cuba. 23(3):11-15.
- Amezquita, E. and M. Forsythe. 1985. Rainfall intensity, erosivity index and erodibility in Turrialba, Costa Rica. In: Pla S., I. (ed.). Soil Conservation & Productivity Proceedings. Maracay, Venezuela. pp. 316-326.
- ANACAFÉ. 1987. La sombra del cafeto. Revista cafetalera. 283:11-15.
- ANACAFÉ. 1999. Manual de cafecultura orgánica. Anacafé. Guatemala. 169 p.
- Anónimo. 1992. Café: un cultivo conservacionista del medio ambiente. Cafetal. 319:11-13.
- Arellano L., L.A.J. 1990. Establecimiento de plantaciones. In: El cultivo del cafeto en México: 109-119. Eds. Instituto Mexicano del Café (INMECAFE) y NESTLE. Xalapa, Ver., México.
- Arnoldus, H. M. J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the universal soil equation. In: Boodt, M. and D. Gabriels (eds.). Assesment of erosion. Wiley, Great Britain. pp. 127-132.
- Ataroff, M. and M. Monasterio. 1997. Soil erosion under different management of coffee plantations in the Venezuelan Andes. Soil Technology. 11:95-108.
- Ayres, Q. C. 1960. La erosión del suelo y su control. Ed. Omega. Barcelona. 441 p.
- Bajracharya, R. M.; W. J. Elliot and R. Lal. 1992. Interrill erodibility of some Ohio soils based on field rainfall simulation. Soil Sci. Soc. Am. J. 1(56):267-272.
- Barnett, A. 1958. How intense rainfall effects runoff and soil erosion. Agricultural Enginnering 39(11):703-707.
- Barrientos M., E. 1990. Ecología del cafeto. In: El cultivo del cafeto en México: 29-31. Eds. INMECAFE y Nestle. Jalapa, México.
- Bassols B., A. 1987. Geografía económica de México. 5ª ed. Trillas. México. 122 p.
- Baver L., D.; H. W. Gardner y W. Gardner. 1991. Física de suelos. Noriega editores. México. 529 p.

- Beasley, R. P. 1972. Erosion and sediment pollution control. Iowa State University Press Ames. Iowa. USA. 320 p.
- Beer J., R. Muschler, D. Kass and E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems*. 38:139-164.
- Beer, J. 1991. Ventajas, desventajas y características deseables en los árboles de sombra para café, cacao y té. In: Phillips-Mora W. 1991. Sombras y cultivos asociados con cacao. CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp. 111-125.
- Beer, J. 1996. Efectos de los árboles de sombra en cuanto a la productividad y sostenibilidad de un cafetal. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 14 p.
- Bergsma, E. 1981. Indices of rain erosivity. *ITC Journ.* 4:460-483.
- Bermudez M., M. M. 1980. Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (*Coffea arabica* L.) poro (*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O. F. Cook) y laurel (*Cordia alliodora* (R. & P.) Cham) en Turrialba, Costa Rica. Tesis de Magister Scientiae. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 74 p.
- Binder, U. 1997. Manual de leguminosas de Nicaragua. Tomos I y II. PASOLAC, E.A.G.E. Estelí, Nicaragua. 528 p.
- Brenneman, L. G. and J. M. Laflen. 1982. Modeling sediment deposition behind corn residue. *Transactions of the ASAE*. 25(5):1245-1250.
- Budowski, G. 1993. Agroforestería: una disciplina basada en el conocimiento tradicional. *Revista Forestal Centroamericana*. 3:14-18.
- Castro, F., E. H. 1992. Cultivo, recolección y comercialización de la palma camedor *Chamaedorea* spp. en la Huasteca Potosina. Tesis Profesional. UACH. Chapingo, México. 43 p.
- CCA. 1999. Medición del interés de los consumidores en el café de sombra mexicano: evaluación de los mercados de Canadá, México y Estados Unidos. CCA. Canadá. 40 p.
- CIDICCO. 1997. Experiencias sobre cultivos de cobertura y abonos verdes. CIDICCO. Honduras. 131 p.
- CP y SARH. 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. 3ª ed. CP-SARH. Chapingo, México. 584 p.
- Díaz C., S.; E. Escamilla P. y R. Sosa (Coords.). 1991. Cafeticultura: producción, beneficio y comercialización. Subdirección de Centros Regionales, CRUO-UACH. Huatusco, Veracruz, México. 70 p.

- Díaz C., S.; M. E. Valdivia de Ortega; A. Licona V.; V. Horacio S. y B. Mata G. 1998. Estrategias de los productores ante la crisis del café en la región de Huatusco, Veracruz (1989-1994). In: Revista de geografía agrícola. Estudios de la agricultura mexicana. Número especial: Desarrollo rural regional desde la maestría. 26:187-223.
- Duke, J. 1981. Handbook of legumes of world economic importance. Plenum Press. New York, USA. 345 p.
- Dvorak J. and L. Novak. 1994. Soil conservation and silviculture. ELSERVIER. Amsterdam. 339 p.
- El-Swaify, S. A. And E. W. Dangler. 1982. Rainfall erosion in the tropics: A state of the art. In: Kussow W. (ed). Soil erosion an sonservation in the tropics. ASA. Special Publ. No. 43. pp. 1-26.
- El-Swaify, S. A. and J. H. Fownes. 1988. Erosion processes and models: Applications in the tropics. In Moldenhauer, W. C. and Hudson, N. (eds.). Conservation farming on steep lands. Soil and Water Conservation. Ankeny, Iowa. USA. pp. 135-147.
- Elwell H., A. and M. A. Stocking. 1976. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. Geoderma. 15:61-70.
- Escamilla P., E. 1993. El café cereza en México, tecnología de la producción. DCR, CRUO, UACH, CUESTAAM. Chapingo, México. 116 p.
- Evans, R. 1994. Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico. In: Kirkby M. J. y Morgan R.P.C. 1994. Erosión de suelos. Limusa. México. 375 p.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. UNESCO/PNUMA. Roma, Italia. 86 p.
- FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources. FAO. Roma, Italy. 88 p.
- Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2 ed. CATIE. Costa Rica. 489 p.
- Figueroa S., B. 1975. Perdidas de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Tezcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 209 p.
- Figueroa S., B. 1991. Efectos de la erosión sobre la productividad del suelo. In: CREZAS-CP, USDA-ARS. Taller sobre modelado de la erosión del suelo. Montecillo, México.

- Figuerola S., B. A. Amante O., H. G. Cortes T.; J. Pimentel L.; E. S. Osuna C.; J. M. Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-CP. México. 150 p.
- Foster, G. R.; D. K. McCool; K. G. Renard and W. C. Moldenhauer. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*. 36(6):355-359.
- Foster, G. R.; R. A. Young; M. J. M. Romkens and C. A. Onstad. 1985. Processes of soil erosion by water. In: Follet, R. F. and Stewart, B. A. (eds.). *Soil erosion and crop productivity*. ASA-CSSA-SSSA. Medison, Wisconsin. pp. 137-162.
- Fournier, F. 1975. *Conservación de suelos*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 254 p.
- Glenn O., S. and K. F. Richard. 1990. *Ingeniería de conservación de suelos y agua*. Limusa. México. 570 p.
- Glenn O., S.; D. D. Fangmeier; J. E. William and R. K. Frevert. 1993. *Soil and water conservation engineering*. Fourth Edition. USA. 507 p.
- Goicoechea M., J. 1971. El café situación general en México. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 87 p.
- Gumbs, F. A. and J. J. Lindsay. 1982. Runoff and soil loss in Trinidad under different crops and soil management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1264-1266.
- Hernández G., J. 2001. Estructura, productividad y conservación de suelos en sistemas agroforestales de café (*Coffea spp.*) en la Huasteca Alta de Veracruz. Tesis de licenciatura. UACH. Chapingo, México. En prensa.
- Hofmann L., R. E. Ries and J. E. Gilley. 1983. Relationship of runoff and soil loss to ground cover of native and reclaimed grazing land. *Agronomy Journ.* 75:599-602.
- Holy, M. 1980. *Erosion and environment*. Pergamon Press. Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Frankfort. 225 p.
- Howeler, R. H. 1984. Prácticas de conservación de suelos para cultivos anuales. Manejo y conservación de ladera. Memorias del primer seminario sobre manejo y conservación de suelos. SCSC. Cali, Colombia. pp. 77-94.
- Hudson, N. W. 1971. *Soil Conservation*. Cornell University. Press. New York. 319 p.
- Hudson, N. W. 1977a. *Soil Conservation*. Cornell University Press. Ithaca, New York. 319 p.
- Hudson, N. W. 1977b. The factors determining the extent of soil erosion. In Greenland D. J. and R. Lal (eds.) *Soil erosion end manangement in the humid tropics*. pp. 11-16.

- Hudson, N. W. 1980. Erosion prediction with insufficient data. In Boot M. and D. Gabriels (eds.) Assessment of erosion. John Wiley & Sons. pp. 225-284.
- Hudson, N. W. 1981. Soil conservation. Cornell Univ. Press. Ithaca, N. Y., USA. 324 p.
- Hudson, N. W. 1982. Soil conservation and training requirements in developing tropical countries. In: . El-Swaify, S. A. ASA (Eds.). Soil erosion and conservation in the tropics. Special Publication. Number 43. Medison, Wisconsin, USA. p. 121-133.
- INEGI. 1991a. Veracruz; resultados definitivos, datos por localidad (integración territorial); XI censo general de población y vivienda, 1990. Tomo I. INEGI, México. 624 p.
- INEGI. 1991b. Veracruz; resultados definitivos, tabulados básicos. Tomo I, XI censo general de población y vivienda, 1990. 680 p.
- INEGI. 1994. VII Censo agrícola-ganadero, Veracruz, resultados definitivos. Tomo I-VII. INEGI. México.
- INEGI. 1996a. Anuario estadístico del estado de Veracruz. Tomo II. INEGI-Gobierno del estado de Veracruz. México.
- INEGI. 1996b. Conteo 95 de población y vivienda, resultados definitivos, tabulados básicos, Veracruz. Tomo II. INEGI. México. pp 639-1239.
- INEGI. 1997a. Anuario estadístico del estado de Veracruz. Tomo I y II. INEGI-Gobierno del estado de Veracruz. México. 958 p.
- INEGI. 1997b. Veracruz; datos por ejido y comunidad agraria; XI censo general de población y vivienda, 1990 y VII censo agropecuario, 1991. Tomo I y II. INEGI. México. 922 p.
- INEGI. 1998. Anuario estadístico del estado de Veracruz. Tomo II. INEGI-Gobierno del estado de Veracruz. México. pp. 668-693 y p. 713.
- INEGI. 1999. Anuario estadístico Veracruz. Tomo I y II. INEGI-Gobierno del estado de Veracruz. México. 906 p.
- INEGI. 2000a. Anuario estadístico Veracruz. Tomo I y II. INEGI-Gobierno del estado de Veracruz. México. 906 p.
- INEGI. 2000b. XII Censo general de población y vivienda 2000, resultados preliminares. INEGI. México. 375 p.
- Jiménez A., E. 1982. Comparación de la producción de materia orgánica de un bosque caducifolio y el cafetal. In: Jiménez A., E. y A. Gómez-Pompa. (Eds.). Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. INIREB/CECSA. México. 143 p.

- Jiménez A., E. y A. D. Golberg. 1982. Efecto de diferentes estructuras vegetales sobre el balance hídrico del cafetal. En: Jiménez A., E. y A. Gómez-Pompa. (Eds.). Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero: Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB). CECSA. México, D.F. pp. 39-54.
- Johnson, L. C. 1987. Soil tolerance: Fact or myth? *Journal of Soil & Water Conservation*. 42:155-160.
- Kirkby, M. J. 1991. Erosión de suelos. Limusa Noriega editores. México. 375 p.
- Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan. 1984. Erosión de suelos. Limusa. México. 375 p.
- Lal, R. 1976a. Soil erosion on Alfisol in Western Nigeria, I. Effects of slope, crop rotation and residue managements. *Geoderma*. 16:363-375.
- Lal, R. 1976b. Soil erosion on Alfisol in Western Nigeria, III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*. 19:389-401.
- Lal, R. 1977. Review of soil erosion research in Latin America. In: Greenland y Lal (eds.) *Soil conservation and management in the humid tropics*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, Great Britain. pp. 231-240.
- Lal, R. 1979. Analysis of factors affecting rainfall erosivity and soil erodibility. In: Greenland, D. J. y R. Lal. (eds.). *Soil conservation & management in the humid tropics*. John Wiley & Sons. Great Britain. pp. 49-56.
- Lal, R. 1988. Erodibility and erosivity. In: Lal, R. (ed.). *Soil erosion research methods*. Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa. pp. 141-160.
- Lal, R. and B. Stewart. 1992. Need for land restoration. *Advances in Soil Science*. 17:1-11.
- Lal, R.; T. L. Lawson and A. H. Anastase. 1980. Erosivity of tropical rains. In Boot M. y D. Gadriels (eds.). *Assesment of erosion*. John Wiley & Sons. pp. 143-151
- Lang, R. D. and L. A. H. McCaffrey. 1984. Ground cover-its affects on soil loss from grazed runoff plots, gunnedah. *Journal of Soil and Water Conservation*. 40:56-61.
- Licona V., A. L.; E. Escamilla P.; S. Díaz C. y J. R. Pérez P. 1995. Diversificación productiva en regiones cafetaleras de México. In: Confederación mexicana de productores de café. *Memorias del III Simposio internacional del café*. Xicotepec de Juárez, Puebla, México. pp. 101-112.
- Lundgren, B. 1987. ICRAF's first ten years. *Agroforestry systems*. 5:197-217.
- Mannering, J. V. and C. R. Fenster. 1977. Vegetative mater erosion control for agricultural areas. *Proccedings of the National Symposium on Soil Erosion and*

- Sedimentation by Water. Chicago, Illinois. ASAE. Publication 4-77. St. Joseph, Michigan. pp. 91-106.
- McCool, D. K., L. C. Brown, G. R. Foster, C. K. Mutchler and L. D. Meyer. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE. 30(5):1387-1396.
- McCormack, D. E. K. K. Young and L. W. Kimberlin. 1982. Current criteria for determining soil loss tolerance. In: B. L. Schmidt, R. R. Allmaras, J. V. Mannering and R. I. Papendick. Determinants soil loss tolerance. ASA Special Publication Number 45. Soil Science Soc. Am. WI, USA. pp. 95-111.
- McGregor, K. C. and C. K. Mutchler. 1983. C factor for no till and reduced-till corn. Transactions of the ASAE. 26:785-788.
- McKee, R. 1930. Plantas tropicales para cultivos de cobertura y abonos verdes. Boletín de la Unión Panamericana. Washington D. C., USA. 69:1-30.
- McVaugh, R. 1984. Flora Novo-Galiciana, a descriptive account of the vascular plants of Western México. Vol. 12. Compositae. The University of Michigan. Ed. William R. Anderson. USA. Pp. 395-396.
- Meyer, L. D. 1981. How rain intensity affects interrill erosion. Transaction of the ASAE. pp. 1472-1475.
- Meyer, L. D. 1984. Evolution of the universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation. 39: 99-104.
- Meyer, L. D. and W. C. Harmon. 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:1152-1157.
- Meyer, L. D. and W. H. Wischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. of the ASAE. 12(6):754-758.
- Meyer, L. D. *et al.* 1975. Source of soil erodes from upland slope. In: present and prospective for prediction sediment yields and sources. USDA-ARS: 5-40 pp. 177-189.
- Miller G., T. Jr. 1994. Ecología y medio ambiente; introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta tierra. Iberoamericana, México. 867 p.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. 1996. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. Ciencias. 43: 40-51.
- Monroigi, I., M. F. 1997. La sombra en el cafetal: debatible, controversial, sustentable. Universidad de Puerto Rico. Puerto Rico. 14 p.

- Morgan R., P. C. 1986. Soil erosion and conservation. John Wiley and Sons. New York. USA. 298 p.
- Morgan R., P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-prensa. Madrid, España. 343 p.
- Muschler, R. 1997. Sombra o sol para un cafetal sostenible: un nuevo enfoque de una vieja discusión. En: IICA/PROMECAFE. Memorias del XVIII Simposio Latinoamericano de Cafecultura. EDITORAMA. San José, Costa Rica. pp. 471-476.
- Nair P. K. R. 1997. Agroforestería. L. Krishnamurthy (ed.). UACH. Chapingo, México. 543 p.
- Nair, P. K. R.; M. R. Rao and E. C. M. Fernandes. 1994. Tree Crop Interactions in Sustainable Agroforestry Systems. 15th World Congress of soil Science. Volume: 7^a, Commission VI: Simposia. Acapulco, México. pp. 110-137.
- Nolasco, M. 1985. Café y sociedad en México. Centro de ecodesarrollo. México. 454 p.
- Perles R, M. J. 1997. Medir la erosión: fragilidad erosiva en el valle del río Vélez. CEDMA. España. 230 p.
- Quero H., J. 1994. Flora de Veracruz. Fascículo No. 81 Palmae. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz. 118 p.
- Ramírez G., E. y A. González R. 1990. Manejo de sombra. In: INMECAFE, Nestle (Eds.). El cultivo del cafeto en México. Xalapa, México. pp. 143-147.
- Ríos B., J. D. 1987. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. 244 p.
- Rzedowski, J. 1988. Vegetación de México. Limusa, México. pp. 159-178.
- SAG. 1975. Conservación del suelo y el agua. SAG. México. 183 p.
- SAGAR y FPV. 1997. Tecnología para la producción de café en México. Folleto técnico núm. 8. México. 90 p.
- Sánchez V., A. 1987. Conceptos elementales de hidrología forersta; agua, cuenca y vegetación. UACH. Chapingo, México. 149 p.
- Santoyo C., V. H.; S. Díaz C. y B. Rodríguez P. 1994. Sistema agroindustrial café en México; diagnóstico, problemática y alternativas. Colección: Estructura y dinámica de los sistemas agroindustriales. UACH, CUESTAAM, SARH. Chapingo, México. 157 p.
- Santoyo C., V. H.; S. Díaz C.; E. Escamilla P. y J. D. Robledo M. 1996. Factores agronómicos y calidad del café. UACH. Chapingo, México. 19 p.

- SECAB (Secretaría Ejecutiva del Convenio Andrés Bello). 1990. Especies vegetales promisorias. SEGAB. Bogota, Colombia. pp. 71-86, 195-254.
- SEGOB. 1988. Colección enciclopédica de los municipios; los municipios de Veracruz. México. pp. 457-458.
- SEGOB. 2001. Sistema nacional de información municipal. CD. Versión 4.0 mejorada.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to soil taxonomy. USDA. Eight edition. 325 p.
- Spiegel, M. R. 1979. Manual de formulas y tablas matemáticas; 2400 formulas y 60 tablas. McGraw-Hill. México. Pp. 5.
- SPP. 1983a. Carta topográfica. México. 1:250 000. Color. F14 11.
- SPP. 1983b. Carta hidrológica de aguas superficiales. México. 1:250 000. Color. F14 11.
- SPP. 1983c. Carta Geológica. México. 1:250 000. Color. F14 11.
- Staver, C. 1997. *Arachis pintoi* asociado con café. En: CIDICCO. Experiencias sobre cultivos de cobertura y abonos verdes. CIDICCO. Honduras. 131 p.
- Suárez de Castro, F. 1952. Pérdidas por erosión de elementos nutritivos bajo diferentes cubiertas vegetales. Agricultura tropical. 8(8):31-36.
- Suárez de Castro, F. 1979. Conservación de suelos. IICA. San José, Costa Rica. 315 p.
- Torquebiau, E. 1993. Conceptos de agroforestería: una introducción. In: J. A., Leos R. y L. Krishnamurthy (Eds.). CADS- UACH. Chapingo, México. 92 p.
- Van Liew, M. W. and K. E. Saxton. 1983. Slope steepness and incorporated residue effects on rill erosion. Transactions of the ASAE. 26(6):1738-1743.
- Villaseñor L., A. 1987. Cafeticultura moderna en México. Ed. Agrocomunicación Sáenz Colín y Asociados. Texcoco, Edo. México, México. 531 p.
- Wischmeier, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Proceedings. 23(3):246-249.
- Wischmeier, W. H. 1960. Cropping-management factor evaluations for a universal soil-loss equation. Soil Sci. Soc. Proc. 24:322-326.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and missuse of the universal soil loss equation. Journal soil and water conservation. 31(1):5-9.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions American Geophysical Union. 39(2):285-291.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA. Agricultural Handbook. 282 p.

- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. Sci. and Educ. Admin. U. S. Department of Agriculture. Washington, D. C. 59 p.
- Wischmeier, W. H. and J. V. Mannering. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Proc. Am. Soil Soc.* 33:131-137.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson and B. V. Cross. 1971. A soil erodability nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.* 26:189-193.
- Young, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. ICRAF, Nairobi and Cab International, Uk. 276 p.
- Zazueta Z. G. 1984. Influencia de los sistemas de labranza y obras de conservación en la productividad de los suelos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. 195 p.

8.2. Literatura consultada

- Bremner J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen – Total. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties.* 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 595-624.
- Gee G. W. 1986. Particle-size analysis. In: Arnold Klute (Ed.). *Methods of soil analysis part 1; physical and mineralogical methods.* 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 383-411.
- Keeney D. R. 1982. Nitrogen-Inorganic Forms. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties.* 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 643-698.
- Nelson D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties.* 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 539-579.
- Olsen S. R. 1982. Phosphorus. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties.* 2

edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp.403-430.

- Rhoades J. D. 1982. Cation Exchange Capacity. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties. 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 149-157.
- Stevenson F. J. 1982. Nitrogen-Organic Forms. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.). Methods of soil analysis part 2; chemical and microbiological properties. 2 edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp. 625-641.

ANEXOS

Cuadro A1. Características físicas y químicas del suelo en el Sitio 1 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Horizonte	Ap	AB	Btg	Bg
Profundidad (cm)	0-22	22-43	43-63	63-100
Capacidad de Campo	39.48	31.76	33.02	29.72
Punto de Marchitez Permanente	20.52	16.83	18.29	16.92
Humedad Aprovechable	18.96	14.93	14.73	12.80
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1.62	1.84	1.87	1.87
Arcilla (%)	38	39	46	37
TEXTURA Limo fino (%)	31	31	25	30
Limo grueso (%)	16	13	14	15
Arena (%)	15	17	15	18
Arena muy fina (%)	12	15	10	14
Clase Textural	Franco Arcilloso Limoso	Franco Arcilloso Limoso	Arcilla	Franco Arcilloso Limoso
pH 1:2	5.35	5.55	5.35	5.80
CE (dS m ⁻¹)	0.27	0.18	0.12	0.09
IONES SOLUBLES	Ca ²⁺	1.78	0.91	0.54
	Mg ²⁺	0.79	0.64	0.38
	Na ⁺	0.24	0.22	0.24
	K ⁺	0.07	0.04	0.06
	Suma Cationes	2.88	1.81	1.22
	CO ₃ ²⁻	-	-	-
(meq/lit)	HCO ₃ ⁻	2.59	1.67	1.04
	Cl ⁻	0.10	0.34	0.34
	SO ₄ ²⁻	0.14	0.10	0.10
	Suma Aniones	2.83	2.11	1.48
Carbonato de Calcio equivalente (%)		0.00	0.00	0.21
	Ca ²⁺	16.10	14.50	15.80
CATIONES	Mg ²⁺	4.87	3.60	3.70
INTERCAMBIABLES	Na ⁺	0.11	0.11	0.13
meq/100g de suelo	K ⁺	0.28	0.22	0.26
	Suma de Bases	21.3	18.4	19.9
	CIC	25.1	23.4	24.7
Porcentaje Saturación de Bases		84.86	78.63	80.57
Carbono orgánico (%)		3.60	1.20	0.24
N total (%)		0.27	0.16	0.07
N Orgánico (ppm)		794	388	511
N Inorgánico (ppm)		109	137	42
Fósforo total (ppm)		228	153	45
Fósforo Orgánico (ppm)		183	126	27
Acidez Intercam. (cmol kg ⁻¹)		0.20	0.34	1.24
Al ⁺⁺⁺ Intercam. (cmol kg ⁻¹)		0.20	0.20	0.20
H ⁺ (cmol kg ⁻¹)		0	0.06	0.94

Cuadro A2. Características físicas y químicas del suelo en el Sitio 2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver.

Horizonte	Ap	AB	BC
Profundidad (cm)	0-15	15-48	48-105
Capacidad de Campo	39.62	35.66	34.58
Punto de Marchitez Permanente	20.54	20.16	20.65
Humedad Aprovechable	19.08	15.5	13.93
Densidad aparente (Mg m^{-3})	1.62	1.78	1.70
TEXTURA	Arcilla (%)	38	44
	Limo fino (%)	31	28
	Limo grueso (%)	16	12
	Arena (%)	15	16
	Arena muy fina (%)	12	4
Clase Textural	Franco Arcillo Limoso	Arcilla Limosa	Arcilla Limosa
pH 1:2	5.40	5.55	6.20
CE (dS m^{-1})	0.39	0.17	0.12
IONES SOLUBLES (meq/lt)	Ca^{2+}	2.60	0.84
	Mg^{2+}	1.39	0.64
	Na^{+}	0.30	0.24
	K^{+}	0.11	0.07
	Suma Cationes	4.40	1.79
	CO_3^{2-}	-	-
	HCO_3^{-}	3.88	1.67
	Cl^{-}	0.34	0.24
	SO_4^{2-}	0.20	0.06
	Suma Aniones	4.42	1.97
Carbonato de Calcio equivalente (%)	0.22	0.00	0.00
CATIONES INTERCAMBIABLES meq/100g de suelo	Ca^{2+}	12.90	12.50
	Mg^{2+}	5.45	4.86
	Na^{+}	0.11	0.11
	K^{+}	0.26	0.25
	Suma de Bases	18.70	17.70
	CIC	25.80	24.50
Porcentaje Saturación de Bases	72.48	72.24	80.08
Carbono orgánico (%)	4.10	1.20	0.31
N total (%)	0.33	0.17	0.12
N Orgánico (ppm)	1158	311	605
N Inorgánico (ppm)	53	32	32
Fósforo total (ppm)	228	174	129
Fósforo Orgánico (ppm)	201	156	75
Acidez Intercam. (cmol kg^{-1})	0.20	0.49	-
Al^{+++} Intercam. (cmol kg^{-1})	0.2	0.2	-
H^{+} (cmol kg^{-1})	-	0.08	-

Cuadro A3. Características químicas del suelo por tratamiento de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Julio del 2000.

Tratamiento	Profundidad (cm)	pH (1:2)	MO (%)	Nt (%)	NH ₄ (ppm)	NO ₃ (ppm)	P-Labil (ppm)	CaCO ₃ (%)	CIC (cmol kg ⁻¹)	P-total (ppm)	P-orgánico (ppm)
T1	0-10	4.8	6.2	0.07	2.8	1.4	25.6	Trazas	16.44	2013	620
	10-20	4.5	2.7	0.03	1.4	0.7	25.6	Trazas	13.88	1892	303
	20-30	4.3	1.5	0.02	1.4	1.4	trazas	0.15	12.98	1983	802
T2	0-10	5.2	5.3	0.07	4.2	1.4	20.5	0.18	20.89	2255	363
	10-20	4.9	3.8	0.05	4.9	2.1	3.2	0.05	19.91	2074	485
	20-30	5.4	1.7	0.02	4.9	2.8	trazas	0.15	23.55	2346	424
T3	0-10	5.0	5.3	0.06	7.0	8.4	24.3	0.06	18.93	2074	394
	10-20	4.9	2.4	0.03	5.6	7.0	3.2	0.03	18.30	1680	287
	20-30	4.5	2.1	0.02	4.2	6.3	trazas	0.22	18.36	1499	424
T4	0-10	5.1	4.1	0.05	12.5	16.7	17.3	0.24	18.93	1726	424
	10-20	4.5	2.7	0.03	11.2	15.3	9.6	0.26	17.00	1665	484
	20-30	4.5	0.9	0.02	9.1	14.6	trazas	0.14	19.69	2013	378
T5	0-10	5.3	5.5	0.07	2.1	7.0	11.5	0.32	19.99	2286	364
	10-20	5.0	2.6	0.04	1.4	4.2	11.5	0.01	18.88	1892	560
	20-30	4.9	1.2	0.02	1.4	4.2	trazas	trazas	17.88	1922	741

Metodología utilizada en los análisis físicos y químicos de los suelos:

Determinación	Método
pH ((KCl)	Potenciómetro
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Acetato de amonio 1N (pH 7)
N total (Nt)	Semimicro-Kjeldhal
N inorgánico	Arrastre de vapor
N orgánico	Por diferencia (Nitrógeno total – Nitrógeno inorgánico)
P total	Ignición y H ₂ SO ₄
P inorgánico	Calcinación y H ₂ SO ₄
P orgánico	Por diferencia (Fósforo total – Fósforo inorgánico)
P-Labil o disponible	Bray P1
NH ₄ ⁺	KCl 2N
NO ₃ ⁻	KCl 2N
CaCO ₃	Horton y Newson
CC	Olla de presión
Textura	Pipeta
Carbono orgánico	Walkley y Black
pH	Potenciómetro
CE	Puente de conductividad
Ca ⁺⁺	Ácido etilendiamino – tetraacetico (EDTA)
Mg ⁺⁺	Ácido etilendiamino – tetraacetico (EDTA)
Na ⁺	Fotometría de flama
K ⁺	Fotometría de flama
CO ₃ ²⁻	Volumétrico H ₂ SO ₄
HCO ₃ ⁻	Volumétrico H ₂ SO ₄
SO ₄ ²⁻	Turbidimétrico AgNO ₃
Cl ⁻	Turbidimétrico AgNO ₃

Cuadro A4. Precipitación observada de junio a diciembre en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Núm. de evento	Fecha Día/mes	Precipitación (mm)		Precip. (%)	Evento	Fecha Día/mes	Precipitación (mm)		Precip. (%)
		Pluv. manual	Pluv. autom.†				Pluv. manual	Pluvi. autom.†	
1	9/6	1.02	0.51	0.02	37	1/8	7.62	0.60	0.03
2	10/6	11.68	12.39	0.56	38	3/8	5.60	6.80	0.31
3	11/6	85.09	94.21	4.23	39	4/8	38.10	31.60	1.42
4	12/6	95.25	105.54	4.74	40	5/8	6.35	0.60	0.03
5	13/6	22.86	24.85	1.12	41	7/8	15.24	1.60	0.07
6	15/6	15.74	16.92	0.76	42	8/8	71.12	80.60	3.62
7	16/6	5.08	5.04	0.23	43	9/8	85.09	108.40	4.87
8	17/6	2.54	2.20	0.10	44	10/8	0.00	0.40	0.02
9	18/6	38.10	41.84	1.88	45	11/8	2.79	2.60	0.12
10	19/6	4.82	4.75	0.21	46	12/8	8.13	10.20	0.46
11	20/6	26.67	29.10	1.31	47	13/8	40.64	43.40	1.95
12	21/6	49.53	54.58	2.45	48	15/8	13.21	14.80	0.66
13	22/6	4.82	4.75	0.21	49	16/8	0.00	4.00	0.18
14	25/6	20.32	22.02	0.99	50	19/8	6.10	5.80	0.26
15	26/6	31.50	34.48	1.55	51	20/8	41.91	44.60	2.00
16	27/6	7.62	7.87	0.35	52	21/8	43.18	48.20	2.16
17	28/6	5.08	5.04	0.23	53	22/8	16.25	19.40	0.87
18	29/6	4.57	4.47	0.20	54	23/8	0.76	0.80	0.04
19	2/7	11.17	11.82	0.53	55	26/8	10.16	10.20	0.46
20	4/7	15.24	16.36	0.73	56	27/8	3.81	4.60	0.21
21	5/7	49.53	54.58	2.45	57	28/8	6.35	7.00	0.31
22	9/7	9.65	10.13	0.45	58	29/8	35.56	37.60	1.69
23	10/7	18.80	20.33	0.91	59	30/8	0.25	0.20	0.01
24	11/7	14.73	15.79	0.71	60	31/8	15.24	16.20	0.73
25	18/7	15.24	16.36	0.73	61	1/9	10.16	11.80	0.53
26	20/7	20.32	22.02	0.99	62	2/9	4.32	4.80	0.22
27	21/7	7.62	7.87	0.35	63	3/9	18.29	20.00	0.90
28	22/7	16.76	22.40	1.01	64	4/9	0.25	0.60	0.03
29	24/7	6.10	7.40	0.33	65	12/9	6.60	8.00	0.36
30	25/7	12.70	1.20	0.05	66	13/9	20.32	38.80	1.74
31	26/7	4.10	4.40	0.20	67	14/9	27.94	12.70	0.57
32	27/7	45.72	57.40	2.58	68	15/9	22.86	33.20	1.49
33	28/7	15.75	19.00	0.85	69	16/9	33.02	27.00	1.21
34	29/7	36.83	47.40	2.13	70	17/9	10.16	7.80	0.35
35	30/7	7.62	7.80	0.35	71	19/9	9.14	9.40	0.42
36	31/7	0.89	0.80	0.04	72	21/9	48.26	53.40	2.40

Cuadro A4. Continuación

Núm de Evento	Fecha Día/mes	Precipitación (mm)		Precip (%)	Evento	Fecha Día/mes	Precipitación (mm)		Precip (%)
		Pluv. manual	Pluv. autom.†				Pluv. manual.	Pluv. autom.†	
73	23/9	1.27	1.20	0.05	103	17/11	18.29	22.60	1.01
74	24/9	2.03	2.60	0.12	104	18/11	6.60	7.00	0.31
75	25/9	71.12	79.80	3.58	105	19/11	3.81	2.20	0.10
76	26/9	3.05	1.20	0.05	106	20/11	15.75	14.60	0.66
77	5/10	10.16	2.00	0.09	107	21/11	12.70	16.60	0.75
78	6/10	43.18	59.40	2.67	108	26/11	6.10	7.00	0.31
79	7/10	118.11	130.40	5.85	109	27/11	7.62	0.40	0.02
80	8/10	18.29	24.60	1.10	110	29/11	29.21	31.60	1.42
81	9/10	4.57	5.00	0.22	111	30/11	11.18	11.20	0.50
82	10/10	1.27	1.20	0.05	112	1/12	0.00	0.80	0.04
83	11/10	1.52	1.00	0.04	113	2/12	10.92	12.40	0.56
84	12/10	0.00	0.40	0.02	114	3/12	5.59	6.60	0.30
85	13/10	1.52	1.60	0.07	115	4/12	38.10	26.00	1.17
86	15/10	6.10	6.20	0.28	116	5/12	3.81	5.80	0.26
87	16/10	0.00	0.20	0.01	117	6/12	3.81	3.40	0.15
88	17/10	2.54	2.60	0.12	118	7/12	0.00	0.20	0.01
89	18/10	27.94	30.20	1.36	119	8/12	0.00	0.20	0.01
90	19/10	1.02	1.00	0.04	120	10/12	0.00	0.20	0.01
91	22/10	63.50	58.40	2.62	121	12/12	0.00	2.40	0.11
92	25/10	0.00	0.80	0.04	122	14/12	3.81	5.80	0.26
93	30/10	1.27	1.60	0.07	123	15/12	2.03	1.00	0.04
94	1/11	0.00	0.40	0.02	124	16/12	4.57	4.40	0.20
95	2/11	34.29	36.80	1.65	125	17/12	0.00	1.80	0.08
96	3/11	11.17	12.80	0.57	126	19/12	0.00	0.20	0.01
97	4/11	10.67	11.00	0.49	127	21/12	0.00	0.20	0.01
98	8/11	9.14	9.20	0.41	128	23/12	0.00	0.40	0.02
99	9/11	0.25	0.20	0.01	129	24/12	0.76	1.20	0.05
100	13/11	6.60	7.40	0.33	130	27/12	5.59	5.20	0.23
101	14/11	1.52	1.80	0.08	131	28/12	0.76	0.80	0.04
102	15/11	0.51	0.40	0.02	132	30/12	3.55	3.00	0.13
Total							2073.01	2227.90	100.00

† Los datos del 9 de junio al 21 de julio fueron estimados conforme se explica en el texto.

Cuadro A5. Ejemplo de cálculo de la erosividad de la lluvia (EI_{30}) en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000[†].

Tiempo (h:min:seg)	Precip (mm)	Duración (min.)	I (mm h ⁻¹)	Ec/mm (MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Ec total (MJ ha ⁻¹)
17:50:07					
17:50:07	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
17:50:28	0.20	0.33	36.00	0.255	0.051
17:50:39	0.20	0.18	65.45	0.278	0.056
17:50:39	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
17:50:48	0.20	0.15	80.00	0.283	0.057
17:50:48	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
17:51:02	0.20	0.22	55.38	0.271	0.054
17:51:16	0.20	0.23	51.43	0.268	0.054
17:51:16	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
17:51:31	0.20	0.25	48.00	0.266	0.053
17:51:44	0.20	0.22	55.38	0.271	0.054
17:51:59	0.20	0.23	51.43	0.268	0.054
17:51:59	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
17:52:25	0.20	0.43	27.69	0.245	0.049
17:52:59	0.20	0.58	20.57	0.234	0.047
17:53:29	0.20	0.50	24.00	0.239	0.048
17:54:27	0.20	0.97	12.41	0.214	0.043
17:56:07	0.20	1.67	7.20	0.194	0.039
17:57:18	0.20	1.18	10.14	0.207	0.041
18:00:51	0.20	3.55	3.38	0.165	0.033
18:13:23	0.20	12.53	0.96	0.117	0.023
18:18:32	0.20	5.15	2.33	0.151	0.030
18:19:01	0.20	0.48	24.83	0.241	0.048
18:19:52	0.20	0.83	14.40	0.220	0.044
18:21:16	0.20	1.42	8.47	0.200	0.040
18:21:17	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
19:50:11	0.20	88.90	0.13	0.043	0.009
19:50:12	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
19:51:46	0.20	1.57	7.66	0.196	0.039
19:53:48	0.20	2.03	5.90	0.186	0.037
19:53:49	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
19:54:52	0.20	1.05	11.43	0.211	0.042
19:55:33	0.20	0.68	17.56	0.228	0.046
19:56:04	0.20	0.53	22.50	0.237	0.047
19:56:27	0.20	0.37	32.73	0.251	0.050
19:56:52	0.20	0.43	27.69	0.245	0.049
19:57:35	0.20	0.72	16.74	0.226	0.045
19:58:26	0.20	0.85	14.12	0.219	0.044

Cuadro A5. Continuación.

Tiempo (h:min:seg)	Precip (mm)	Duración (min.)	I (mm h ⁻¹)	Ec/mm (MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Ec total (MJ ha ⁻¹)
19:58:26	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
20:00:43	0.20	2.28	5.26	0.182	0.036
20:04:42	0.20	3.98	3.01	0.161	0.032
20:05:47	0.20	1.08	11.08	0.210	0.042
20:06:04	0.20	0.28	42.35	0.261	0.052
20:06:04	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
20:06:18	0.20	0.23	51.43	0.268	0.054
20:06:31	0.20	0.22	55.38	0.271	0.054
20:06:32	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
20:06:48	0.20	0.27	45.00	0.263	0.053
20:06:49	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
20:07:01	0.20	0.22	55.38	0.271	0.054
20:07:19	0.20	0.30	40.00	0.259	0.052
20:07:40	0.20	0.35	34.29	0.253	0.051
20:07:58	0.20	0.32	37.89	0.257	0.051
20:08:34	0.20	0.58	20.57	0.234	0.047
20:09:40	0.20	1.12	10.75	0.209	0.042
20:10:34	0.20	0.90	13.33	0.217	0.043
20:11:38	0.20	1.05	11.43	0.211	0.042
20:11:38	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
20:12:46	0.20	1.13	10.59	0.208	0.042
20:12:46	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
20:15:13	0.20	2.47	4.86	0.179	0.036
20:15:47	0.20	0.57	21.18	0.235	0.047
20:16:07	0.20	0.33	36.00	0.255	0.051
20:16:20	0.20	0.22	55.38	0.271	0.054
20:16:48	0.20	0.47	25.71	0.242	0.048
20:16:49	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
20:17:23	0.20	0.57	21.18	0.235	0.047
20:17:23	0.20	0.01	1440.00	0.283	0.057
20:18:00	0.20	0.60	20.00	0.233	0.047
20:19:29	0.20	1.48	8.09	0.198	0.040
21:14:34	0.20	55.10	0.22	0.061	0.012
21:14:35	0.20	0.02	720.00	0.283	0.057
22:46:41	0.20	92.10	0.13	0.042	0.008
Ejemplo de cálculo:			Energía cinética total = 3.426		
8.4 mm en 30:00 min = 16.80 mm h ⁻¹					
EI ₃₀ = (3.426 MJ ha ⁻¹) (16.80 mm h ⁻¹) = 57.55 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹					

* Evento presentado el día 15 de agosto del año 2000.

Cuadro A6. Erosividad de la lluvia (EI_{30}) para eventos mayores e iguales a 12.7 mm en El Coyo, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Núm. de evento	Fecha	Precip (mm)	Duración precip. (min)	I_{30} (mm h ⁻¹)	Ec total (MJ ha ⁻¹)	EI_{30} (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
1	11/06/00	94.21				1254.12
2	12/06/00	105.54				1432.95
3	13/06/00	24.85				158.76
4	15/06/00	16.92				33.44
5	18/06/00	41.84				427.01
6	20/06/00	29.10				225.83
7	21/06/00	54.58				628.20
8	25/06/00	22.02				114.05
9	26/06/00	34.48				310.84
10	4/07/00	16.36				24.64
11	5/07/00	54.58				628.20
12	10/07/00	20.33				87.30
13	11/07/00	15.79				15.66
14	18/07/00	16.36				24.64
15	20/07/00	22.02				114.05
16	22/07/00	22.40	34.03	43.20	5.89	254.68
17	27/07/00	57.40	229.97	59.60	14.20	846.54
18	28/07/00	19.00	152.58	24.00	4.22	101.28
19	29/07/00	47.40	231.04	18.00	11.96	215.28
20	04/08/00	31.60	240.48	28.80	7.29	210.11
21	08/08/00	80.60	631.21	40.40	18.00	727.32
22	09/08/00	108.40	432.60	71.20	28.18	2006.53
23	13/08/00	43.40	127.61	69.60	11.27	785.08
24	15/08/00	14.80	60.42	16.80	3.42	57.55
25	20/08/00	44.60	451.39	57.60	11.44	659.04
26	21/08/00	48.20	340.90	33.20	10.84	360.13
27	22/08/00	19.40	203.70	10.40	3.91	40.69
28	29/08/00	37.60	62.38	50.80	9.80	497.86
29	31/08/00	16.20	33.27	30.40	4.19	127.49
30	03/09/00	20.00	84.98	26.00	4.58	119.12
31	13/09/00	38.80	130.75	57.60	9.83	566.71
32	14/09/00	12.70	206.28	15.2	2.58	39.35
33	15/09/00	33.20	285.71	26.00	7.42	192.92
34	16/09/00	27.00	130.40	46.40	6.79	315.4
35	21/09/00	53.40	352.03	43.60	12.82	558.99
36	25/09/00	79.80	664.17	44.00	3.96	204.64
37	06/10/00	59.40	398.91	46.00	14.51	667.59
38	07/10/00	130.40	595.55	60.40	32.12	1940.11
39	08/10/00	24.60	644.92	4.40	3.88	17.11

Cuadro A6. Continuación.

Núm. de evento	Fecha	Precip (mm)	Duración precip. (min)	I ₃₀ (mm h ⁻¹)	Ec total (MJ ha ⁻¹)	EI ₃₀ (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
40	18/10/00	30.20	59.85	47.60	7.66	364.75
41	22/10/00	58.40	211.14	59.60	14.72	877.29
42	02/11/00	36.80	393.08	23.60	7.89	186.31
43	03/11/00	12.80	134.54	6.40	2.40	15.36
44	17/11/00	22.60	467.53	10.40	4.27	44.48
45	20/11/00	14.60	464.67	2.40	2.16	5.2
46	21/11/00	16.60	614.09	1.60	2.49	3.99
47	29/11/00	31.60	172.89	14.40	7.34	105.69
48	04/12/00	26.00	607.44	3.60	4.47	16.09
Total						18,610.39

Cuadro A7. Volumen de agua (L) captada en los tinacos por evento de lluvia que provocó escurrimiento por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyo, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

No. de evento	Fecha (Día/mes)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	11/06	39.00	0.25	18.87	3.77	0.50
2	12/06	197.26	85.55	78.00	37.74	90.58
3	13/06	18.87	5.03	0.00	0.00	0.00
4	18/06	37.74	6.30	12.58	3.77	1.26
5	20/06	21.38	6.30	3.77	0.50	0.00
6	21/06	157.00	49.82	15.10	23.90	60.38
7	25/06	0.00	0.00	0.75	0.50	0.00
8	26/06	25.20	22.64	16.35	15.10	15.10
9	4/07	0.00	0.00	0.50	0.61	0.14
10	5/07	86.80	19.61	24.40	8.05	13.10
11	10/07	0.00	0.70	1.04	0.18	1.00
12	11/07	0.00	0.97	1.00	1.00	0.00
13	18/07	0.00	0.00	0.00	0.79	0.00
14	22/07	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00
15	27/07	1.25	4.02	2.51	0.00	0.00
16	28/07	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00
17	29/07	48.56	10.06	6.54	0.56	0.00
18	4/08	0.00	0.00	0.28	0.00	0.14
19	8/08	88.06	45.28	26.42	13.08	39.50
20	9/08	202.79	179.64	86.04	98.12	182.66
21	13/08	40.25	24.40	18.11	13.84	25.66
22	20/08	13.84	4.02	7.55	2.51	0.00
23	21/08	46.55	43.02	23.14	18.87	33.96
24	29/08	15.60	7.55	10.06	5.53	5.03
25	31/08	1.26	3.02	7.55	5.03	0.00
26	3/09	0.00	0.00	8.05	3.77	0.00
27	13/09	0.00	0.33	0.00	0.66	0.00
28	14/09	0.00	0.45	0.76	0.68	0.00
29	16/09	30.70	22.64	13.83	15.35	18.87
30	21/09	86.80	27.67	28.93	36.98	54.09
31	25/09	90.58	83.03	49.56	46.55	83.53
32	6/10	50.32	26.42	10.57	12.58	0.00
33	7/10	199.77	190.72	56.61	93.09	188.20
34	8/10	25.66	18.11	0.00	0.00	13.84
35	18/10	0.00	3.77	5.03	6.29	1.00
36	22/10	13.84	27.70	14.47	18.87	64.16
37	29/11	0.00	0.00	7.55	6.29	0.00
38	4/12	70.45	25.16	37.74	26.42	23.90

Cuadro A8. Volumen de agua escurrida (m³) por evento de lluvia que provocó escurrimiento por parcela experimental (tratamientos) en los sistemas de café bajo sombra estudiados en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

No. de evento	Fecha (Día/mes)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	11/06	3.90	0.03	1.89	0.38	0.05
2	12/06	19.73	8.56	7.80	3.77	9.06
3	13/06	1.89	0.50	0.00	0.00	0.00
4	18/06	3.77	0.63	1.26	0.38	0.13
5	20/06	2.14	0.63	0.38	0.05	0.00
6	21/06	15.70	4.98	1.51	2.39	6.04
7	25/06	0.00	0.00	0.08	0.05	0.00
8	26/06	2.52	2.26	1.64	1.51	1.51
9	4/07	0.00	0.00	0.05	0.06	0.01
10	5/07	8.68	1.96	2.44	0.81	1.31
11	10/07	0.00	0.07	0.10	0.02	0.10
12	11/07	0.00	0.10	0.10	0.10	0.00
13	18/07	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
14	22/07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
15	27/07	0.13	0.40	0.25	0.00	0.00
16	28/07	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
17	29/07	4.86	1.01	0.65	0.06	0.00
18	4/08	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01
19	8/08	8.81	4.53	2.64	1.31	3.95
20	9/08	20.28	17.96	8.60	9.81	18.27
21	13/08	4.03	2.44	1.81	1.38	2.57
22	20/08	1.38	0.40	0.76	0.25	0.00
23	21/08	4.66	4.30	2.31	1.89	3.40
24	29/08	1.56	0.76	1.01	0.55	0.50
25	31/08	0.13	0.30	0.76	0.50	0.00
26	3/09	0.00	0.00	0.81	0.38	0.00
27	13/09	0.00	0.03	0.00	0.07	0.00
28	14/09	0.00	0.05	0.08	0.07	0.00
29	16/09	3.07	2.26	1.38	1.54	1.89
30	21/09	8.68	2.77	2.89	3.70	5.41
31	25/09	9.06	8.30	4.96	4.66	8.35
32	6/10	5.03	2.64	1.06	1.26	0.00
33	7/10	19.98	19.07	5.66	9.31	18.82
34	8/10	2.57	1.81	0.00	0.00	1.38
35	18/10	0.00	0.38	0.50	0.63	0.10
36	22/10	1.38	2.77	1.45	1.89	6.42
37	29/11	0.00	0.00	0.76	0.63	0.00
38	4/12	7.05	2.52	3.77	2.64	2.39

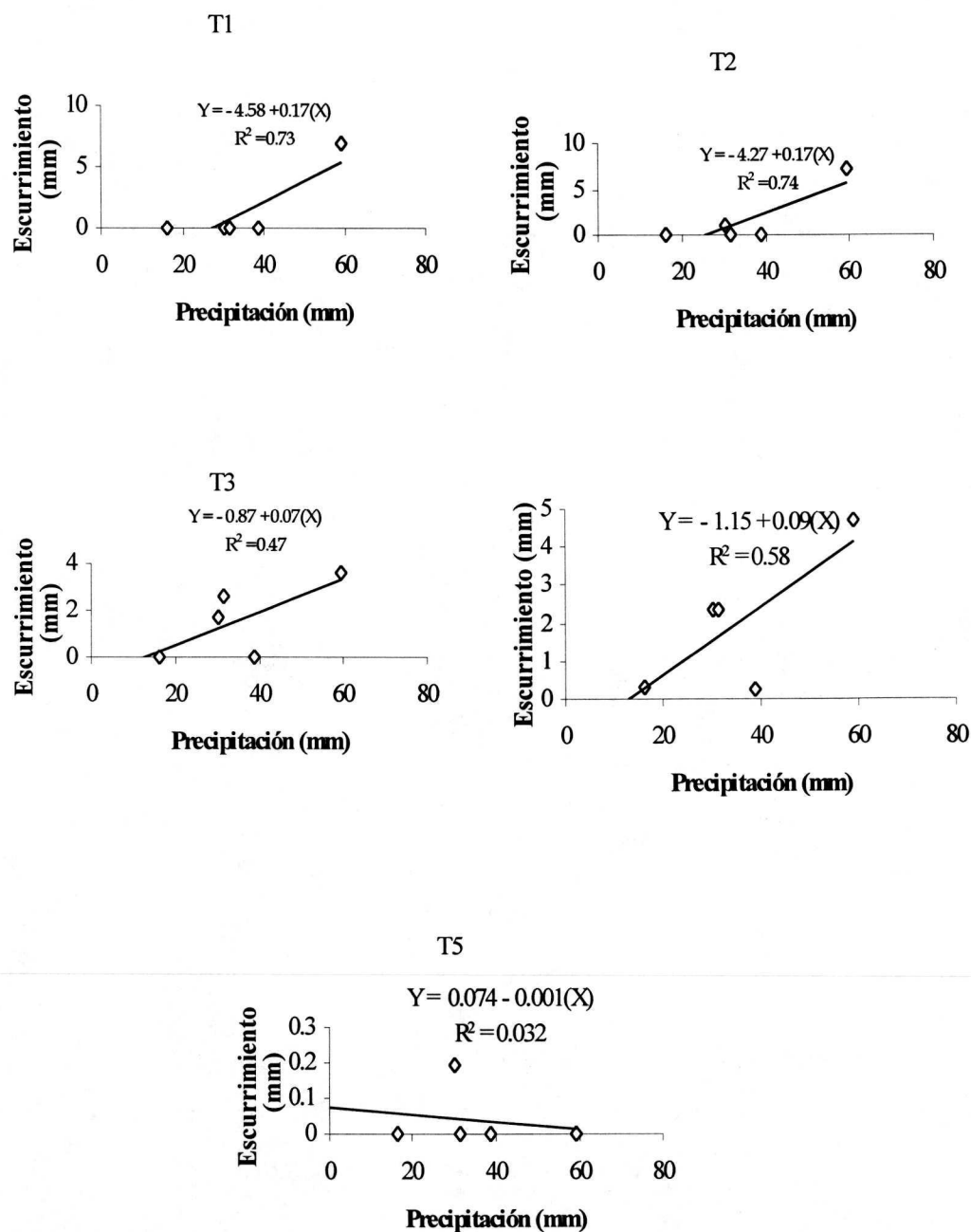


Figura A1. Relación precipitación - escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente I por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

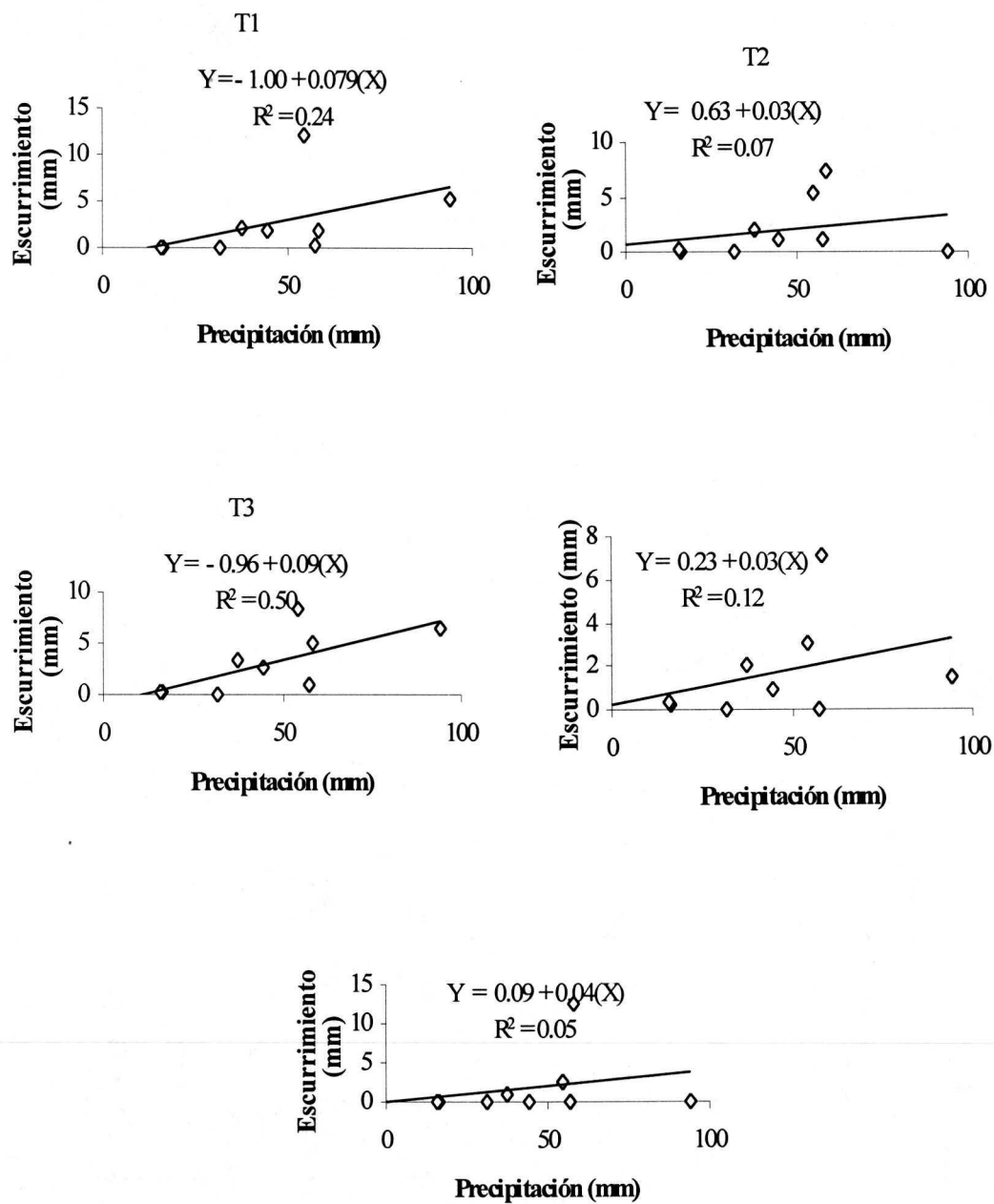


Figura A2. Relación precipitación - escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente II por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

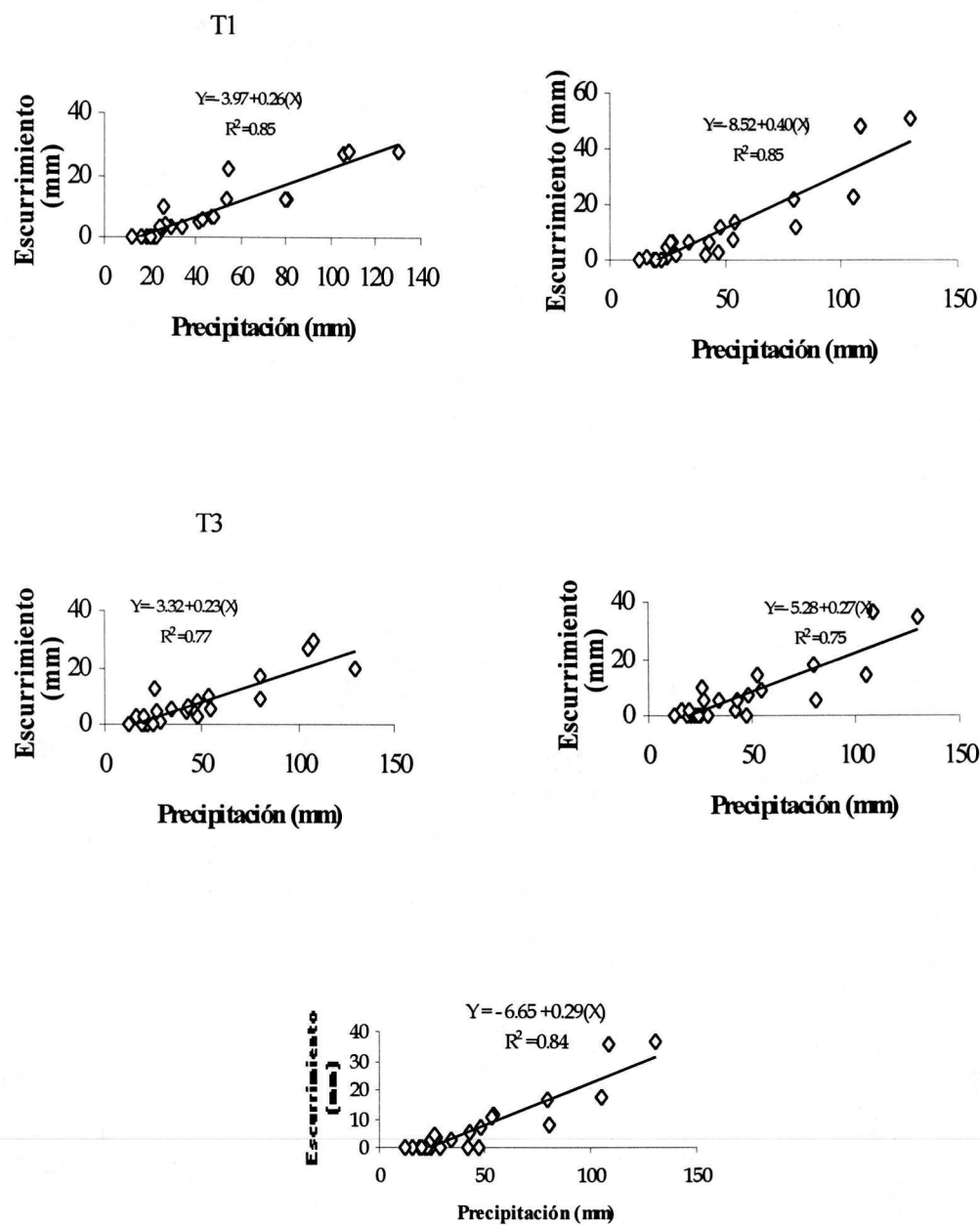


Figura A3. Relación precipitación - escurrimiento bajo la condición de humedad antecedente III por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

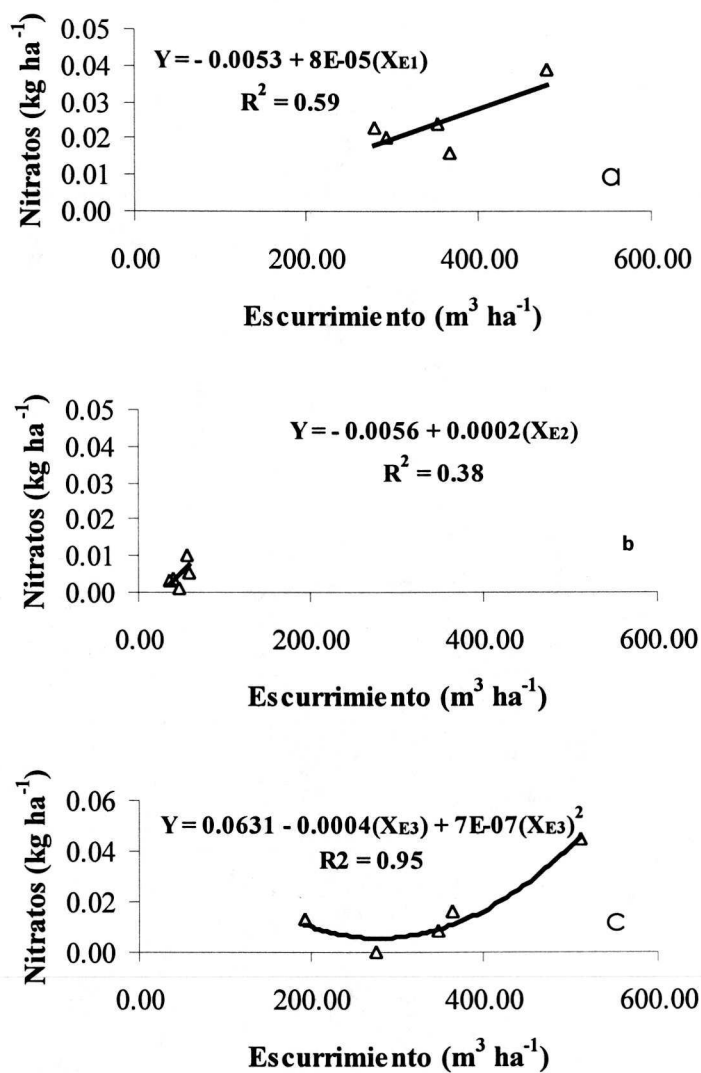
Cuadro A9. Coeficientes de escurrimiento (%) por evento que provocó escurrimiento y tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Núm. de evento	Fecha (día/mes)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	11/06	5.73	0.07	6.84	1.50	0.10
2	12/06	25.85	21.73	25.22	13.39	16.67
3	13/06	10.50	5.43	0.00	0.00	0.00
4	18/06	12.48	4.04	10.26	3.37	0.58
5	20/06	10.16	5.80	4.42	0.64	0.00
6	21/06	39.79	24.47	9.44	16.40	21.48
7	25/06	0.00	0.00	1.16	0.85	0.00
8	26/06	10.11	17.60	16.18	16.40	8.50
9	4/07	0.00	0.00	1.04	1.40	0.17
10	5/07	22.00	9.63	15.26	5.52	4.66
11	10/07	0.00	0.92	1.75	0.33	0.96
12	11/07	0.00	1.65	2.16	2.37	0.00
13	18/07	0.00	0.00	0.00	1.81	0.00
14	22/07	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
15	27/07	0.30	1.88	1.49	0.00	0.00
16	28/07	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
17	29/07	14.17	5.69	4.71	0.44	0.00
18	4/08	0.00	0.00	0.30	0.00	0.09
19	8/08	15.11	15.06	11.19	6.08	9.52
20	9/08	25.87	44.43	27.09	33.90	32.72
21	13/08	12.83	15.07	14.24	11.94	11.48
22	20/08	4.29	2.42	5.78	2.11	0.00
23	21/08	13.36	23.93	16.39	14.66	13.68
24	29/08	5.74	5.38	9.13	5.51	2.60
25	31/08	1.08	5.00	15.91	11.63	0.00
26	3/09	0.00	0.00	13.74	7.06	0.00
27	13/09	0.00	0.23	0.00	0.64	0.00
28	14/09	0.00	0.95	2.04	2.01	0.00
29	16/09	15.73	22.48	17.48	21.29	13.57
30	21/09	22.48	13.89	18.49	25.94	19.67
31	25/09	15.70	27.89	21.20	21.85	20.33
32	6/10	11.72	11.92	6.07	7.93	0.00
33	7/10	21.19	39.21	14.82	26.74	28.02
34	8/10	14.43	19.74	0.00	0.00	10.92
35	18/10	0.00	3.35	5.68	7.80	0.64
36	22/10	3.28	12.72	8.46	12.10	21.33
37	29/11	0.00	0.00	8.15	7.46	0.00
38	4/12	37.48	25.94	49.54	38.06	17.85
Total†		10.00	11.36	9.10	8.76	7.99

† Se consideró la precipitación total registrada (2227.80 mm) y el escurrimiento total por tratamiento.

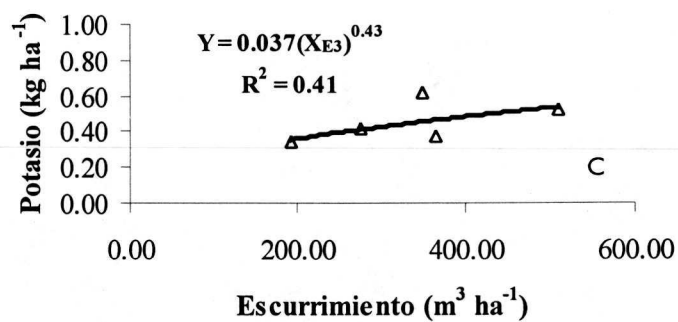
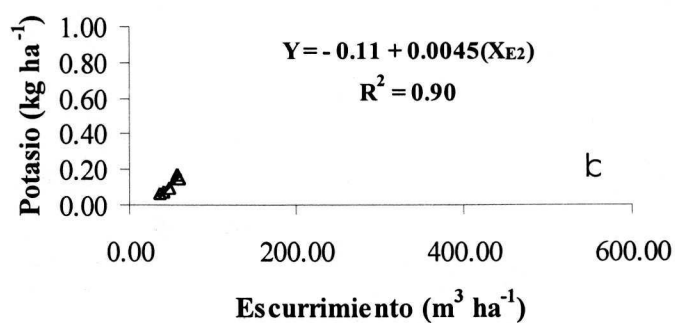
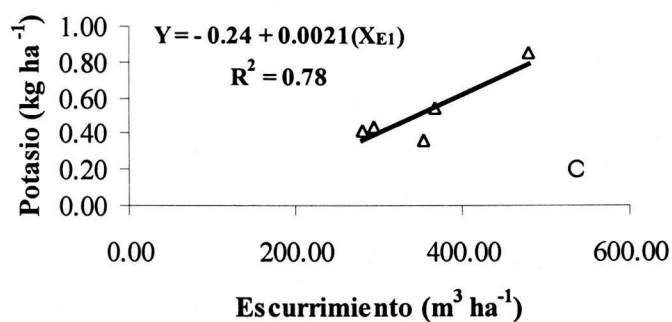
Cuadro A10. Pérdida de nutrientes en el escurrimiento superficial por tratamiento y fecha de muestreo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Tratamiento	Fecha	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺
		(g m ⁻³)			(kg ha ⁻¹ año ⁻¹)		
T1	9/08	0.08	1.49	1.49	0.18	3.31	3.33
	16/09	0.09	1.76	1.75	0.19	3.92	3.89
	7/10	0.00	1.49	1.49	0.00	3.31	3.33
	Promedio	0.06	1.58	1.58	0.12	3.51	3.52
T2	9/08	0.08	1.76	2.00	0.20	4.45	5.06
	16/09	0.09	2.50	1.49	0.22	6.33	3.78
	7/10	0.09	1.02	1.49	0.22	2.57	3.78
	Promedio	0.08	1.76	1.66	0.21	4.45	4.21
T3	9/08	0.07	1.49	1.49	0.14	3.01	3.03
	16/09	0.02	1.99	1.49	0.05	4.04	3.03
	7/10	0.07	1.76	0.99	0.14	3.57	2.00
	Promedio	0.05	1.75	1.33	0.11	3.54	2.69
T4	9/08	0.04	1.49	0.99	0.08	2.90	1.93
	16/09	0.18	3.01	2.51	0.35	5.87	4.89
	7/10	0.02	1.76	1.75	0.05	3.43	3.41
	Promedio	0.08	2.09	1.75	0.16	4.07	3.41
T5	9/08	0.07	1.02	1.75	0.12	1.81	3.11
	16/09	0.09	1.76	1.49	0.15	3.13	2.66
	7/10	0.04	1.02	1.49	0.08	1.81	2.66
	Promedio	0.07	1.26	1.58	0.12	2.25	2.81



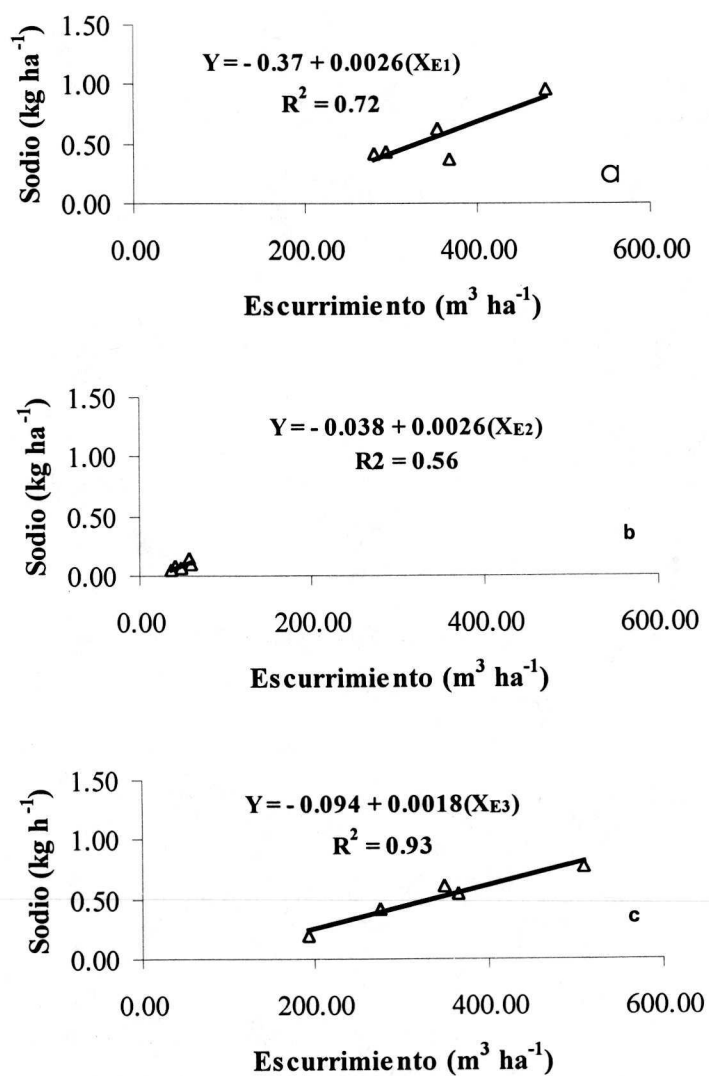
a = 9 de agosto, b = 16 de septiembre, c = 7 de octubre.

Figura A4. Relación de la pérdida de nitratos con el escurrimiento superficial en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlaxichilco, Ver. Año 2000.



a = 9 de agosto, b = 16 de septiembre, c = 7 de octubre.

Figura A5. Relación de la pérdida de potasio con el escurrimiento superficial en sistemas de café bajo sombra en El Coyal, Tlachichilco, Ver. Año 2000.



a = 9 de agosto, b = 16 de septiembre, c = 7 de octubre.

Figura A6. Relación de la pérdida de sodio con el escurrimiento superficial en sistemas de café bajo sombra en la comunidad de El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Cuadro A11. Concentración de sedimentos (g) por cantidad de agua muestreada (L) por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

No. de evento	Fecha (día/mes)	T1		T2		T3		T4		T5	
		Sed	Agua	Sed	Agua	Sed	Agua	Sed	Agua	Sed	Agua
1	11/06	0.05	1.00	0.24	1.00	0.67	0.98	0.88	1.00	0.03	1.00
2	12/06	0.14	1.00	0.22	1.03	0.49	1.00	0.90	1.00	0.12	1.00
3	13/06	5.00	1.00	0.17	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	18/06	0.12	1.00	0.29	1.00	1.09	1.00	0.97	1.00	0.48	1.01
5	20/06	0.06	0.99	0.06	1.06	1.19	1.02	1.37	1.00	0.00	0.00
6	21/06	0.09	1.00	0.15	0.98	3.93	1.04	1.05	1.00	0.17	0.98
7	25/06	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	0.99	1.06	1.00	0.00	0.00
8	26/06	0.08	1.00	0.20	0.97	2.90	1.04	1.34	1.01	0.14	1.00
9	4/07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.50	0.83	0.61	0.15	0.14
10	5/07	0.09	0.99	0.11	1.00	0.46	1.00	0.79	1.00	0.10	1.00
11	10/07	0.00	0.00	0.22	0.71	1.30	1.00	0.26	0.18	0.32	1.00
12	11/07	0.00	0.00	0.13	0.98	0.83	1.00	1.80	1.00	0.00	0.00
13	18/07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.79	0.00	0.00
14	22/07	0.09	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	27/07	0.25	1.00	0.16	0.98	0.56	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
16	28/07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
17	29/07	0.05	0.98	0.02	0.97	0.27	0.95	0.14	0.56	0.00	0.00
18	4/08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.28	0.00	0.00	0.14	0.14
19	8/08	0.05	0.99	0.05	1.02	0.36	0.98	0.61	0.95	0.06	0.98
20	9/08	0.15	1.00	0.13	1.01	0.58	1.01	1.02	1.02	2.24	1.04
21	13/08	0.08	0.98	0.30	1.03	2.35	0.99	1.98	1.00	0.28	0.98
22	20/08	0.08	1.02	0.16	1.00	1.09	0.98	1.04	1.00	0.00	0.00
23	21/08	0.17	1.03	0.10	1.01	1.11	1.10	0.90	0.99	0.72	0.99
24	29/08	0.24	1.01	0.19	1.02	1.78	0.99	2.02	0.96	0.55	1.12
25	31/08	0.22	1.02	0.62	1.01	1.69	0.99	1.19	1.02	0.00	0.00
26	3/09	0.00	0.00	0.00	0.00	1.51	0.99	1.25	0.99	0.00	0.00
27	13/09	0.00	0.00	0.21	0.33	0.00	0.00	0.68	0.66	0.00	0.00
28	14/09	0.00	0.00	0.56	0.46	0.18	0.77	1.91	0.68	0.00	0.00
29	16/09	0.08	1.01	0.21	1.01	1.14	1.03	1.56	0.99	0.12	1.01
30	21/09	0.08	1.00	0.32	1.06	0.91	0.54	1.26	1.01	0.11	1.02
31	25/09	0.06	1.01	0.07	1.01	0.53	1.12	0.57	1.01	0.06	1.12
32	6/10	0.03	1.11	0.10	1.00	0.45	1.00	0.90	1.00	0.00	0.00
33	7/10	0.26	1.00	0.24	1.12	0.88	1.02	0.99	1.02	0.24	1.09
34	8/10	0.11	1.07	0.09	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	1.09
35	18/10	0.00	0.00	0.45	1.13	1.54	1.11	2.76	1.13	0.63	1.00
36	22/10	0.27	1.12	0.19	1.10	1.58	1.10	1.68	1.13	0.34	1.12
37	29/11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	1.10	1.29	1.04	0.00	0.00
38	4/12	0.32	1.15	0.22	1.11	0.93	1.10	0.57	1.09	0.23	1.12

Cuadro A12. Pérdida de suelo (kg) por evento de lluvia que provocó escurrimiento por parcela experimental (tratamiento) en los sistemas de café bajo sombra estudiados en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

No. de evento	Fecha (día/mes)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	11/06	0.1946	0.0060	1.2844	0.3314	0.0015
2	12/06	2.7483	1.8220	3.8315	3.3946	1.0904
3	13/06	9.4539	0.0860	0.0000	0.0000	0.0000
4	18/06	0.4530	0.1830	1.3686	0.3660	0.0597
5	20/06	0.1300	0.0356	0.4396	0.0688	0.0000
6	21/06	1.4130	0.7648	5.7209	2.5099	1.0494
7	25/06	0.0000	0.0000	0.0904	0.0533	0.0000
8	26/06	0.2014	0.4678	4.5449	2.0011	0.2116
9	4/07	0.0000	0.0000	0.0581	0.0826	0.0146
10	5/07	0.7907	0.2157	1.1221	0.6365	0.1307
11	10/07	0.0000	0.0218	0.1351	0.0260	0.0320
12	11/07	0.0000	0.0129	0.0832	0.1797	0.0000
13	18/07	0.0000	0.0000	0.0000	0.0240	0.0000
14	22/07	0.0089	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	27/07	0.0313	0.0654	0.1454	0.0000	0.0000
16	28/07	0.0000	0.0000	0.0059	0.0000	0.0000
17	29/07	0.2479	0.0207	0.1865	0.0139	0.0000
18	4/08	0.0000	0.0000	0.0525	0.0000	0.0139
19	8/08	0.4432	0.2228	0.9707	0.8375	0.2420
20	9/08	3.0347	2.3115	4.9253	9.8430	39.4343
21	13/08	0.3285	0.7126	4.3055	2.7383	0.7317
22	20/08	0.1085	0.0641	0.8429	0.2616	0.0000
23	21/08	0.7707	0.4260	2.3344	1.7229	2.4638
24	29/08	0.3723	0.1406	1.8013	1.1599	0.2462
25	31/08	0.0272	0.1856	1.2848	0.5895	0.0000
26	3/09	0.0000	0.0000	1.2303	0.4771	0.0000
27	13/09	0.0000	0.0209	0.0000	0.0681	0.0000
28	14/09	0.0000	0.0554	0.0179	0.1904	0.0000
29	16/09	0.2421	0.4691	1.5308	2.4082	0.2243
30	21/09	0.6925	0.8315	4.8997	4.6230	0.5850
31	25/09	0.5381	0.5775	2.3404	2.6158	0.4474
32	6/10	0.1360	0.2634	0.4749	1.1293	0.0000
33	7/10	5.2187	4.0813	4.8671	9.0686	4.1502
34	8/10	0.2630	0.1459	0.0000	0.0000	0.2798
35	18/10	0.0000	0.1498	0.6950	1.5344	0.0631
36	22/10	0.3350	0.4763	2.0721	2.8122	1.9396
37	29/11	0.0000	0.0000	0.3228	0.7830	0.0000
38	4/12	1.9603	0.4975	3.1883	1.3783	0.4920

Cuadro A13. Pérdida de suelo (kg ha^{-1}) por evento de lluvia que provocó escurrimiento y tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

No. de evento	Fecha (día/mes)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	11/06	2.692	0.161	43.837	12.412	0.029
2	12/06	38.012	48.847	130.769	127.137	21.172
3	13/06	130.759	2.304	0.000	0.000	0.000
4	18/06	6.266	4.907	46.710	13.710	1.159
5	20/06	1.798	0.953	15.004	2.576	0.000
6	21/06	19.543	20.504	195.253	94.003	20.377
7	25/06	0.000	0.000	3.086	1.995	0.000
8	26/06	2.786	12.543	155.117	74.948	4.108
9	4/07	0.000	0.000	1.982	3.093	0.283
10	5/07	10.936	5.783	38.296	23.837	2.538
11	10/07	0.000	0.585	4.612	0.975	0.621
12	11/07	0.000	0.347	2.841	6.730	0.000
13	18/07	0.000	0.000	0.000	0.900	0.000
14	22/07	0.123	0.000	0.000	0.000	0.000
15	27/07	0.433	1.754	4.964	0.000	0.000
16	28/07	0.000	0.000	0.203	0.000	0.000
17	29/07	3.428	0.555	6.365	0.521	0.000
18	4/08	0.000	0.000	1.792	0.000	0.271
19	8/08	6.130	5.973	33.129	31.368	4.699
20	9/08	41.973	61.970	168.098	368.651	765.714
21	13/08	4.544	19.106	146.945	102.560	14.209
22	20/08	1.501	1.718	28.768	9.799	0.000
23	21/08	10.659	11.420	79.674	64.527	47.841
24	29/08	5.150	3.770	61.478	43.444	4.780
25	31/08	0.376	4.976	43.850	22.078	0.000
26	3/09	0.000	0.000	41.991	17.869	0.000
27	13/09	0.000	0.560	0.000	2.551	0.000
28	14/09	0.000	1.485	0.609	7.132	0.000
29	16/09	3.348	12.575	52.247	90.196	4.356
30	21/09	9.579	22.292	167.227	173.145	11.360
31	25/09	7.443	15.482	79.877	97.970	8.688
32	6/10	1.881	7.061	16.207	42.295	0.000
33	7/10	72.181	109.418	166.111	339.649	80.587
34	8/10	3.638	3.912	0.000	0.000	5.434
35	18/10	0.000	4.017	23.718	57.469	1.225
36	22/10	4.634	12.770	70.721	105.325	37.662
37	29/11	0.000	0.000	11.016	29.325	0.000
38	4/12	27.114	13.338	108.816	51.623	9.553
Total		416.927	411.086	1951.311	2019.810	1046.665

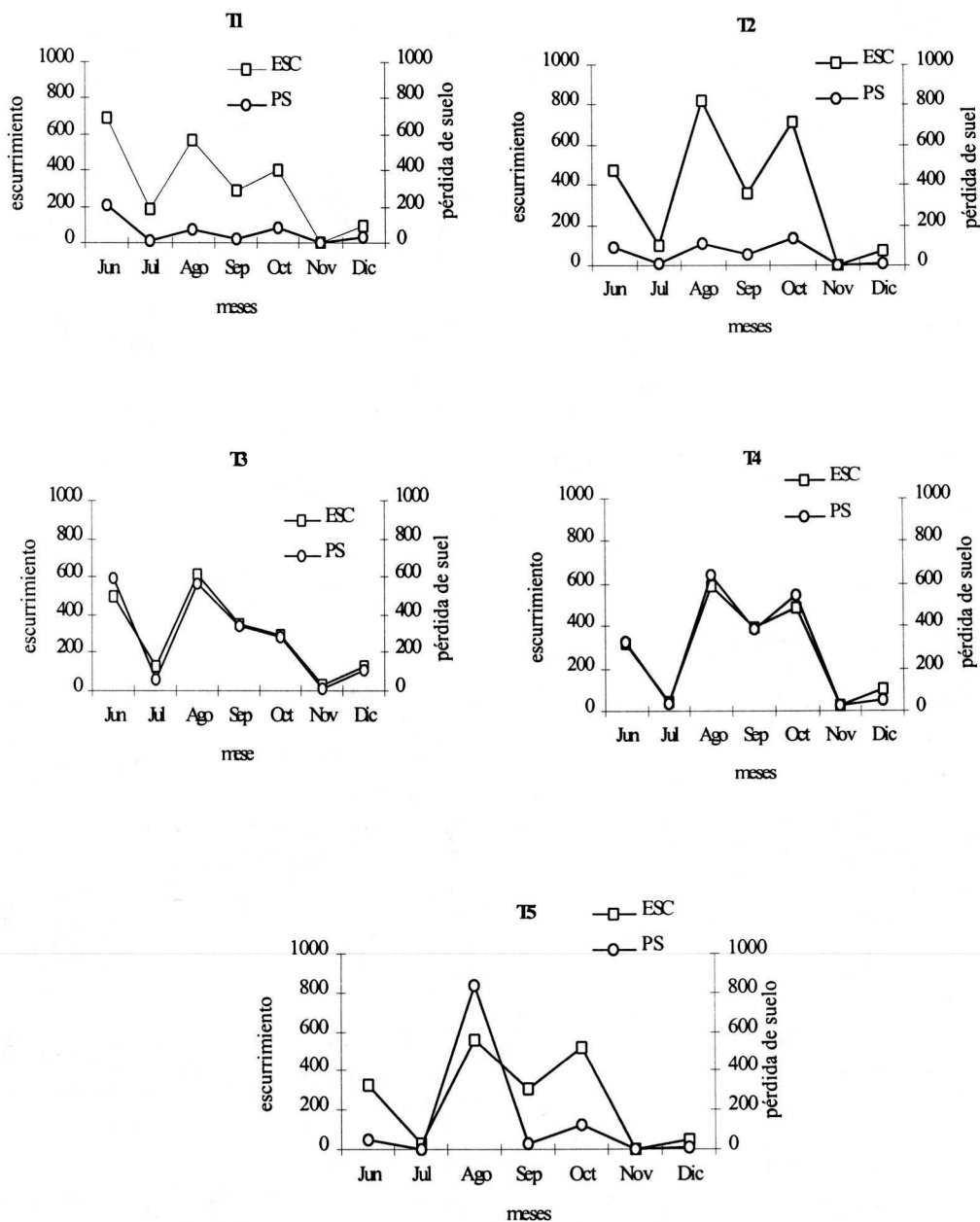


Figura A7. Relación entre pérdida de suelo y escurrimiento a través del tiempo por tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyal, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

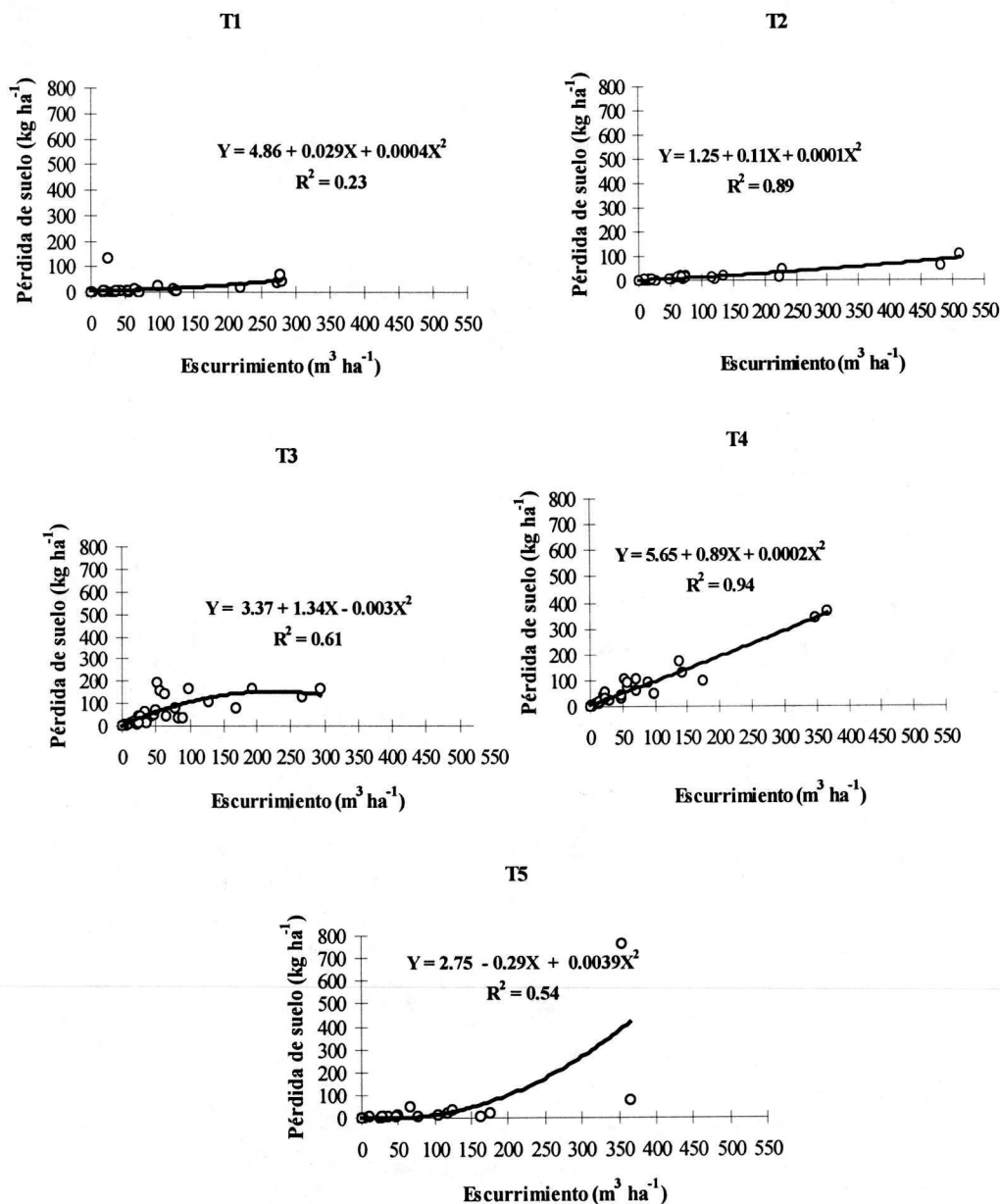


Figura A8. Relación entre pérdida de suelo y escurrimiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

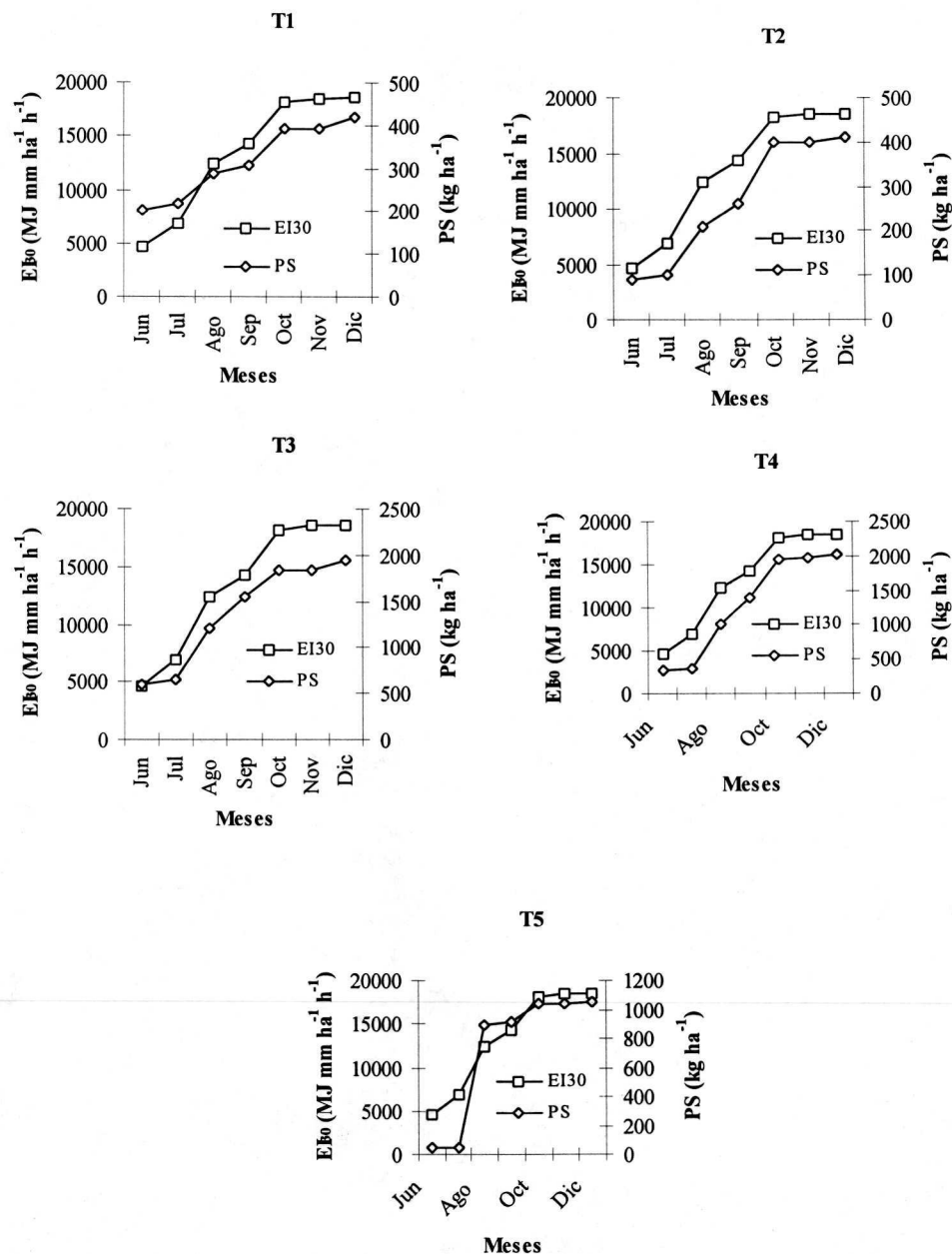


Figura A9. Relación entre pérdida de suelo acumulada y EI_{30} acumulado por mes en cada tratamiento en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

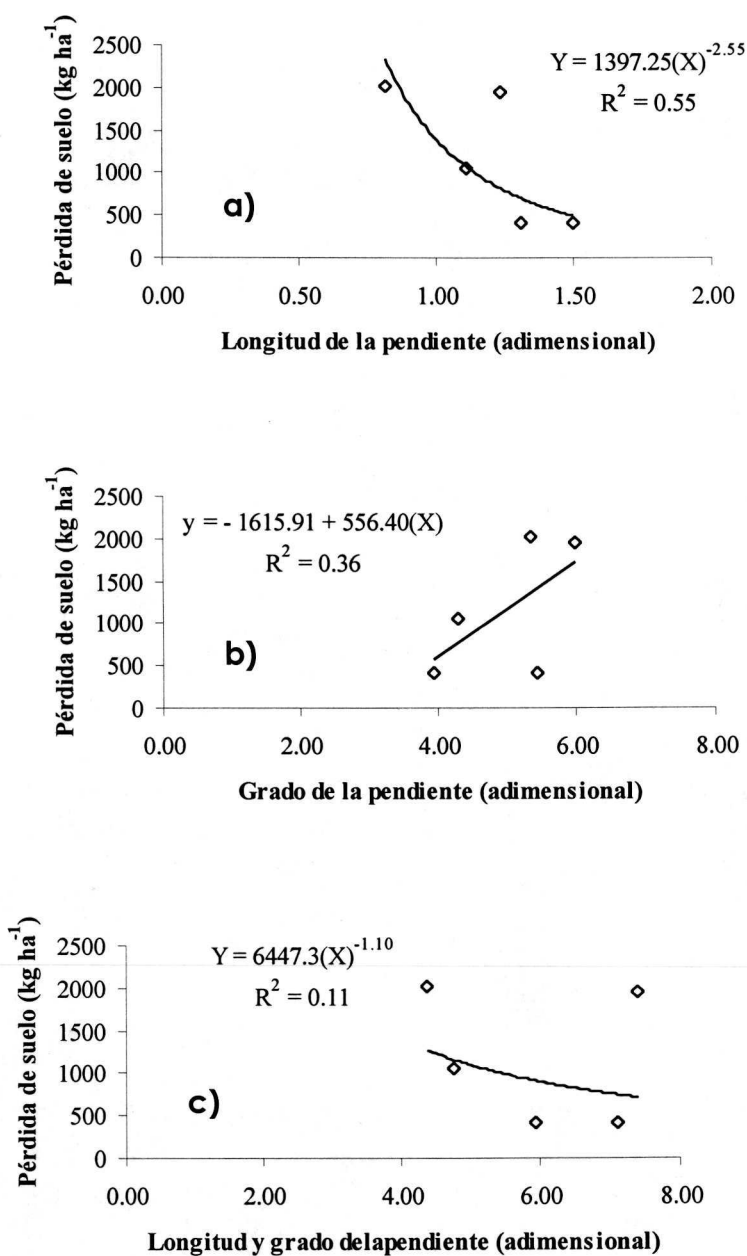


Figura A10. Relación entre el factor longitud y grado de la pendiente con la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyo, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

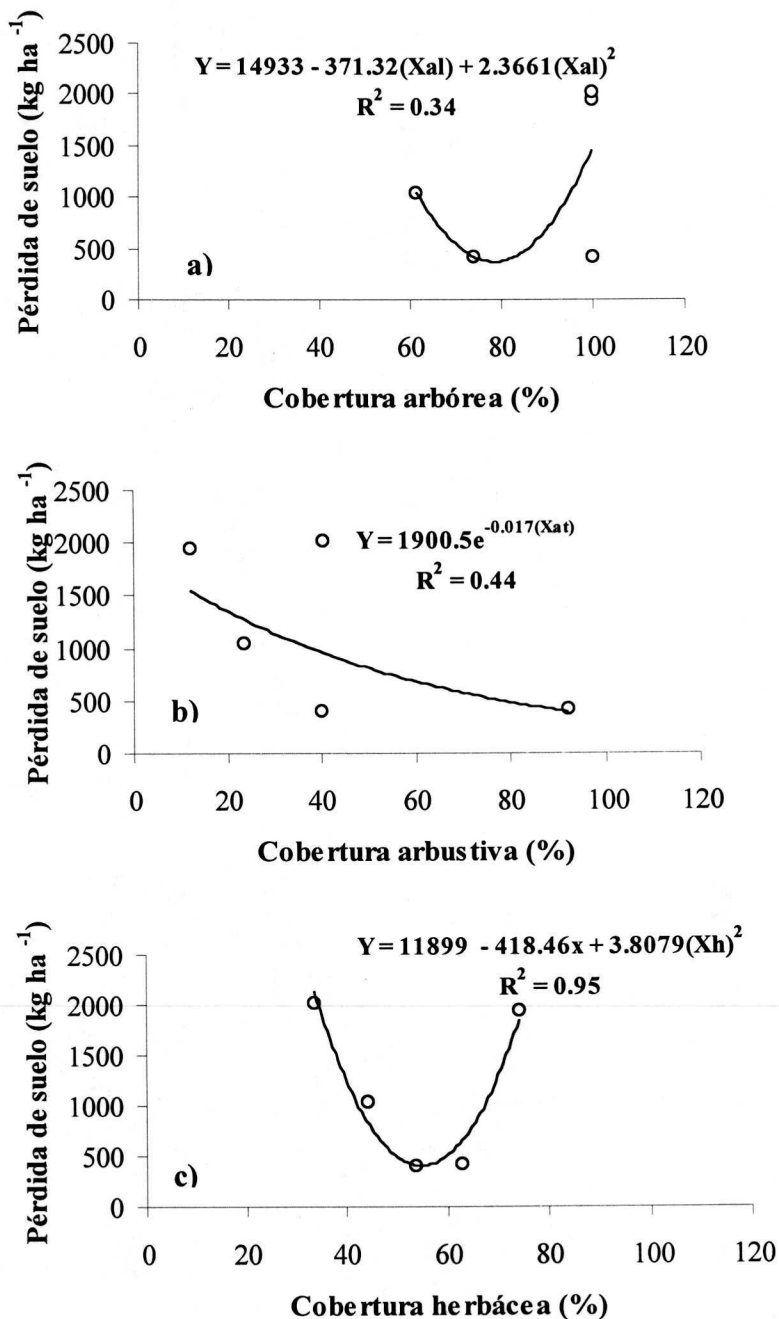


Figura A11. Efecto de la cobertura vegetal aérea sobre la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Según muestreo de julio del 2000.

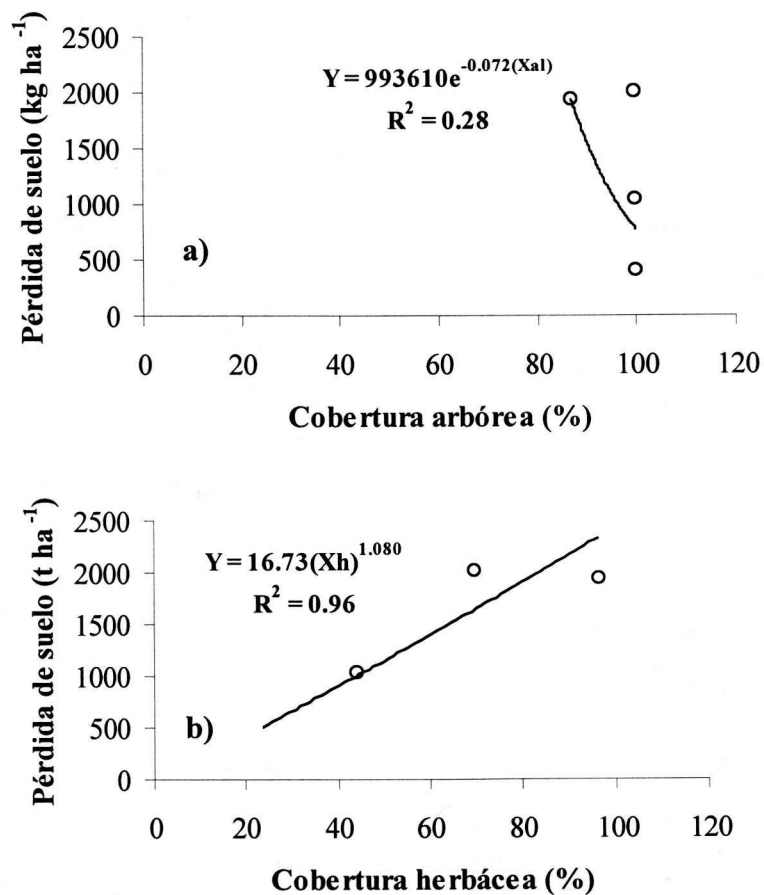


Figura A12. Efecto de la cobertura vegetal aérea sobre la pérdida de suelo en sistemas de café bajo sombra en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Según muestreo de diciembre del 2000.

Cuadro A14. Códigos de estructura del suelo para su uso en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para la determinación del factor K.

Código	Clase de estructura	Tamaño
1	Granular muy fina y grumosa muy fina	<1 mm
2	Granular fina y grumosa fina	1-2 mm
3	Granular media, grumosa media y granular gruesa	5-10 mm
4	Laminar, prismática, columnar, masiva y granular muy gruesa	>10 mm

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.

Cuadro A15. Códigos de permeabilidad para su uso en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para la determinación del factor K.

CÓDIGO	Textura	Clasificación	Conductividad hidráulica (mm/hr)
1	Arenosa	Rápida a muy rápida	>60
2	Franco arenosa Arena francosa	Moderadamente rápida	20-60
3	Franco, franco limosa	Moderada	5-20
4	Franco arcillo arenosa Franco arcillosa	Moderadamente lenta	2-5
5	Franco limo arcillosa Arcillo arenosa	Lenta	1-2
6	Arcillo limosa, arcillosa	Muy lenta	<1

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978

Cuadro A16. Ejemplo de cálculo del grado de pendiente promedio para el tratamiento T2 en El Coyol, Tlachichilco, Ver. Año 2000.

Número de línea de la malla		Intersecciones		Longitud en m	
		Nx	Ny	Lx	Ly
x	y				
0	0	0	0	0.00	0.00
1	1	1	2	0.50	1.50
2	2	3	0	8.70	0.00
3	3	6	2	16.50	6.00
4	4	7	2	21.05	4.87
5	5	6	2	20.75	4.50
6	6	5	2	18.05	5.12
7	7	4	1	13.75	0.57
8	8	3	1	9.25	0.87
9	9	2	1	5.00	0.50
10	10	1	1	0.82	2.25
11	11	0	1	0.00	1.62
12		0	1	0.00	0.75
13		0	0	0.00	0.00
		38	16	114.37	28.55
		54		142.92	

Utilizando el método de Horton (Sánchez, 1987) en el Cuadro A16 se sintetiza el procedimiento empleado para obtener el grado de la pendiente promedio (S_m) por parcela. Sobre cada plano topográfico de los tratamientos se trazó una maya de cuadros como se observa en la Figura a.

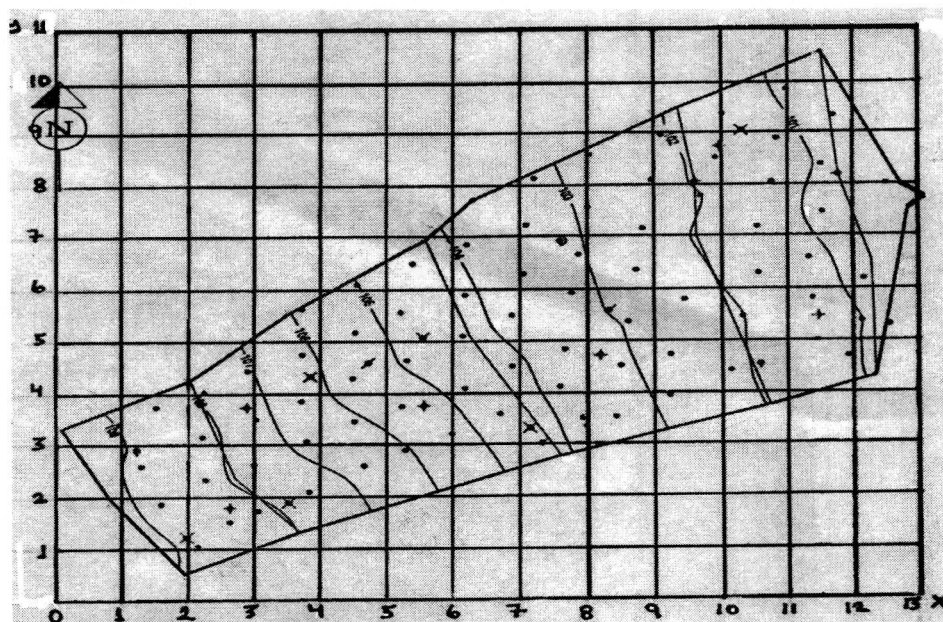


Figura a. Plano del tratamiento T2 con la malla para calcular el porcentaje de la pendiente.

Una vez establecida la malla, se midió la longitud de cada línea (L_x y L_y) comprendida dentro del área contando las intercepciones y tangencias de cada línea (N_x y N_y) con las curvas de nivel en ambos sentidos. La pendiente de la parcela en cada dirección de la malla se determinó con las siguientes relaciones:

$$S_x = (N_x * D) / (L_x) * 100$$

$$S_y = (N_y * D) / (L_y) * 100$$

Donde:

S_x = Pendiente de la parcela en la dirección x en %

S_y = Pendiente de la parcela en la dirección y en %

N_x = Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x , con las curvas de nivel.

N_y = Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y, con las curvas de nivel.

D = Espaciamiento o desnivel constante entre curvas de nivel en m.

L_x = Longitud total de las líneas de la malla en la dirección x, comprendida dentro del área.

L_y = Longitud total de las líneas de la malla en la dirección y, comprendida dentro del área.

La pendiente media de la parcela se determinó como sigue:

$$S_m = (N D \sec \theta) / (L) * 100$$

Donde:

S_m = Pendiente media de la parcela en %

$N = N_x + N_y$ (ya definidos)

D = ya definido

θ = Ángulo formado entre las líneas de la malla y las curvas de nivel

$L = L_x + L_y$ (ya definidos).

Dado que resulta muy problemático determinar el valor de θ de cada intersección, Horton sugiere adoptar el valor promedio de 1.57 en la práctica y para propósitos de comparación Horton propone ignorar el valor $\sec$ de θ o bien considerar el promedio aritmético o geométrico de las pendientes S_x y S_y como pendiente de la cuenca. En este caso ignoramos el valor de $\sec$ de θ .

Sustituyendo valores:

$$S_x = \frac{38 \times 1}{114.37} \times 100 = 33.2$$

$$S_y = \frac{16 \times 1}{28.55} \times 100 = 56.0$$

$$S_m = \frac{54 \times 1}{142.92} \times 100 = 37.8$$

De manera que el grado de la pendiente promedio de la parcela en el tratamiento T2 es de 37.8%.

Cuadro A17. Espaciamiento entre terrazas al considerar la pendiente y la lámina de precipitación

Pendiente (%)	Lámina de la precipitación anual (mm)			
	< 1200	> 1200	< 1200	> 1200
	Intervalo Vertical (IV)		Intervalo Horizontal (IH)	
2	0.81	0.76	40.50	38.00
4	1.02	0.91	25.50	22.75
6	1.22	1.07	20.33	17.83
8	1.42	1.22	17.75	15.25
10	1.62	1.37	16.20	13.70
12	1.83	1.52	15.25	12.66
14	2.03	1.68	14.50	12.00
16	2.24	1.83	14.00	11.43
18	2.44	1.98	13.55	11.00
20	2.64	2.13	13.20	10.65
22	2.84	2.28	12.90	10.36
24	3.05	2.44	12.70	10.16
26	3.25	2.59	12.50	9.96
28	3.45	2.74	12.32	9.78
30	3.66	2.90	12.20	9.67
32	3.86	3.05	12.06	9.53
34	4.06	3.20	11.94	9.41
36	4.27	3.35	11.86	9.30
38	4.47	3.50	11.76	9.21
40	4.67	3.66	11.67	9.15
50	5.69	4.42	11.38	8.84

Fuente: CP y SARH, 1991

