



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS
ECOSISTÉMICOS EN LA MIXTECA
OAXAQUEÑA (Cuenca de Tiltepec)**

IRALDA YADIRA PÉREZ GONZÁLEZ

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

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, MÉXICO

2017

La presente tesis titulada “ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA (Cuenca de Tiltepec)”, fue realizada por la alumna Iralda Yadira Pérez González, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. ABDUL KHALIL GARDEZI GARDEZI

ASESOR

DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ

ASESOR

DR. DEMETRIO S. FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR

M.C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

MONTECILLO, TEXCOCO, MÉXICO

2017

ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA MIXTECA

OAXAQUEÑA (Cuenca de Tiltepec)

Iralda Yadira Pérez González, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Para conocer las fuentes de provisionamiento de servicios ecosistémicos (SE) en la cuenca de Tiltepec, Oaxaca, se analizó la producción de leña, agua para consumo humano y producción de forraje para ganado doméstico, así como de regulación de la producción de agua y sedimentos estimados con el modelo MUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada, por sus siglas en inglés). Para determinar la producción de leña y forraje se definieron puntos de muestreo aleatorios de acuerdo al uso y cobertura del suelo; la leña se cuantificó en cuadrantes de 10 x 10 m para estratos arbóreos y 5 x 5 m para estratos arbustivos; la producción de forraje se determinó con líneas de 20 m y cuadrantes de 0.25 x 0.25 m para determinar biomasa y cobertura vegetal. La oferta de agua se estimó con el aporte de los manantiales y la capacidad de almacenamiento; la demanda de agua se estimó con la población existente y el gasto máximo diario y horario. El consumo de leña promedio estimado fue de 1.4 kg persona⁻¹ día⁻¹ y el volumen total de 2,144.3 m³. La producción de forraje promedio estimada fue de 856.6 kg ha⁻¹ y el coeficiente de agostadero de 13.9 ha UA⁻¹. Los manantiales producen un volumen de agua diario de 150.4 m³, la capacidad de almacenamiento es de 184.7 m³ para consumo humano y 718.5 m³ para riego y usos recreativos, suficientes para satisfacer la demanda de la población. Con el modelo MUSLE se estimó una reducción en el escurrimiento del 33.93% y del 62.93% en la degradación específica comparando el escenario actual con el año de 1984. Los SE presentes en la cuenca de Tiltepec son esenciales para proporcionar bienestar a los habitantes de la localidad y para regular los procesos de erosión a través de obras y prácticas de conservación de suelo y agua establecidas.

Palabras clave: Agua, forraje, leña, servicios de provisión y regulación, y sedimentos

ANALYSIS OF ECOSYSTEM SERVICES IN THE MIXTECA OAXAQUEÑA
(TILTEPEC WATERSHED)

Iralda Yadira Pérez González, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

To know the sources of provision of ecosystem services (SE), an analysis of the production of fuelwood and water for human consumption and forage production for domestic livestock was carried out, as well as the regulation of the production of water and sediments estimated with the model MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) in the Tiltepec watershed, Oaxaca. To determine the production of fuelwood and forage, random sampling points defined according to the soil use and coverage. Firewood evaluated in 10 x 10 m quadrants for tree strata and 5 x 5 m for shrub strata. Forage production was determined with 20 m lines and 0.25 x 0.25 m quadrants to determine biomass and vegetation cover. Water supply estimated with inflows from the springs and the storage capacity of the infrastructure works and the water demand estimated with the existing population and the maximum daily and hourly consumption. The estimated average fuelwood consumption was 1.4 kg person⁻¹ day⁻¹ and a total volume of 2,144.3 m³. The estimated average forage yield was 856.6 kg ha⁻¹ and a grazing coefficient of 13.9 ha UA⁻¹, with a census of 171.7 AU. The springs produce a daily volume of 150.4 m³ and the storage capacity is 184.7 m³ for human consumption and 718.5 m³ for irrigation water and recreational uses. The MUSLE model estimated a reduction in the runoff of 33.93% and 62.93% in a specific degradation for the current scenario with the year 1984. The SEs present in the Tiltepec watershed are essential to provide well-being to local people and to regulate erosion processes through established works and soil and water conservation practices. These will enable better provision of goods and services.

Key words: forage, fuelwood, provision and regulation services, sediments and water.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Postgrado en Hidrociencias, por la oportunidad de ser parte de esta noble institución de enseñanza y contribuir a mi formación académica y personal durante mi estancia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado que me permitió cumplir con una meta más en mi carrera profesional.

Un especial agradecimiento a la *World Wildlife Fund* (WWF) por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Abdul Khalil Gardezi Gardezi, por el apoyo brindado en el presente trabajo.

Al Dr. Mario R. Martínez Menez, con mucho cariño y respeto le agradezco todo el apoyo brindado para la realización del presente trabajo, por su paciencia, dedicación y los ánimos que me dio para culminarlo. Infinitas gracias por los conocimientos transmitidos.

Al Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, le agradezco las observaciones realizadas al presente trabajo que me permitieron tener más claridad en mis ideas.

M.C. José Donald Ríos Berber, gracias por la confianza brindada, las anécdotas compartidas pero sobre todo por la orientación en la realización de este documento.

M.C. Erasmo Rubio Granado, estimado maestro, muchas gracias por estar al pie del cañón apoyándome en todo momento con mis dudas e incertidumbres, le agradezco infinitamente su apoyo incondicional y excelente orientación en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Edmundo García Moya, estimado Doctor, infinitas gracias por la orientación dada en el tema de agostaderos. Gracias por darme seguridad y confianza. Es usted un excelente profesor.

Al Ing. Carlos Palacios Espinosa, por todo el apoyo brindado en los recorridos de campo y asesoría en Sistemas de Información Geográfica.

Al MC. Roberto López Martínez, por su apoyo en el análisis de la información obtenida en campo.

A la C. Mariela Hernández Jiménez, por todo su apoyo en los trámites administrativos durante mi estancia en el Postgrado de Hidrociencias.

Al C. Luis Pérez Lara Comisariado de Bienes Comunales y los habitantes del bello pueblo de Santa María Tiltepec por las facilidades otorgadas para llevar a cabo los trabajos de campo.

A Verónica Guadalupe Lira Caballero, Alejandra Reyes Carrillo, Isabel Villa Montes, Gloria Alejandra Rojas Bautista, Ángela Maribel Cruz Hernández, Celiflora Martínez López e Ing. Roberto Ramírez García por los momentos compartidos en campo y por su apoyo durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios, el Universo y la Vida

Por permitirme alcanzar una meta más en mi vida.

A mis padres Antonia y Vicente David

Por su ejemplo de lucha y perseverancia, gracias por estar y ser parte de mi vida, porque sin su apoyo y consejos no sería la persona que soy...con mucho amor.

A mis queridos hermanos Arelis, David, Erendira, Jesús y Olai

Porque siempre estemos unidos en los buenos y malos momentos, por ser confidentes y cómplices...los quiero mucho.

A mi compañero de vida Ángel

Gracias por tu amor y motivación para lograr esta meta... ¡Sigues tú!...Ánimo...Te amo

A mis cuñadas Iveth y Rosa

Por los momentos de alegría compartidos.

A mis queridos sobrinos: Edy, Danna, Leyda, Vincent, Iker y Donají

Por ser motivos de alegría y esperanza.

A la familia Sorcia Altamirano

Por todo el cariño y atención que siempre me brindan

A mis grandes amigas Ana Lilia, Evelia, Elvira, Sele

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
3. OBJETIVOS	4
3.1. General.....	4
3.2. Específicos.....	4
4. HIPÓTESIS	4
5. MARCO TEÓRICO	5
5.1. Historia de los Servicios Ecosistémicos.....	5
5.2. Definición de Servicios Ecosistémicos.....	9
5.3. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos	10
5.3.1. Servicios ecosistémicos de provisión.....	11
5.3.2. Servicios ecosistémicos de regulación.....	13
5.3.3. Servicios ecosistémicos culturales	15
5.3.4. Servicios ecosistémicos de soporte	16
5.4. Enfoques de estudio de los servicios ecosistémicos	16
5.5. Servicios ecosistémicos del agua	18
5.6. El suelo como capital natural.....	20
1.6.1 Servicios ecosistémicos del suelo.....	21
5.7. Escurrimiento y producción de sedimentos	22
5.7.1. Curvas numéricas.....	23
5.7.2. Factor de Erosionabilidad del suelo (K).....	28

5.7.3. Factor Topográfico (LS).....	33
5.7.4. Factor de cobertura “C”	34
5.7.5. Factor de prácticas de control de erosión “P”	37
5.8. Producción de leña.....	38
5.9. Manejo de agostaderos	42
5.9.1. Condición del pastizal	43
5.9.2. Unidad animal	44
5.9.3. Carga animal y coeficientes de agostadero.....	45
5.10. Estudios de caso de la evaluación de los servicios ecosistémicos.....	47
5.11. InVEST (Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs)	51
6. MARCO DE REFERENCIA.....	54
6.1. Delimitación de la zona de estudio	54
6.2. Caracterización del medio biofísico de la cuenca.....	54
6.2.1. Clima.....	55
6.2.2. Pendientes	60
6.2.3. Geología y fisiografía	62
6.2.4. Suelos.....	64
6.2.5. Uso del suelo y vegetación.....	66
6.2.6. Hidrografía.....	70
6.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca	70
6.3.1. Demografía	71
6.3.2. Índice de marginación y rezago social.....	73
6.3.3. Población económicamente activa y actividades económicas	75
6.3.4. Viviendas y acceso a los servicios de agua potable y drenaje.....	76

6.3.5. Tenencia de la tierra	77
6.3.6. Productividad agrícola y pecuaria.....	78
6.4. Diagnóstico de la cuenca y microcuenca de Tiltepec	81
6.4.1. Recuperación de suelos en la cuenca de Tiltepec	81
6.4.2. Producción de agua con el modelo InVEST: cuenca de Tiltepec.....	87
6.4.3. Producción de sedimentos con el modelo InVEST: cuenca de Tiltepec	88
6.4.4. Producción de agua con el modelo InVEST: microcuenca de Tiltepec	91
6.4.5. Producción de sedimentos con el modelo InVEST: microcuenca de Tiltepec.....	92
7. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	95
7.1. Servicios ecosistémicos en la cuenca de Tiltepec.....	95
7.1.1. Producción de alimentos	95
7.2. Servicios ecosistémico de la microcuenca de Tiltepec	96
7.2.1. Producción de leña.....	98
7.2.2. Producción de forraje	102
8. RESULTADOS.....	114
8.1. Servicios ecosistémicos en la cuenca de Tiltepec.....	114
8.1.1. Producción de alimentos en la cuenca de Tiltepec	114
8.2. Servicios ecosistémicos en la microcuenca de Tiltepec	122
8.2.1. Oferta y demanda de agua	122
8.2.2. Oferta y demanda de leña	126

8.2.3. Producción de forraje	133
8.2.4. Servicios de provisión de agua y regulación de la erosión.....	137
9. CONCLUSIONES.....	142
10. BIBLIOGRAFÍA.....	143

ÍNDICE DE CUADRO

	Página
Cuadro 1. Servicios ecosistémicos de provisión y su importancia para el bienestar humano. _____	12
Cuadro 2. Servicios ecosistémicos de regulación y su importancia para el bienestar humano. _____	14
Cuadro 3. Servicios ecosistémicos culturales y su importancia para el bienestar humano. _____	15
Cuadro 4. Grupos hidrológicos de suelo. _____	25
Cuadro 5. Condición hidrológica para diversos usos de suelo. _____	25
Cuadro 6. Curvas numéricas (CN _{II}) por grupo hidrológico del suelo, tipo de cobertura, prácticas de manejo y condición hidrológica. _____	26
Cuadro 7. Condición de humedad en función de la precipitación. _____	27
Cuadro 8. Códigos de estructura para definir el factor K. _____	29
Cuadro 9. Códigos de permeabilidad para estimar el factor K. _____	30
Cuadro 10. Factor de erosionabilidad del suelo, K (t ha hr ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹).__	31
Cuadro 11. Valores de “K” (t ha hr ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹) para ordenes de suelos propuestos por FAO (1980) _____	32
Cuadro 12. Valores del factor cobertura, C. _____	35
Cuadro 13. Factor de cobertura vegetal (C), para pastizales, agostaderos y terrenos en descanso. _____	37
Cuadro 14. Factor C para terrenos forestales sin disturbios. _____	37
Cuadro 15. Valor de “P” para prácticas de conservación. _____	38
Cuadro 16. Factor de P para terrazas. _____	38
Cuadro 17. Productividad estimada de leña por clase de cobertura. _____	40
Cuadro 18. Consumo de leña per cápita para usuarios de diferentes zonas ecológicas de México. _____	40
Cuadro 19. Consumo de leña en toneladas y energía calorífica a nivel nacional y de Oaxaca. _____	41

Cuadro 20. Clases de condición de pastizales. _____	43
Cuadro 21. Equivalencias en unidad animal para diferentes especies. _____	45
Cuadro 22. Coeficiente de agostadero (ha UA ⁻¹ año ⁻¹) de algunas entidades federativas. _____	46
Cuadro 23. Coeficientes regionales de agostadero en el estado de Oaxaca ____	47
Cuadro 24. Precipitación 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	55
Cuadro 25. Temperatura media 2001-2015 de la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	57
Cuadro 26. Evaporación 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	57
Cuadro 27. Continuación. Evaporación media 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	58
Cuadro 28. Precipitación máxima en 24 h para el período de 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	59
Cuadro 29. Periodos de retorno para la estación Santo Domingo Yanhuitlán_	60
Cuadro 30. Clases de gradiente de la pendiente. _____	60
Cuadro 31. Rango de pendientes para la cuenca de Tiltepec. _____	61
Cuadro 32. Uso de suelo y vegetación en la cuenca de Tiltepec. _____	69
Cuadro 33. Número y orden de corrientes en la cuenca de Tiltepec. _____	70
Cuadro 34. Superficie por municipio y dentro de la cuenca de Tiltepec. ____	71
Cuadro 35. Población de hombres y mujeres por localidad en la cuenca de Tiltepec. _____	73
Cuadro 36. Grado de marginación y rezago social por localidad para la cuenca de Tiltepec. _____	74
Cuadro 37. Tenencia de la tierra por localidad para la cuenca de Tiltepec. ____	78
Cuadro 38. Producción pecuaria para los municipios de la cuenca de Tiltepec 2015. _____	80

Cuadro 39. Valor de producción de la actividad pecuaria para los municipios de la cuenca de Tiltepec. _____	80
Cuadro 40. Inventario de obras y prácticas de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec. _____	82
Cuadro 41. Reducción de la superficie degradada en la cuenca de Tiltepec __	85
Cuadro 42. Producción de agua con InVEST para la cuenca de Tiltepec. _____	87
Cuadro 43. Producción de sedimentos con InVEST para la cuenca de Tiltepec. _____	88
Cuadro 44. Producción de agua con InVEST para la microcuenca de Tiltepec.	91
Cuadro 45. Producción de sedimentos con InVEST para la microcuenca de Tiltepec. _____	92
Cuadro 46. Consumo doméstico per cápita en función al tipo de clima. ____	105
Cuadro 47. Tasa de crecimiento total para el Estado de Oaxaca. _____	105
Cuadro 48. Coeficientes de variación. _____	106
Cuadro 49. Superficie agrícola por municipio estimada en la cuenca de Tiltepec. _____	115
Cuadro 50. Población por municipio de acuerdo a las localidades dentro de la cuenca de Tiltepec. _____	115
Cuadro 51. Producción de granos y productividad por municipio dentro de la cuenca de Tiltepec. _____	117
Cuadro 52. Hatos ganaderos en la cuenca de Tiltepec. _____	120
Cuadro 53. Cabezas de ganado y U.A. por municipio proporcional a la superficie dentro de la cuenca de Tiltepec. _____	120
Cuadro 54. Producción de carne en la cuenca de Tiltepec. _____	121
Cuadro 55. Valor de la producción y productividad pecuaria en la cuenca de Tiltepec. _____	121
Cuadro 56. Oferta de agua Santa María Tiltepec, Oaxaca. _____	125
Cuadro 57. Demanda de agua 2010 y 2030. _____	126
Cuadro 58. Contenido de humedad, densidad y volumen de leña. _____	131

Cuadro 59. Producción de leña Santa María Tiltepec. _____	132
Cuadro 60. Coeficientes de agostadero para la microcuenca de Tiltepec. ____	134
Cuadro 61. Cobertura del suelo para los sitios de agostadero. _____	136
Cuadro 62. Composición del hato: ganado mayor. _____	136
Cuadro 63. Composición del hato: ganado menor. _____	137
Cuadro 64. Parámetros utilizados para correr el modelo MUSLE en la microcuenca de Tiltepec. _____	138
Cuadro 65. Escurrimientos y producción de sedimentos estimados con el modelo MUSLE para dos escenarios. _____	139
Cuadro 66. Indicadores en los servicios ecosistémicos de regulación de la producción de agua y erosión. _____	139

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Etapas de la historia moderna de los servicios ecosistémicos. _____	7
Figura 2. Ejemplo de Servicios Ecosistémicos (SE). _____	10
Figura 3. Clasificación de Servicios ecosistémicos. _____	11
Figura 4. Interacciones entre servicios ecosistémicos, bienestar humano y factores de cambio. _____	17
Figura 5. Análisis de los beneficios del flujo de agua de un ecosistema. _____	19
Figura 6. Servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo. _____	22
Figura 7. Nomograma para determinar el factor K. _____	29
Figura 8. Nomograma para el factor topográfico, LS. _____	34
Figura 9. Localización geográfica de la cuenca de Tiltepec. _____	54
Figura 10. Precipitación diaria para el año 2015 de la estación Santo Domingo Yanhuitlán. _____	56
Figura 11. Climograma para la cuenca de Tiltepec. _____	58
Figura 12. Pendientes topográficas en la cuenca de Tiltepec. _____	62
Figura 13. Geología de la cuenca de Tiltepec. _____	63
Figura 14. Suelos de la cuenca de Tiltepec. _____	64
Figura 15. Uso de suelo y vegetación para la cuenca de Tiltepec. _____	69
Figura 16. Red hidrológica de la cuenca de Tiltepec. _____	72
Figura 17. Población económicamente activa por localidad para la cuenca de Tiltepec. _____	75
Figura 18. Número de viviendas por localidad para la cuenca de Tiltepec. _____	76
Figura 19. Servicios de agua potable y drenaje por localidad en la cuenca de Tiltepec. _____	77
Figura 20. Superficie sembrada y valor de producción del ciclo agrícola PV-OI 2015 para los municipios de la cuenca de Tiltepec. _____	78
Figura 21. Superficie sembrada y valor de la producción de cultivos perennes (2015) para los municipios de la cuenca de Tiltepec. _____	79

Figura 22. Localización de obras de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec. _____	82
Figura 23. Identificación y georreferenciación de las obras de conservación en la cuenca de Tiltepec. _____	83
Figura 24. Principales acciones de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec. _____	84
Figura 25. Comparación de las áreas degradadas 1998 y 2014, periodo húmedo. _____	86
Figura 26. Producción de agua con InVEST para la cuenca de Tiltepec. _____	88
Figura 27. InVEST para el modelo de producción de sedimentos en la cuenca de Tiltepec. _____	90
Figura 28. Producción de agua con InVEST para la microcuenca de Tiltepec. _____	92
Figura 29. Resultados InVEST para el modelo de producción de sedimentos en la microcuenca de Tiltepec. a) Obras de conservación y áreas degradadas; b) Erosión del suelo estimado con USLE; c) Sedimentos retenidos y d) Sedimentos exportados. _____	94
Figura 30. Mapa de ubicación de la microcuenca de Tiltepec. _____	97
Figura 31. Caracterización biofísica de la microcuenca de Tiltepec. _____	98
Figura 32. Encuesta para conocer la demanda de leña. _____	99
Figura 33. Material y aspecto del muestreo de leña en campo y procesamiento de muestras en laboratorio. _____	101
Figura 34. Línea de muestreo para determinar cobertura vegetal y producción de forraje. _____	102
Figura 35. Material y aspecto del muestreo de forraje en campo y procesamiento en laboratorio. _____	103
Figura 36. Diagrama para la determinación de la cobertura vegetal en fotografías digitales. _____	104
Figura 37. Fuentes de abastecimiento de agua potable. Santa María Tiltepec. _____	107

Figura 38. Factor K para la microcuenca de Tiltepec _____	108
Figura 39. Factor LS para la microcuenca de Tiltepec _____	109
Figura 40. Factor C y CN II para la microcuenca de Tiltepec: condiciones anteriores. _____	110
Figura 41. Factor C y CN II para la microcuenca de Tiltepec: condiciones actuales. _____	111
Figura 42. Factor de prácticas de manejo para la microcuenca de Tiltepec. _	112
Figura 43. Diagrama del modelo MUSLE para la estimación de escurrimientos y sedimentos en cuencas. _____	113
Figura 44. Variabilidad temporal de la producción de los cultivos básicos en la cuenca de Tiltepec. _____	118
Figura 45. Siniestros en la producción en el período de 2005 a 2015 para la cuenca de Tiltepec. _____	119
Figura 46. Manantiales Santa María Tiltepec, Oaxaca. _____	123
Figura 47. Depósitos de almacenamiento de agua. _____	124
Figura 48. Tipo de combustibles empleados en los hogares. _____	127
Figura 49. Principales usos de la leña. _____	127
Figura 50. Principales especies para uso de leña. _____	128
Figura 51. Costos por kilogramo de leña. _____	130
Figura 52. Costo anual de leña por familia para Santa María Tiltepec. _____	130
Figura 53. Uso del suelo y vegetación Santa María Tiltepec, Oaxaca. _____	132
Figura 54. Sitios de agostadero para la microcuenca de Tiltepec. _____	133
Figura 55. Sitios de agostadero para la microcuenca de Tiltepec. _____	135
Figura 56. Precipitación, escurrimiento y sedimentos en la microcuenca de Tiltepec. _____	141

1. INTRODUCCIÓN

La cultura Mixteca *Ñu'u Savi* o Pueblo de la lluvia, se desarrolló en un territorio donde las condiciones ecológicas y topográficas condicionaron el desarrollo de ciertos cultivos adaptados a la diversidad de ambientes de esta región. Los problemas que han enfrentado los mixtecos para producir alimentos (maíz asociado con frijol, chile y calabaza) han sido un relieve abrupto y la escasez de agua. La profundidad de los suelo y las condiciones climáticas favorables permitió a los habitantes transformar los ecosistemas naturales con el sistema roza-tumba y quema en áreas de cultivo, propiciando con ello problemas de erosión y deslave en los terrenos de ladera (Spores, 1967; Lind, 2008).

Para atenuar este problema conformaron terrazas llamadas *coo yuu* (lamba-bordo) mediante modificaciones de las pendientes, con el uso de diques de piedras o mampostería, para tener mejor suelo y aprovechar la lluvia (Spores, 1969). Con la conquista española ocurrieron procesos intensivos de deforestación, por el sobrepastoreo de ganado caprino y a la extensión de áreas agrícolas, lo que disminuyó la cobertura vegetal e intensificó los procesos erosivos y de degradación de los ecosistemas (Guerrero *et al.*, 2010).

En la Mixteca Oaxaqueña la población ha sobreexplotado los recursos naturales, lo que ha provocado su deterioro y escasez. Esta deforestación acelerada ha generado procesos erosivos que han repercutido en una menor fertilidad del suelo, desabasto de leña, descenso en la producción de forraje y una menor retención del suelo lo que ha afectado el suministro de agua y la recarga de acuíferos. Una visión alternativa, para atender esta problemática, es el enfoque ecosistémico. Este enfoque establece la manera en que las sociedades dependen de los ecosistemas, a través de los bienes y servicios que estos ofertan, en distintas escalas de tiempo (corto, mediano y largo plazo) y de espacio (local, subcuencas, cuencas y región) (Galán *et al.*, 2012).

Según la CONABIO (2006) el tipo de interacción que existe entre los seres humanos y sus ecosistemas se refleja, a través de los servicios ecosistémicos, en el bienestar de la sociedad. Los SE se dividen en: servicios de provisión, corresponden a los productos obtenidos del ecosistema; los servicios de regulación, se refieren a los procesos que regulan las condiciones del ambiente; los servicios culturales, se refieren a las interacciones entre el hombre y el ecosistema; y finalmente, los servicios de soporte o sustento, aseguran la existencia de los servicios ecosistémicos anteriores (Galán *et al.*, 2012).

El Proyecto GEF-Mixteca identificó, evaluó y valoró socialmente los SE en la región Mixteca, identificando algunos servicios de provisión claves como: producción de alimentos derivados de la agricultura y ganadería, forraje, agua para uso humano, aprovechamiento de leña y madera. También consideró la regulación de la erosión como un servicio de suma importancia ya que impacta de manera directa en la provisión de los demás servicios (WWF, 2015).

En el presente trabajo de investigación se analizaron los servicios de: producción de alimentos, producción de leña y forraje, producción de agua y sedimentos con el modelo MUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada, por sus siglas en inglés).

La importancia del estudio consiste en analizar la capacidad de los ecosistemas para proveer bienes y servicios, el impacto que han tenido las acciones de manejo y de recuperación de suelos en la provisión, regulación y sustento de los servicios ecosistémicos.

2. JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas han sido aprovechados por los seres humanos para satisfacer sus necesidades de alimentación, vestido y vivienda; bienes y servicios económicos, sociales y culturales. La región Mixteca no ha sido la excepción y sus habitantes han aprovechado sus recursos naturales para la extracción de leña y forraje y también han realizado cambios del uso de suelo a favor de la agricultura o pastoreo de ganado, captación de agua para uso doméstico y agrícola, entre otros. Sin embargo, la deforestación, el sobrepastoreo y las prácticas agrícolas en laderas han causado severos problemas de erosión del suelo, escasez de agua y una fuerte presión sobre los ecosistemas de encino, selva baja, matorral, pastizal y agricultura. Esta degradación de los SE de la región contribuye a la escasez fuentes de ingreso y en los altos índices de marginación en las localidades de la zona de estudio.

A los ecosistemas de la zona de estudio no les han dado la importancia o “valor social” necesarios como fuentes de provisión de bienes y servicios para el bienestar de la sociedad. Tampoco se ha destacado la importancia de los servicios ecosistémicos en el desarrollo de las comunidades a través de los servicios de soporte o sustento; que han permitido la recuperación de los procesos ecosistémicos como equilibrio entre las tasas de formación y erosión de los suelos y la recuperación de la cantidad, calidad y distribución del agua para consumo humano.

La World Wildlife Fund (WWF, 2015), menciona que la pérdida de biodiversidad y el deterioro de la cobertura vegetal en la Mixteca, se debe principalmente a la agricultura en ladera y el sobrepastoreo; estas actividades impactan en la regulación de otros servicios como la fertilidad de los suelos, la calidad del agua, la regulación climática y de la erosión que finalmente se traducen en impactos negativos en la producción agricultura, ganadera, cantidad y calidad agua.

El interés por realizar el presente trabajo de investigación surge por la necesidad de analizar la importancia de los servicios ecosistémicos que directa o indirectamente benefician a los habitantes de las cuencas. De modo que los operadores de programas de gobierno y las autoridades locales y federales hagan conciencia en la población sobre la importancia de programas de manejo y restauración en la permanencia de servicios ecosistémicos de su comunidad.

3. OBJETIVOS

En base a lo anterior, para el presente trabajo se presentaron los siguientes objetivos:

3.1. General

1. Analizar y cuantificar la capacidad de la cuenca de Tiltepec para la provisión de servicios ecosistémicos de abastecimiento de agua, producción de alimentos, leña y forraje; y regulación de agua y sedimentos.

3.2. Específicos

1. Analizar los servicios de provisión de la producción de alimentos.
2. Cuantificar la producción de agua y sedimentos.
3. Analizar y cuantificar los servicios ecosistémicos de provisión: producción de leña, producción de forraje y agua para la microcuenca de Tiltepec.

4. HIPÓTESIS

Para lograr los objetivos propuestos, se estableció la siguiente hipótesis:

La cuenca de Tiltepec es capaz de producir, abastecer y regular los servicios ecosistémicos de alimentos, agua, forraje y leña, en calidad y cantidad suficientes para los habitantes de la misma y sin degradación de la cuenca.

5. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presenta un análisis de los servicios ecosistémicos (SE), su origen, evolución, instituciones encargadas de su estudio a nivel nacional e internacional, su clasificación como servicios de provisión, regulación, culturales, soporte y los enfoques de estudio. Se hace énfasis en los servicios de provisión y regulación del agua, suelo, escurrimientos, producción de sedimentos, producción de leña, manejo de agostaderos; así como, los estudios sobre los servicios ecosistémicos y el uso de modelos de análisis y para su valoración.

5.1. Historia de los Servicios Ecosistémicos

Sullivan (2009), señala que el término de servicios ecosistémicos fue impulsado por biólogos conservacionistas para definir a la naturaleza como proveedora de servicios. Este enfoque, surgió a partir de los movimientos ambientales en la década de 1970 y ha tenido la finalidad de incrementar el interés público por la conservación de la biodiversidad.

La historia moderna de los SE, de acuerdo con Gómez *et al.* (2010), tuvo su inicio a partir de la tragedia de los comunes donde se analizó el efecto de la sobrepoblación en el uso de los recursos naturales comunes; seguido por el estudio de la ecología de los ecosistemas y la relación de los seres vivos y el ambiente en términos de materia y energía. En 1972 la Conferencia de Estocolmo tuvo por objetivo, equilibrar el impacto de las actividades socio-económicas humanas hacia el ambiente, especialmente en la degradación ambiental y la contaminación transfronteriza. En ese mismo año, se presentó el informe “Los límites del crecimiento” basado en simulaciones del crecimiento poblacional, crecimiento económico e incremento de la huella ecológica. En los años 80’s se crearon el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED) y la Sociedad

Internacional de Economía Ecológica (ISEE). En 1992 se formalizó el concepto de capital natural, refiriéndose a los recursos naturales como la materia prima que genera flujo de bienes y servicios. A finales de los años 90's y principios de los 2000's se introdujo el término de SE y se incursionó en los métodos de estimación (Figura 1).

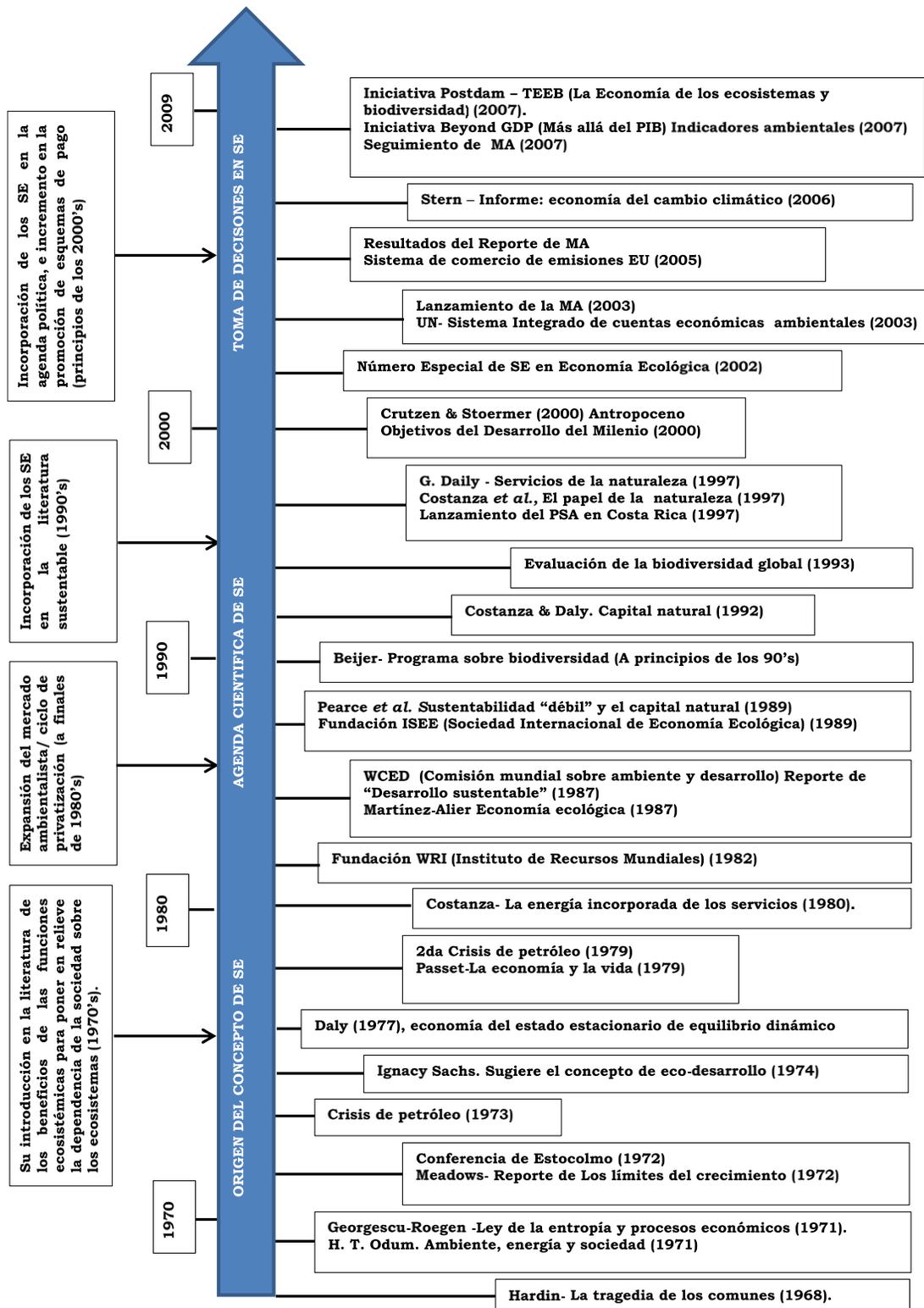


Figura 1. Etapas de la historia moderna de los servicios ecosistémicos.
Fuente: Gómez *et al.* (2010).

Debido a los problemas ambientales originados por los aprovechamientos desmedidos de los recursos naturales para satisfacer la demanda creciente de alimentos, agua dulce, madera, fibras y combustibles; el Convenio sobre la Diversidad Biológica, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, la Convención Ramsar sobre los humedales y la Convención sobre la conservación de las especies migratorias, plantearon la necesidad de una evaluación internacional sobre la importancia de los ecosistemas para el bienestar humano, resultando el documento “Proteger nuestro Planeta, Asegurar nuestro Futuro: Vínculos entre las Cuestiones Ambientales Globales y las Necesidades Humanas” publicado por PNUMA, la NASA y el Banco Mundial (MEA, 2005).

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, por sus siglas en Inglés) surgió en 1998, con el objetivo de *“evaluar las consecuencias del cambio en los ecosistemas sobre el bienestar humano y establecer las bases científicas de las acciones necesarias para mejorar la conservación y usos sustentable de los ecosistemas y su contribución al bienestar humano”* (MEA, 2005). Esto contribuyó a posicionar los servicios ecosistémicos en la agenda política a nivel mundial, a partir de entonces, su uso en la literatura creció exponencialmente (Gómez *et al.*, 2010).

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2009) señaló que *“Es hora de reconocer que la naturaleza es la empresa más grande del planeta, que trabaja para beneficio del 100% de la humanidad – y lo hace gratis”*

En México, las instituciones encargadas de generar información referente a los ecosistemas son la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). El tema de servicios ecosistémicos es relativamente reciente

y a raíz de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio se han desarrollado diversos trabajos interdisciplinarios enfocados a la provisión y mantenimiento de los bienes y servicios ambientales; así como, su valoración económica y socio-cultural (Balvanera, 2012).

En la Mixteca Oaxaqueña a través del Proyecto Mixteca financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), realizaron diversas actividades encaminadas a integrar las opciones de uso de suelo y aprovechamiento de recursos naturales en la provisión de servicios ecosistémicos para mitigar la pobreza y planificar el desarrollo de la región (WWF, 2015).

5.2. Definición de Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos (SE) consideran la interacción entre el hombre y los ecosistemas, siendo este último según Balvanera y Cotler (2011), la unidad funcional básica donde interactúan componentes bióticos y abióticos.

El concepto de servicios ecosistémicos ha sido descrito por diversos autores. Para Daily (1997) *“son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que los conforman, sostienen y nutren a la vida humana”*; proveen bienes y servicios de forma directa o indirecta (De Groot *et al.*, 2002). Para Boyd y Banzhaf (2007) son los procesos ecológicos que se incorporan en la producción de los bienes y servicios. Es decir, tiene que haber un beneficio y un beneficiario. Dominati *et al.* (2010) tomaron en cuenta el concepto de capital natural para definir los servicios ecosistémicos como un flujo de beneficios procedentes de las reservas de capital natural para satisfacer las necesidades humanas (Figura 2). Siendo los SE flujos, es decir, cantidad por unidad de tiempo. Balvanera *et al.* (2012) señalan que es la relación directa entre los ecosistemas y los seres humanos (suministro, entrega y valor), este último en términos económicos o dimensiones no tangibles. Para MEA (2005) son *“todos los beneficios que las poblaciones humanas obtienen de*

los ecosistemas”. En síntesis, los servicios ecosistémicos se traducen en un beneficio ambiental, económico y socio-cultural producto de la interacción del hombre y los ecosistemas.

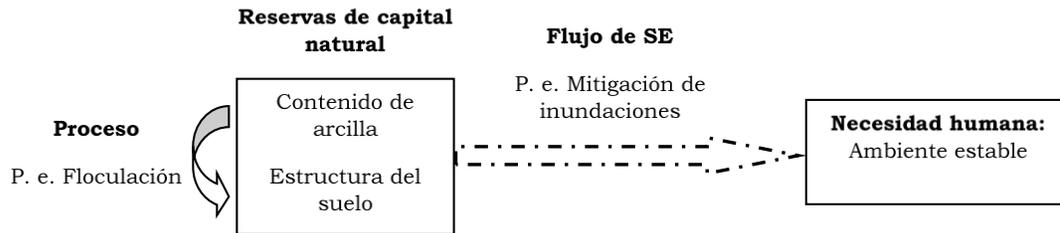


Figura 2. Ejemplo de Servicios Ecosistémicos (SE).
Fuente: Dominati *et al.* (2010)

5.3. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos se clasifican en servicios de provisión, regulación, culturales y de sustento o soporte (Figura 3). Los servicios de provisión, regulación y culturales benefician de forma directa a las personas, mientras que los servicios de soporte son indispensables para el mantenimiento de los demás servicios (Galán *et al.*, 2012).



Figura 3. Clasificación de Servicios ecosistémicos.

5.3.1. Servicios ecosistémicos de provisión

Son bienes tangibles llamados recursos naturales o bienes. Proporcionan sustento básico a la vida humana. Se pueden intercambiar, negociar, consumir o utilizarlos directamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Servicios ecosistémicos de provisión y su importancia para el bienestar humano.

Servicio	Importancia para el bienestar humano	Tipo de ecosistema que brinda el servicio	Recursos ecosistémicos involucrados en el servicio	Actividades humanas involucradas en la obtención del servicio
Alimentos derivados de la agricultura		Campo agrícola	Productividad primaria: transformación de luz solar en tejido vegetal por medio de la fotosíntesis	Remoción de la cobertura vegetal, uso de insumos químicos, riego, maquinaria o sustitutos orgánicos, introducción de especies, selección o mejoramiento genético
Alimentos derivados de la ganadería	Sustento básico y recursos económicos	Pastizal, encierro, campo agrícola, matorrales, selvas y bosques	Productividad secundaria/terciaria: transferencia de energía desde los productores primarios hasta los niveles tróficos superiores.	Cría de ganado en pastizales y encierros o zonas con cobertura vegetal, suplementación alimenticia, introducción de especies, selección o mejoramiento genético
Alimentos derivados de la pesca		Océanos, ecosistemas costeros y		Extracción de productos marinos silvestres, manejo del ecosistema
Alimentos derivados de la acuicultura		Cuerpos de agua naturales y artificiales		Introducción de especies, construcción de estanques, establecimiento de granjas, suplementación alimenticia
Madera	Material de construcción y bienestar económico	Bosques y selvas	Productividad primaria	Extracción de individuos de talla y especies comerciales, manejo forestal
Leña	Fuente de energía	Bosques, selvas, matorrales, manglares, desiertos	Productividad primaria	Extracción
Recursos diversos	Usos múltiples (alimentos, medicinas, materiales de construcción), recursos económicos, importancia cultural (presente y futura)	Todos los ecosistemas	Mantenimiento de la biodiversidad y de las poblaciones de especies útiles	Extracción, manejo de especies, manejo de ecosistema
Agua (Cantidad)	Sustento básico, actividades productivas (agrícola, industria), funcionamiento de los ecosistemas.	Ecosistemas terrestres y acuáticos, continentales, océanos y atmósfera.	Interacción entre patrones climáticos, vegetación, suelo y procesos del ciclo hidrológico	Construcción de presas, sistema de riego/alcantarillado, manejo de cuencas.

Fuente: Balvanera y Cotler (2011).

Haines-Young y Potschin (2011) clasificaron los servicios ecosistémicos de provisión en tres clases: (1) nutrición: incluyen todos los recursos que son usados de manera directa o indirectamente para la alimentación, y

comprenden el agua potable, plantas y animales terrestres, acuáticos y marinos; (2) materiales: aquellos recursos tanto bióticos y abióticos que son usados para la manufactura de bienes. Dentro de los bióticos están las fibras de origen animal y vegetal, recursos ornamentales, genéticos y medicinales; los abióticos comprenden las sales, agregados, etc., excepto los activos del subsuelo (minerales); y (3) energéticos: correspondiente a fuentes renovables. biocombustibles renovables (leña, cultivos energéticos) y energía abiótica renovable (hídrica, eólica, solar, marea, termal), excepto activos del subsuelo como carbón y petróleo.

5.3.2. Servicios ecosistémicos de regulación

Son los procesos ecosistémicos que regulan las condiciones del ambiente. Es la forma en como los ecosistemas controlan y/o modifican los parámetros bióticos o abióticos del ambiente; y que aunque no proporcionan beneficios directos al ser humano si influyen en el medio en que realizan sus actividades (Cuadro 2).

Cuadro 2. Servicios ecosistémicos de regulación y su importancia para el bienestar humano.

Servicio	Importancia para el bienestar humano	Tipo de ecosistema que brinda el servicio	Recursos ecosistémicos involucrados en el servicio	Actividades humanas involucradas en la obtención del
Regulación de la biodiversidad	Regulación de los servicios ecosistémicos	Todos los ecosistemas	Interacciones biológicas entre organismos y con los componentes abióticos de los ecosistemas:	Mantenimiento de la biodiversidad, manejo de especies individuales, manejo de ecosistemas, introducción de especies
Regulación de plagas, enfermedades y polinización	Producción de alimentos Control biológico de organismos nocivos	Todos los ecosistemas	mutualismo (polinización), competencia, depredación, mantenimiento	
Regulación de la erosión	Mantenimiento del suelo y sus servicios de moderación del ciclo hidrológico, soporte físico para las plantas, retención y disponibilidad de nutrientes, procesamiento de desechos y materia orgánica, mantenimiento de la fertilidad del suelo y regulación de los ciclos de nutrientes.	Ecosistemas terrestres	Interacciones entre la vegetación y los macro y microorganismos del suelo, que mantienen a éste y sus funciones	Mantenimiento de biodiversidad del suelo, de cobertura vegetal y de procesos
Regulación del clima	Mantenimiento de las condiciones climáticas adecuadas para la vida humana, sus actividades productivas y la vida en general	Atmósfera y todos los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos	Interacciones entre la atmósfera y sus componentes, y con la tierra y su tipo de cobertura	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y conservación/ manejo de cobertura vegetal
Regulación de la calidad del aire	Regulación de concentraciones de contaminantes nocivos para la salud y para la visibilidad			
Regulación de la respuesta a eventos naturales extremos	Regulación de la respuesta de todos los sistemas naturales al embate de eventos naturales extremos y sus consecuencias sobre la población humana	Atmósfera y todos los ecosistemas terrestres	Interacciones entre los componentes físicos y bióticos de los ecosistemas y los patrones climáticos	Conservación/ manejo de ecosistemas terrestres

Fuente: Balvanera y Cotler (2011).

Los servicios ecosistémicos de regulación se agrupan en cuatro clases: (1) regulación y remediación de residuos, que surgen de manera natural o por la actividad humana. Incluyen procesos de bioremediación, dilución, filtración, secuestro y absorción; (2) regulación de flujo, incluye flujo de aire (rompevientos, barreras protectoras), agua (mitigación de escorrentías y tasas

de descarga, almacenamiento de agua, sedimentación, mitigación de la energía de olas), y flujo de masas (protección contra la erosión y avalanchas); (3) regulación del medio físico (clima local y global). Comprende la regulación atmosférica, de la calidad del agua, la calidad del suelo (fertilidad) y formación del suelo o pedogénesis (estructura); y, (4) regulación del medio biótico: mantenimiento del ciclo de la vida y protección del hábitat, control de plagas y enfermedades y protección del acervo genético (Haines y Potschin, 2011).

5.3.3. Servicios ecosistémicos culturales

Son los beneficios que el hombre percibe de los ecosistemas, los cuales pueden ser tangibles o intangibles y tienen un significado simbólico, cultural o intelectual (Cuadro 3).

Cuadro 3. Servicios ecosistémicos culturales y su importancia para el bienestar humano.

Servicios	Importancia para el bienestar humano	Tipo de ecosistema que brinda el servicio	Recursos ecosistémicos involucrados en el servicio	Actividades humanas involucradas en la obtención del servicio
Servicios culturales	Seguridad, belleza, espiritualidad, recreación cultural y social para las poblaciones	Todos los ecosistemas	Evolución a lo largo del tiempo y del espacio de la interacción entre los humanos y los ecosistemas	Mantenimiento de la biodiversidad y de los ecosistemas del país, mantenimiento del conocimiento y percepciones

Fuente: Balvanera y Cotler (2011).

Haines-Young y Potschin (2011) clasificaron los servicios ecosistémicos culturales en dos clases: (1) simbólico, que comprende la estética, el patrimonio y lo espiritual; (2) experiencia e intelectual: actividades recreativas y comunitarias; información y conocimientos. MEA (2005), reconoce como servicios culturales: la diversidad cultural, valores religiosos y espiritual, sistema de conocimiento (tradicional o formal), valor educacional, inspiración, valor escénico, relaciones sociales, sentido de pertenencia, valor de herencia cultural, recreación y ecoturismo.

5.3.4. Servicios ecosistémicos de soporte

Son los procesos y funciones que caracterizan a un ecosistema, funcionando como una estructura subyacente, siendo necesarios para la producción de los servicios de provisión, regulación y culturales. La diferencia entre este y los otros servicios es que los beneficios que el hombre obtiene son indirectos y generalmente a largo plazo.

Los servicios de soporte consideran: (1) formación de suelo, que dependen de la tasa de formación y de la fertilidad del suelo ya que influyen en el bienestar humano; (2) fotosíntesis, produce oxígeno necesario para la vida de los organismos; (3) ciclo de nutrientes, aproximadamente 20 nutrientes esenciales para la vida, incluyendo el nitrógeno y fosforo; y, (4) ciclo del agua, siendo esencial para la vida de los organismos (MEA, 2005).

Las características de cada ecosistema determina el tipo, la cantidad y calidad de bienes y servicios que proporciona (Balvanera *et al.*, 2009). Así como, los recursos involucrados y actividades humanas para su obtención representan una importancia ecológica, económica y social para el ser humano.

5.4. Enfoques de estudio de los servicios ecosistémicos

Los ecosistemas están en constante cambio ya sea por factores antropogénicos o naturales (MEA, 2005; Almeida *et al.*, 2007). Estos tienen la capacidad de recuperarse ante modificaciones o impactos que afectan negativamente sus condiciones y funcionamiento pero cuando se promueve algún servicio ecosistémico a costa o en detrimento de otros servicios, e incluso a costa del servicio ecosistémico mismo, se afecta la calidad del bienestar humano presente y futuro (Galán *et al.*, 2012).

En cada análisis que se realice es importante tomar en cuenta las escalas de tiempo (corto, mediano, largo plazo) y territorial (local, regional, global) para

conocer de qué manera influyen tanto factores directos (cambio de uso del suelo, cambio climático, sobreexplotación de recursos) e indirectos (demográficos, socioculturales, políticos) en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos (Figura 4).

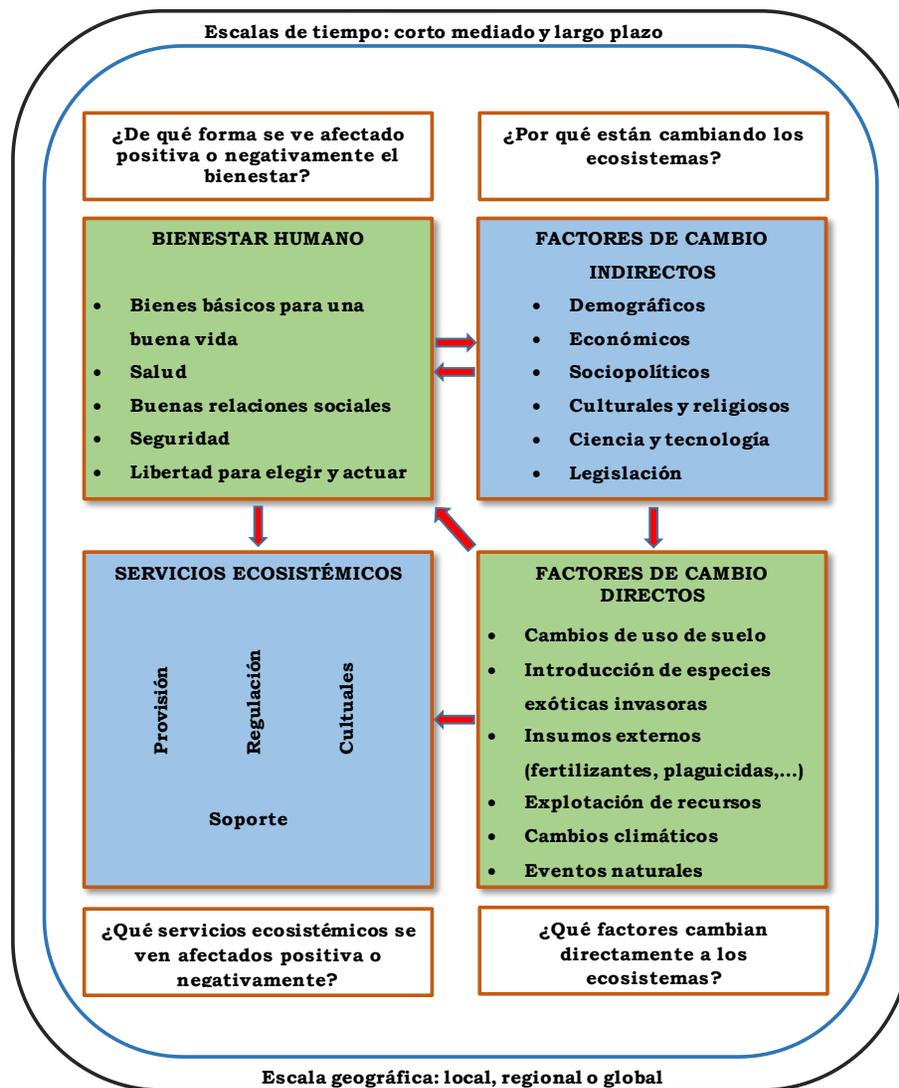


Figura 4. Interacciones entre servicios ecosistémicos, bienestar humano y factores de cambio.

Fuente: Galán *et al.* (2012).

Según Balvanera y Cotler (2007), para realizar un estudio de servicios ecosistémicos, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: a) búsqueda de marcos conceptuales y metodológicos inter o transdisciplinarios; b) análisis de

los distintos servicios que provee un ecosistema; c) valoración económica; y d) análisis de experiencias para mantenimiento de estos servicios. Quétier *et al.* (2007), proponen el análisis de cómo influyen los aspectos sociales y culturales en la percepción, valoración y apropiación de los servicios ecosistémicos.

Otro enfoque de análisis es el socioecosistema compuesto por tres subsistemas: biofísico (procesos naturales que permiten la provisión de bienes y servicios), económico-productivo (sistema económico y políticas públicas), y socio-político-cultural (estructura de poder, la organización social y la dinámica cultural), que interactúan en espacio y tiempo (Balvanera *et al.*, 2010).

Almeida *et al.* (2007), sugieren que para realizar un estudio de servicios ecosistémicos es necesario 1) un diagnóstico socioambiental; 2) identificar y evaluar los servicios ecosistémicos; 3) realizar entrevistas a los beneficiarios para conocer su percepción sobre los ecosistemas y los servicios que obtienen de ellos; y 4) identificar cuáles son los impulsores de cambios directos e indirectos que actúan sobre la presencia o ausencia de los mismos.

Otro enfoque es el uso de herramientas cartográficas que permiten identificar, caracterizar y valorar los bienes y servicios de los ecosistemas (Bagstad *et al.*, 2013a), e integra aspectos ecológicos, económicos y geográficos para usarse en el análisis espacial de los bienes y servicios del ecosistema (Bagstad *et al.*, 2013b).

5.5. Servicios ecosistémicos del agua

Los ecosistemas tienen la función de filtrar, retener y almacenar agua en esteros, lagos y/o acuíferos. La función de infiltración es realizada principalmente por la vegetación y biota del suelo. Las funciones de retención y almacenamiento están en función de la topografía del sitio y las características de subsuelo (De Groot *et al.*, 2002). La cobertura vegetal de las partes altas de

la cuenca juega un papel muy importante en la provisión y regulación de la calidad del agua (Galán *et al.*, 2012).

Los cambios de uso de suelo forestal a uso agrícola o ganadero o reemplazar la vegetación natural por especies exóticas de rápido crecimiento, afectan la producción y calidad del agua. La reducción de la cobertura del suelo provoca procesos erosivos, afecta la infiltración, retención y almacenamiento de agua. En el caso de reforestaciones con especies exóticas de rápido crecimiento, aunque reducen el riesgo de erosión, presenta una mayor demanda de agua y mayores tasas de evapotranspiración (Oyarzún *et al.*, 2005).

La cantidad de agua es un servicio de provisión; la calidad y la cantidad de agua en el tiempo son servicios de regulación; el ciclo hidrológico es un servicio de sustento. La presencia de estos servicios está en función de la precipitación, balance de agua, características topográficas, suelo y subsuelo, vegetación y uso de suelo (Balvanera *et al.*, 2009).

Los beneficios directos que la sociedad obtiene de la provisión de agua son para consumo humano, uso agrícola, ganadero e industrial (Figura 5). De manera indirecta el ciclo del agua influye en la producción y permanencia de otros servicios.

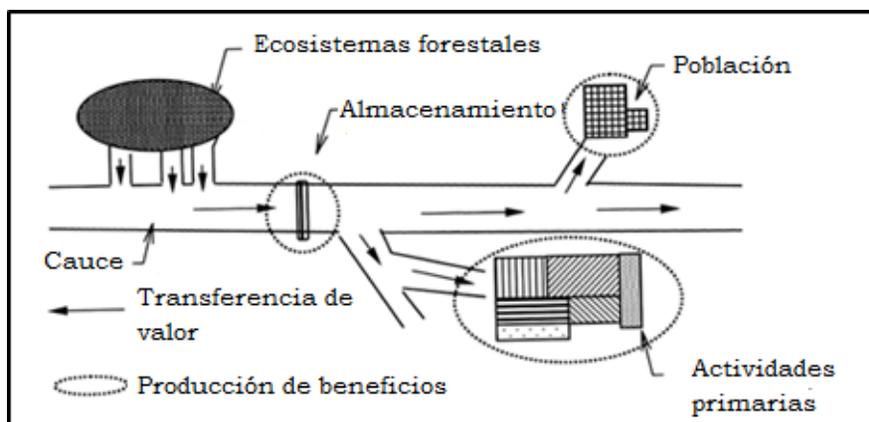


Figura 5. Análisis de los beneficios del flujo de agua de un ecosistema.

Fuente: Guo *et al.*, (2000).

5.6. El suelo como capital natural

El suelo como capital natural se define como la reserva de bienes que producen un flujo de otros recursos naturales o servicios ecosistémicos, y lo conforman su estructura, composición y diversidad. Aunque los servicios ecosistémicos que proporciona no benefician de manera directa al hombre, si son la base fundamental para el desarrollo de los ecosistemas y por lo tanto, en la provisión de bienes y servicios (Dominati *et al.*, 2010).

En el suelo se llevan a cabo procesos de formación y degradación e influyen factores como material parental, clima, vegetación, topografía, tiempo y hombre. Los procesos de formación comprenden: el ciclo de nutrientes, ciclo del agua y actividad biológica; permitiendo que se lleven a cabo procesos físicos, químicos y bióticos en el suelo. Los procesos de degradación, generalmente conlleva a una pérdida de servicios ecosistémicos y pueden ser físicos, químicos y biológicos.

La degradación física se refiere a la pérdida de estructura, reduciendo la infiltración y drenaje e incrementando el escurrimiento superficial; por ejemplo, la erosión del suelo por gravedad, agua, hielo o viento, sellamiento, encostramiento superficial y compactación. La degradación química, causa desequilibrios químicos en el suelo, como: salinización, pérdida de nutrientes, acidificación y toxicidad de suelos. La degradación biológica se refiere a la pérdida de biodiversidad, materia orgánica y carbono orgánico (Dominati *et al.*, 2010).

El uso de suelo es un componente muy importante para determinar la relación entre reserva del capital natural del suelo, servicios ecosistémicos y bienestar humano.

1.6.1 Servicios ecosistémicos del suelo

Los suelos proveen servicios de provisión, regulación y culturales (Figura 6). Los servicios de provisión del suelo son: soporte físico tanto para animales, plantas, humanos e infraestructura, alimentos, madera, fibras, medicinas, energéticos y materias primas. Los servicios de regulación del suelo son: a) mantenimiento del ciclo hidrológico y mitigación de inundaciones a través de la porosidad del suelo y los procesos de infiltración y drenaje; b) retención y oferta de nutrientes ya que el suelo tiene la capacidad de absorber y retener solutos que evitan la contaminación del agua subterránea o superficial y ofrecer nutrientes a las plantas; c) control biológico de plagas y enfermedades en función de las propiedades del suelo como humedad y temperatura, así como, los procesos biológicos que establecen las relaciones inter e intraespecíficas; d) reciclado de residuos y desintoxicación, influyen procesos de mineralización e inmovilización para eliminar residuos y contaminantes del suelo; y e) captura de carbono y regularización de emisiones de óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄), está en función de las reservas de materia orgánica y las propiedades del suelo, como humedad y temperatura que regulan la actividad biológica del suelo (Balvanera *et al.*, 2009; Dominati *et al.*, 2010). Finalmente, servicios culturales, como: experiencias estéticas, usos y costumbres, enriquecimiento espiritual (deidades y creencias religiosas), y recreación.

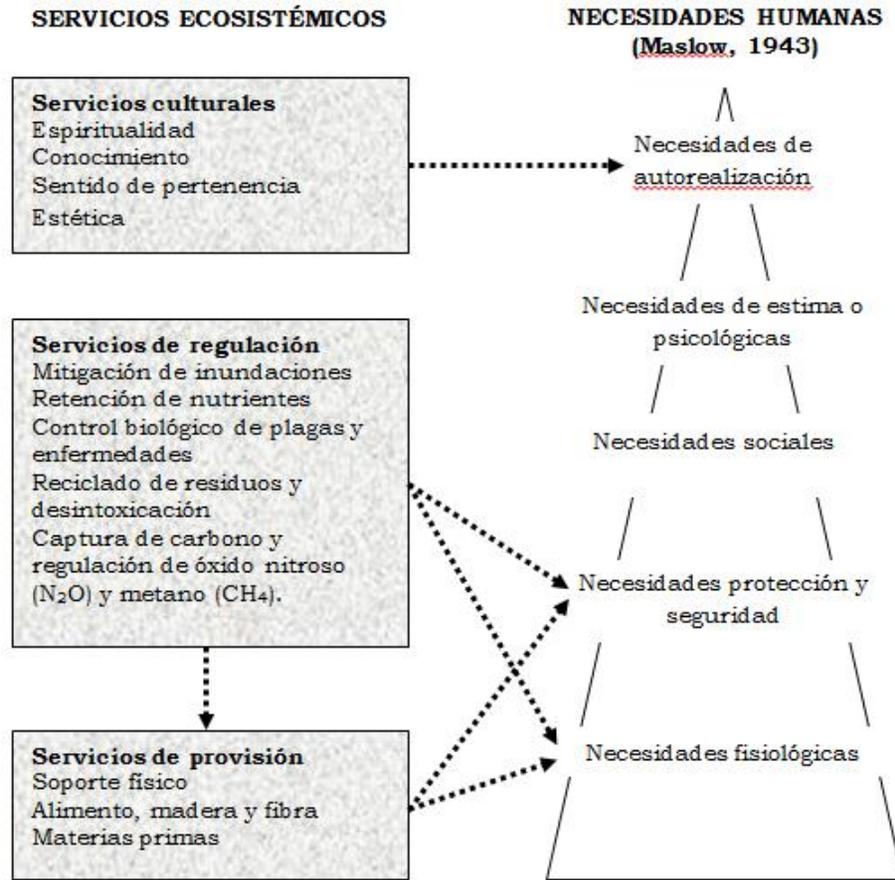


Figura 6. Servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo.
Fuente: Dominati *et al.* (2010).

5.7. Esgurrimiento y producción de sedimentos

Erosión del suelo se define como el proceso de desagregación, remoción, transporte y depósito de materiales del suelo por agentes erosivos y está en función de las propiedades del suelo, topografía, cobertura del suelo y actividades humanas. Genera impactos ambientales y económicos, ya que afecta de manera directa su calidad y su capacidad para productividad de biomasa. Al ser un tema de importancia mundial, se han desarrollado diversos modelos para estimar la erosión del suelo que permitan tomar decisiones en cuanto a las prácticas de conservación de suelo y agua.

Los modelos que se han desarrollado se clasifican en empíricos, conceptuales y físicos, en función a la información requerida, exactitud y validación del

modelo, componentes del modelo y objetivos del usuario del modelo. Algunos modelos para estimar la erosión y transporte de sedimentos son: la *Universal Soil Loss Equation* (USLE), *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM), MIKE-11 software desarrollado por *Danish Hydrologic Institute* (DHI), *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB), *Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model* (CREAMS), *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation* (ANSWERS), entre otros (Merritt *et al.*, 2003). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada y Modificada (RUSLE y MUSLE, por sus siglas en inglés) son modelos derivados de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo que permiten estimar la erosión promedio anual en función a la energía de la lluvia (factor de erosividad) y en el caso de MUSLE este factor se reemplaza por un factor de escurrimiento que considera la humedad antecedente en el suelo, permitiendo una mejor estimación en la producción de sedimentos, por evento de lluvia (Zhang *et al.*, 2009). La producción de sedimentos se puede estimar con el modelo MUSLE (Ecuación 1) (Williams, 1975):

$$Y = 11.8 \times (Q \times q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad 1$$

Dónde: Y: son los sedimentos aportados a la salida de la cuenca por un evento ($t \text{ ha}^{-1} \text{ evento}^{-1}$); Q es el escurrimiento medio (m^3), q_p el escurrimiento máximo ($m^3 \text{ s}^{-1}$), K el Factor de erosionabilidad del suelo ($t \text{ ha hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), LS el Factor de longitud y grado de pendiente (adimensional), C el Factor de manejo de cultivos (adimensional) y P el Factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

5.7.1. Curvas numéricas

Para determinar el escurrimiento medio se empleó el método de curvas numéricas del *Soil Conservation Service* (SCS, actualmente *Natural Resources Conservation Service*, NRCS) y publicado en *National Engineering Handbook*

Section 4: Hydrology (NEH-4) (Mockus, 1964). El escurrimiento por evento se estima en función de la precipitación por evento y la retención máxima potencial de agua en el suelo, Ecuación 2.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad 2$$

Dónde: Q es el escurrimiento medio por evento (mm), P la precipitación por evento (mm) y S la retención máxima potencial (mm). Si $0.2S \leq P$ entonces $Q > 0$, de lo contrario $Q = 0$.

La retención máxima potencial (S) se refiere a la infiltración que ocurre antes que inicie el escurrimiento, regulada por la tasa de infiltración, la tasa de transmisión en el perfil del suelo o la capacidad de almacenamiento de agua (Williams, 1975). Se obtiene a partir de datos de las curvas numéricas (CN) (Ecuación 3).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 3$$

Las curvas numéricas están en función del grupo hidrológico del suelo, tipo y uso del suelo, prácticas de manejo, condición hidrológica y humedad antecedente. Se usan para determinar el escurrimiento directo. El grupo hidrológico de suelo, indica la tasa mínima de infiltración obtenida por un suelo desnudo húmedo (NRCS, 1986) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Grupos hidrológicos de suelo.

Grupo	Textura	Descripción	Infiltración inicial (mm hr ⁻¹)	Infiltración final (mm hr ⁻¹)
A	Arena, arena arcillosa, o franco arenosa	Suelos con bajo potencial de escurrimiento y altas tasas de infiltración. Contienen gran cantidad de arenas y poco limo y arcilla.	190.5	7.6 -11.4
B	Franco limoso o franco	Presentan un potencial de escurrimiento moderadamente bajo. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A	114.3	3.8 – 7.6
C	Franco arcillo arenosa	Suelos con potencial de escurrimiento moderadamente alto. Son suelos someros y con considerable contenido de arcilla	76.2	1.3 – 3.8
D	Franco arcillosa, franco arcillo limosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, y arcillosa	Presentan un alto potencial de escurrimiento. suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados	38.1	0 – 1.3

Fuente: NOAA (2012); Eslamian (2014).

La condición hidrológica para los usos del suelo depende de la densidad y altura del dosel de la vegetación, porcentaje de cobertura durante todo el año, cantidad de vegetación herbácea, porcentaje del suelo cubierta con residuos y el grado de compactación de la superficie que afectan la infiltración y el escurrimiento (Cuadro 5).

Cuadro 5. Condición hidrológica para diversos usos de suelo.

Condición de la vegetación	Condición hidrológica
Tierras de cultivo	
Monocultivos. 5 – 20% de la superficie está cubierta con residuos	Mala
Buena rotación de cultivos. Mayor al 20% de la superficie está cubierta con residuos	Buena
Pastos naturales	
Fuertemente pastoreados, sin mantillo o con una cobertura vegetal menor al 5% de la superficie.	Mala
Moderadamente pastoreados, cobertura vegetal entre el 5-75% de la superficie.	Regular
Ligeramente pastoreados, cobertura vegetal mayor del 75% de la superficie.	Buena
Bosques	
Fuertemente pastoreados y quemados. Árboles pequeños y dispersos, sin vegetación herbácea.	Mala
Pastoreados, pero no quemados. Poca vegetación herbácea, y árboles no protegidos	Regular
Protegidos del pastoreo. Vegetación herbácea y arbustiva	Buena

Fuente: NRCS (1986).

Los valores de CN para la condición de humedad II, se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Curvas numéricas (CN_{II}) por grupo hidrológico del suelo, tipo de cobertura, prácticas de manejo y condición hidrológica.

Tipo de cobertura	Prácticas de manejo	Condición hidrológica	CN _{II} por grupo hidrológico del suelo				
			A	B	C	D	
Barbecho	Suelo desnudo		77	86	91	94	
	Residuos de cosecha (RC)	Mala	76	85	90	93	
		Buena	74	83	88	90	
Cultivos en hilera							
	Surcos rectos (SR)	Mala	72	81	88	91	
		Buena	67	78	85	89	
	SR + RC	Mala	71	80	87	90	
		Buena	64	75	82	85	
	Surcado al Contorno (SC)	Mala	70	79	84	88	
		Buena	65	75	82	86	
	SC + RC	Mala	69	78	83	87	
		Buena	64	74	81	85	
	Surcado al contorno y terrazas (SC y T)	Mala	66	74	80	82	
		Buena	62	71	78	81	
	SC y T + RC	Mala	65	73	79	81	
		Buena	61	70	77	80	
Granos pequeños							
	SR	Mala	65	76	84	88	
		Buena	63	75	83	87	
	SR + RC	Mala	64	75	83	86	
		Buena	60	72	80	84	
	SC	Mala	63	74	82	85	
		Buena	61	73	81	84	
	SC + RC	Mala	62	73	81	84	
		Buena	60	72	80	83	
	SC y T	Mala	61	72	79	82	
		Buena	59	70	78	81	
	SC y T + RC	Mala	60	71	78	81	
		Buena	58	69	77	80	
Cultivos tupidos o rotación de pradera							
	SR	Mala	66	77	85	89	
		Buena	58	72	81	85	
	SC	Mala	64	75	83	85	
		Buena	55	69	78	83	
	SC y T	Mala	63	73	80	83	
		Buena	51	67	76	80	
Pasto, praderas o forrajes para continuo pastoreo							
		Mala	68	79	86	89	
		Regular	49	69	79	84	
		Buena	39	61	74	80	
Praderas, protegidas del pastoreo y generalmente producción de heno			Buena	30	58	71	78
Mezcla de pastos y herbáceas con predominancia de herbáceas							
		Mala	48	67	77	83	
		Regular	35	56	70	77	
		Buena	30	48	65	73	
Combinación de pastos y árboles (huertos o granjas)							
		Mala	57	73	82	86	
		Regular	43	65	76	82	
		Buena	32	58	72	79	
Bosques							
		Mala	45	66	77	83	
		Regular	36	60	73	79	
		Buena	30	55	70	77	
Granjas - edificios, caminos de entrada			59	74	82	86	
Carreteras (incluyendo derecho de vía):							
Tierra			72	82	87	89	
Terracería			79	85	89	91	

Fuente: NRCS (1986).

La condición de humedad antecedente, al presentarse un evento causa variación en las curvas numéricas (CN) ya que el escurrimiento aumenta a mayor contenido humedad del suelo. Por esta razón, se considera en tres grupos la condición de humedad del suelo para los 5 días previos a la lluvia (Cuadro 7):

Cuadro 7. Condición de humedad en función de la precipitación.

Condición de humedad antecedente	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)	
	Estación de dormancia	Estación de crecimiento
I	< 12.7	< 35.6
II	12.7 – 38.1	35.6 – 53.3
III	38.1	> 53.3

Fuente: Boughton (1989); Silveira *et al.* (2000); Mishra *et al.* (2008).

El valor de CN seleccionado del Cuadro 6 corresponde a la condición de humedad antecedente intermedia (II), por tal razón, se deben considerar los datos de precipitación de los cinco días previos al evento. Si la precipitación en los 5 días previos al evento es menor de 12.7 mm, la condición de humedad antecedente es seca (I), se aplica la Ecuación 4 para obtener la CN_I ; cuando la precipitación es mayor de 38 mm, la condición de humedad antecedente es húmeda (CN_{III}) y se utiliza la Ecuación 5.

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20(100 - CN_{II})}{(100 - CN_{II} + \exp[2.533 - 0.063(100 - CN_{II})])} \quad 4$$

$$CN_{III} = CN_{II} \exp[0.00673(100 - CN_{II})] \quad 5$$

Para determinar el escurrimiento máximo se aplica el método racional, que considera los coeficientes de escurrimiento superficial, intensidad de la lluvia y el área de la cuenca (Ecuación 6).

$$q_p = \frac{C * I * A}{360} \quad 6$$

Dónde: q_p es el gasto pico o gasto máximo instantáneo ($m^3 s^{-1}$), C el coeficiente de escurrimiento superficial (adimensional), I la intensidad de la lluvia ($mm h^{-1}$) y A el área de drenaje (ha).

El coeficiente de escurrimiento por evento se determina mediante la relación entre el escurrimiento medio y precipitación en mm ($C=Q/P$); la intensidad de la precipitación ($mm h^{-1}$) se calcula con la relación entre precipitación (mm) y tiempo de concentración del escurrimiento (h) ($I=P/T_c$). El tiempo de concentración es el tiempo que tarda el exceso de agua para moverse desde el punto más distante de la cuenca hacia la salida y se calcula en función de la longitud del cauce principal y su desnivel (Ecuación 7).

$$T_c = 0.02 \frac{L^{1.15}}{H^{0.38}} \quad 7$$

Dónde: T_c el tiempo de concentración (minutos); L la longitud del cauce principal (m) y H el desnivel del cauce principal (m).

5.7.2. Factor de Erosionabilidad del suelo (K)

El factor de erosionabilidad del suelo (K) representa la susceptibilidad del suelo a erosionarse. Suelos con textura fina, con alto contenido de arcilla presentan valores de K bajos entre 0.002 - 0.019; suelos con textura gruesa, como arenosos, presentan valores entre 0.006 - 0.026 que, aunque se desprenden con facilidad, son suelos con buen drenaje. Suelos con textura media como franco-limosos, presentan valores de K moderados de 0.032 a 0.052, produciendo escurrimientos moderados. Suelos con alto contenido de limo son los más erosionables, suelos fácilmente desprendibles y tienden a producir grandes cantidades y tasas de escurrimiento. Presentan valores mayores a 0.052 (NRCS, 2016).

El uso del nomograma (Figura 7) permite determinar el valor de K a partir de cinco parámetros de suelo: (1) % de limos + arenas muy finas, (2) % de arenas, (3) % de materia orgánica, (4) código de estructura (Cuadro 8) y (5) códigos de permeabilidad del suelo (Cuadro 9).

Cuadro 8. Códigos de estructura para definir el factor K.

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

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

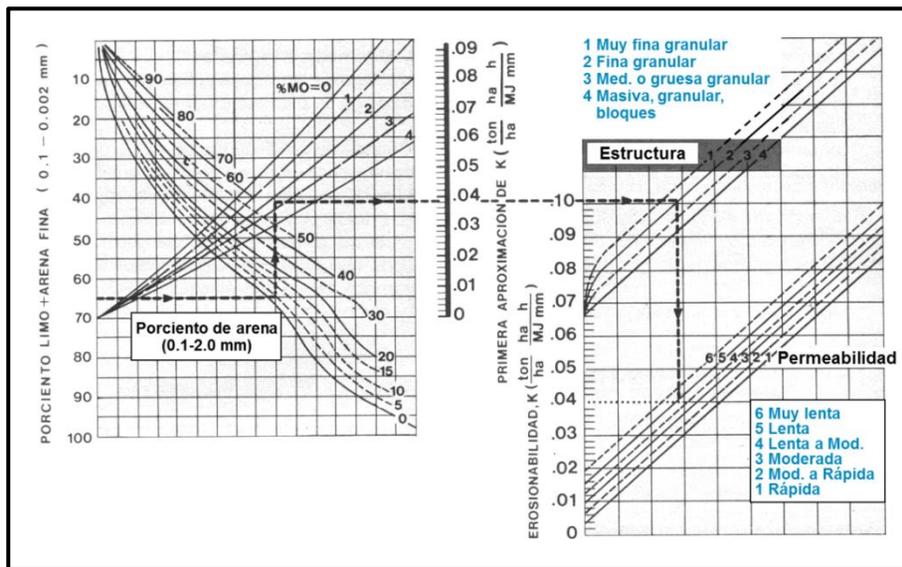


Figura 7. Nomograma para determinar el factor K.

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

Cuadro 9. Códigos de permeabilidad para estimar el factor K.

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

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

Los valores de: % de limo + arenas muy finas; % de arenas; % de materia orgánica; y estructura son valores promedio para los 30 cm superiores. El código de permeabilidad se refiere a todo el perfil, sin embargo, es suficiente con conocer su valor en los primeros 30 cm del suelo, dado que es en esta zona incide directamente el efecto de la erosión hídrica.

De manera alternativa, se puede utilizar la Ecuación 8 para determinar el valor de K (Wischmeier y Smith, 1978).

$$K = \left[0.1317 \left[\frac{(0.00021 * M^{1.14} * (12 - a)) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} \right] \right] \quad 8$$

Dónde: M es (% de limo + arena muy fina)*(100 - % de arcilla); a es el % de materia orgánica, b es la clave de la estructura y c el código de permeabilidad.

Cuando no se cuenta con la información suficiente para obtener el valor de K con el nomograma, se determinan con a la textura del suelo y contenido de materia orgánica (Cuadro 10) (Kirkby y Morgan, 1980) o con el método de la FAO (1980), que considera la textura y la unidad de suelos, según la clasificación FAO/UNESCO (Cuadro 11).

Cuadro 10. Factor de erosionabilidad del suelo, K (t ha hr ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹).

Textura	Contenido de materia orgánica		
	<0.5%	2%	4%
	K	K	K
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.021	0.018	0.013
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Areno arcillosa	0.016	0.013	0.011
Areno fino arcillosa	0.032	0.026	0.021
Areno muy fino arcillosa	0.058	0.050	0.040
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenosa fina	0.046	0.040	0.032
Franco arenosa muy fina	0.062	0.054	0.043
Franco	0.050	0.045	0.038
Franco limosa	0.063	0.055	0.043
Limo	0.079	0.069	0.055
Franco arcillo arenosa	0.036	0.033	0.028
Franco arcillosa	0.037	0.033	0.028
Franco arcillo limosa	0.049	0.042	0.034
Arcillo arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcillo limosa	0.033	0.030	0.025
Arcilla	-----	0.017-0.038	-----

Fuente: Kirkby y Morgan (1980).

Cuadro 11. Valores de “K” (t ha hr ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹) para ordenes de suelos propuestos por FAO (1980)

ORDEN	TEXTURA			ORDEN	TEXTURA		
	G	M	F		G	M	F
A. Acrisol	0.026	0.040	0.013	M Molisol	0.026	0.040	0.013
Af. Ah	0.013	0.020	0.007	Mta, Mg	0.026	0.040	0.013
Ag. Ao	0.026	0.040	0.013	N Nitosol	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	Nd, Ne, Nh	0.013	0.020	0.007
B cambisol	0.026	0.040	0.013	O Histosol	0.013	0.020	0.007
Bf. Bh	0.013	0.020	0.007	Od, Oe, Ox	0.013	0.020	0.007
Bc. Bd. Be.	0.026	0.040	0.013	P Podzol	0.053	0.079	0.026
Bv. Bx.	0.053	0.079	0.026	Ph, Ol	0.026	0.040	0.013
C chermozen	0.013	0.020	0.007	Pf, Pg, Po, Pp	0.053	0.079	0.026
Cg. Ch. ck	0.013	0.020	0.007	Q Arenosol	0.013	0.020	0.007
D Podzoluvisol	0.053	0.079	0.026	Qa, Qc, Qf,	0.013	0.020	0.007
Dd. De. Dg	0.053	0.079	0.026	R Regosol	0.026	0.040	0.013
E. Rendzina	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
F Ferrasol	0.013	0.020	0.007	Re, Rd	0.026	0.040	0.013
F (a,h,o,p,r,x)	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
G Gieysol	0.026	0.040	0.013	S solonetz	0.053	0.079	0.026
Gc, Gh, Cm	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd, Ge	0.026	0.040	0.013	Sg, So	0.053	0.079	0.026
Gp, Gx, Gv	0.053	0.079	0.026	T Andosol	0.026	0.040	0.013
H Feozem	0.013	0.020	0.007	Th, Tm	0.013	0.020	0.007
Hc, Hg, Hh, Hl	0.013	0.020	0.007	To, Tv	0.026	0.040	0.013
I Litosol	0.013	0.020	0.007	U Ranker	0.013	0.020	0.007
J Fluvisol	0.026	0.040	0.013	V vertisol	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	W planosol	0.053	0.079	0.026
Jd, Je	0.026	0.040	0.013	Wh Wm	0.026	0.040	0.013
Jp, Jt	0.053	0.079	0.026	Wd, We, Ws,	0.053	0.079	0.026
K Castañozem	0.026	0.040	0.013	X Xerosol	0.053	0.079	0.026
Kh, KK, Kl	0.026	0.040	0.013	Xh, Xk, Xt,	0.053	0.079	0.026
L Luvisol	0.026	0.040	0.013	Y Yermosol	0.053	0.079	0.026
Lf	0.013	0.020	0.007	Yh, Yk, Yy, Yt	0.053	0.079	0.026
Lc, Lg, Lk, Lo	0.026	0.040	0.013	Z Solonchak	0.026	0.040	0.013
La, Lp, Lv	0.053	0.079	0.026	Zm	0.013	0.020	0.007
				Ag, Zo	0.053	0.040	0.013
				Zt	0.053	0.079	0.026

La textura se clasifica como G=gruesa, M=media y F=fina, f=férrico, g=gléyico, h=húmico, o=órtico, p=plíntico, c=crómico, d=districo, e=eútrico, k=cálcico, v=vértico, x=gélico, m=mólico, p=plíntico, t=tiónico, a=álbico

5.7.3. Factor Topográfico (LS)

El factor LS o topográfico, expresa la relación entre la pérdida de suelo en una ladera de pendiente y longitud dados. Un valor LS=1 ocurre en condiciones tipo de 9% de pendiente y 22.1 m de longitud (Morgan, 1997). Este factor muestra que la erosión aumenta conforme la longitud de la pendiente del terreno en el sentido de la pendiente y la inclinación de la superficie se hace mayor. El factor L lo define la Ecuación 9 (Figueroa *et al.*, 1991).

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad 9$$

Dónde: L es el factor longitud de la pendiente (adimensional), λ : longitud de la pendiente en metros, 22.1 es el valor del tamaño estándar de un lote experimental y m es un exponente.

Wischmeier y Smith (1978, citado por Kirkby y Morgan, 1980) recomienda los siguientes valores de m:

m=0.5 si la pendiente es $\geq 5\%$

m=0.4 si la pendiente es $< 5\%$ y $> 3\%$

m=0.3 si la pendiente es $\leq 3\%$ y $\geq 1\%$

m=0.2 si la pendiente es $< 1\%$

El factor S, indica el grado de inclinación de la pendiente. McCool *et al.* (1987, Citado por Renard *et al.*, 1997), menciona que la pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con el grado de inclinación de la pendiente que con la longitud de la pendiente.

Para pendientes menores de 9% (Ecuación 10).

$$S = 13.8 \text{ sen } \theta + 0.03 \quad 10$$

Para pendientes iguales o mayores de 9% (Ecuación 11).

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta - 0.50 \quad 11$$

Para pendientes con una longitud menor de 4.5 m (Ecuación 12).

$$S = 3.0 (\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56 \quad 12$$

Dónde: θ es el ángulo de la pendiente.

El factor topográfico LS también se puede determinar mediante el nomograma (Figura 8) propuesto por Wischmeier y Smith (1978, citado por Kirkby y Morgan, 1980).

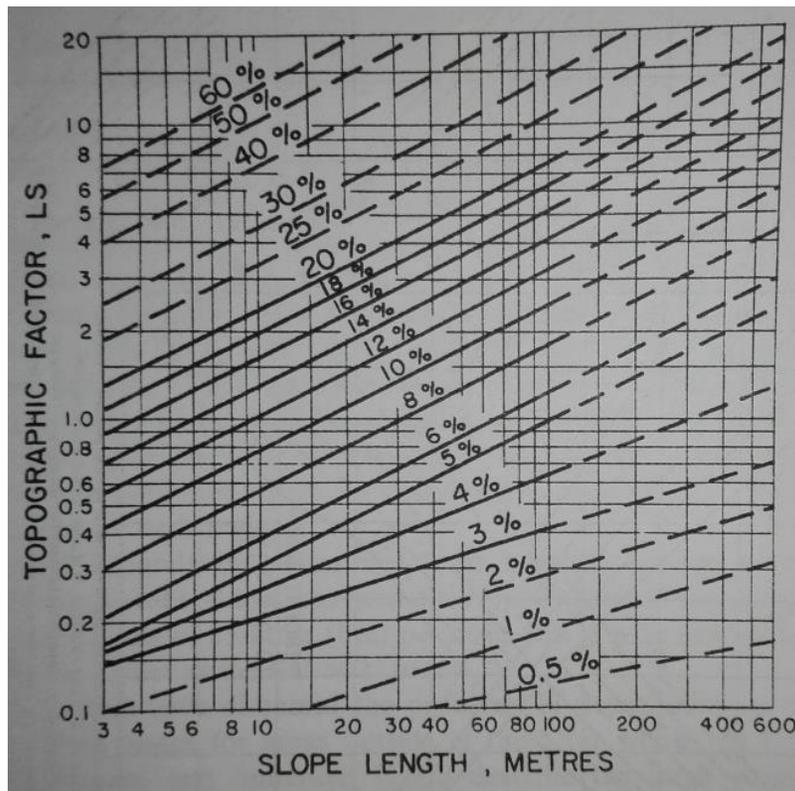


Figura 8. Nomograma para el factor topográfico, LS.
Fuente: Wischmeier y Smith (1978), citado por Kirkby y Morgan (1980).

5.7.4. Factor de cobertura "C"

Representa la relación de la pérdida de suelo de un cultivo específico o condición de cobertura y la que se produce en el suelo desnudo (Morgan,

1997). Considera la cobertura, secuencia de cultivo, nivel de productividad, etapa de desarrollo, prácticas culturales, manejo de residuos y distribución de la lluvia (Kirkby y Morgan, 1980). Con fines prácticos diversos autores sugieren el uso de valores de C ya establecidos (Cuadro 12).

Cuadro 12. Valores del factor cobertura, C.

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de Mulch	0.001
Sabana o pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbácea sobrepastoreada	0.1
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.20-0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.50-0.90
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02-0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12-0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30-0.45
Algodón	0.40-0.70
Pradera herbácea	0.01-0.025
Soja	0.20-0.50
Trigo	0.10-0.40
Arroz	0.10-0.20
Cacahuate	0.30-0.80
Palmera, cafeto, cocotero, con cobertura vegetal	0.10-0.30
Piña cultivada a nivel, con retiro de residuos	0.10-0.40
Piña cultivada a nivel, con residuos en superficie	0.01
Papa, surcos según la pendiente	0.20-0.50
Papa, surcos transversales a la pendiente	0.10-0.40
Caupí (judía de vaca)	0.30-0.40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.27
Granada con cobertura de malas hierbas	0.08
Granada limpia de malas hierbas	0.56
Tef (<i>Eragrostis tef</i>)	0.25
Caña de azúcar	0.13-0.40
Ñame	0.40-0.50
Guisante de Angola	0.60-0.70
Judía mungo	0.04
Pimiento	0.33
Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano: después de su establecimiento	0.05-0.10
Papaya	0.21

Fuente: Kirkby y Morgan 1980; Morgan 1997.

Figuerola *et al.* (1991), presenta algunos aspectos a considerar con respecto al factor “C” de acuerdo a la cobertura vegetal (Cuadro 13 y Cuadro 14). Los valores de C para cultivos consideran el tipo de cultivo y las técnicas de producción utilizadas, su estado fenológico y cobertura en el periodo de mayor erosividad de la lluvia, aunque para fines prácticos generalmente se utiliza un promedio anual del valor de C.

Para pastizales, agostaderos y terrenos en descanso, en la determinación del factor C, se considera tipo, altura y densidad de la cubierta vegetal; tipo y densidad de la cobertura en la superficie del suelo.

En los bosques no perturbados la capacidad de infiltración y contenido de materia orgánica y mantillo son altos; protegiendo al suelo de las fuerzas erosivas del escurrimiento y las gotas de lluvia, garantizando la protección del suelo en todo el año y principalmente en la época de lluvia cuando se presentan los eventos con mayor potencial erosivo.

Cuadro 13. Factor de cobertura vegetal (C), para pastizales, agostaderos y terrenos en descanso.

Cobertura aérea		Cobertura en contacto con la superficie del suelo						
Tipo y altura	% de cobertura	Tipo*	0	20	40	60	80	95
Cobertura no apreciable		P	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		M	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Malezas altas o arbustos con altura promedio de caída de gotas de 50 cm	25	P	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		M	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	P	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		M	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	P	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		M	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Arbustos numerosos con alturas promedio de caída de gotas de 2 m	25	P	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		M	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	P	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		M	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	P	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		M	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Arboles sin arbustos, promedio de caída de gotas de 4 m	25	P	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		M	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	P	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		M	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	P	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		M	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

*P=Pastos, M=Malezas. Fuente: Figueroa *et al.* (1991).

Cuadro 14. Factor C para terrenos forestales sin disturbios.

Porcentaje del área cubierta por follaje de los árboles y arbustos	Porcentaje del área cubierta por mantillo de más de 5 cm de espesor	Factor C
100-75	100-90	0.0001-0.001
70-45	85-75	0.002-0.004
40-20	70-40	0.003-0.009

Fuente: Figueroa *et al.* (1991).

5.7.5. Factor de prácticas de control de erosión "P"

Relaciona las pérdidas de suelo en parcelas donde se aplican prácticas de conservación con las pérdidas de suelo producidas sin ellas; sin prácticas el valor de P=1 (Figueroa *et al.*, 1991; Morgan, 1997). Estas prácticas modifican los patrones de drenaje, grado o dirección de los escurrimientos superficiales y

reducen la cantidad y tasa de escurrimiento (Renard *et al.*, 1997); pueden ser: surcado al contorno, cultivo en fajas al contorno y sistema de terrazas (Cuadro 15) (Kirkby y Morgan, 1980).

Cuadro 15. Valor de “P” para prácticas de conservación.

Pendiente (%)	Surcado al contorno	Cultivo en fajas al contorno	Terrazas
1-2	0.60	0.30	0.12
3-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith (1978); Kirkby y Morgan (1980).

Las terrazas reducen la erosión laminar y en canalillos, ya que divide la longitud de la pendiente que favorecen el depósito de los sedimentos a lo largo y ancho de la terraza, y reducen la velocidad de los escurrimientos superficiales. En caso de utilizarlas combinadas con otras prácticas, como surcado o fajas al contorno, el factor de P se multiplica por los valores de los otros factores (Figueroa *et al.*, 1991). En el Cuadro 16 se muestran los valores de P para terrazas.

Cuadro 16. Factor de P para terrazas.

Intervalo horizontal	Extremos cerrados	Valores del factor P para terrazas con desagües y pendiente de:		
		0.1-0.3	0.4-0.7	>0.8
<30	0.5	0.6	0.7	1.0
30-45	0.6	0.7	0.8	1.0
45-55	0.7	0.8	0.9	1.0
55-70	0.8	0.8	0.9	1.0
70-90	0.9	0.9	1.0	1.0
>90	1.0	1.0	1.0	1.0

Fuente: Figueroa *et al.* (1991).

5.8. Producción de leña

La leña, el carbón y los residuos de cosecha se consideran biocombustibles sólidos y representan, además, una fuente de energía renovable ampliamente

disponible, que no compite con la madera comercial ni con los productos forestales no maderables. Su uso adecuado contribuye a disminuir la emisión de CO₂ por la quema de combustibles fósiles; además, al extraer material vegetal seco se reducen los riesgos de incendios forestales (Balvanera *et al.*, 2009).

La leña es un combustible tradicional, principalmente en comunidades rurales, algunos estudios sobre su disponibilidad se han realizado a partir de un inventario forestal, calculando el volumen disponible para extracción, en función de las especies susceptibles de este aprovechamiento (Contreras *et al.*, 2003); complementándolo con la aplicación de entrevistas para conocer las características socioeconómicas y culturales de la dinámica de uso, extracción y preferencia (Quiroz y Orellana, 2010; Santos *et al.*, 2012).

En países en desarrollo, como México, la leña satisface en promedio el 15% del consumo de energía primaria y se usa principalmente para: cocinar, calefacción y calentar agua (Ghilardi *et al.*, 2007). Los ecosistemas mexicanos proveen combustibles para satisfacer 46% de la demanda energética residencial y 80% de la demanda energética del sector rural (Balvanera *et al.*, 2009). La información relacionada con la demanda de leña es escasa y poco confiable, ya que su suministro por parte de usuarios, es de auto abasto y su consumo muy variable en función de las condiciones climáticas, la eficiencia de las especies usadas y el uso mixto de combustibles.

Ghilardi *et al.* (2007) reportan la productividad estimada de leña por clase de cobertura (Cuadro 17); los tipos de cobertura que producen más leña son: manglares, bosque tropical, bosque de coníferas y latifoliadas.

Cuadro 17. Productividad estimada de leña por clase de cobertura.

Clase de cobertura	Incremento de leña (t ha ⁻¹ año ⁻¹) ^a	Rango ^b
Bosque primario tropical perenne	3.1	1.1-5.1
Bosque secundario tropical perenne	2.8	0.7-4.9
Bosque primario tropical deciduo	1.5	1.2-1.8
Bosque secundario tropical deciduo	1.2	0.6-1.8
Bosque primario de coníferas	2.1	0.6-3.6
Bosque primario de coníferas y latifoliadas	2.4	0.7-4.1
Bosque primario de latifoliadas	2.6	0.8-4.4
Bosque secundario de coníferas	1.7	0.5-2.9
Bosque secundario de coníferas y latifoliadas	2.0	0.6-3.4
Bosque secundario de latifoliadas	2.3	0.7-3.9
Matorral primario	1.6	1.0-2.2
Matorral secundario	1.3	0.7-2.0
Manglares	5.1	3.4-6.8
Agricultura/pastizales ^c	0.8	0.0-1.5

Fuente: Ghilardi, Guerrero, y Masera 2007

a. Biomasa leñosa por encima del suelo en peso seco.

b. Basado en valores máximos y mínimos reportados en la literatura.

c. Fuentes no forestales de biomasa leñosa (coberturas antrópicas). Tierras agrícolas y pastizales.

Masera *et al.* (2010) reportan el consumo de leña por zona ecológica para México; el mayor consumo se registra en regiones de trópico húmedo (3.0 kg MS hab⁻¹ día⁻¹) y el menor en las zonas semiáridas (1.5 kg MS hab⁻¹ día⁻¹) (Cuadro 18).

Cuadro 18. Consumo de leña per cápita para usuarios de diferentes zonas ecológicas de México.

Macro-región ecológica	Consumo de leña (kg MS hab ⁻¹ día ⁻¹)
Trópico húmedo	3.0
Trópico seco	2.5
Templado	2.0
Semiárido	1.5
Humedales	2.5
Otros	1.5

Fuente: Masera *et al.* (2010).

¹ Kg MS hab⁻¹ día⁻¹= Kilogramos de materia seca por habitante por día

En México, aproximadamente un cuarto de la población cocina con leña, ya sea solo o en combinación con gas LP. La demanda de leña para el año 2000 fue de 285 a 320 PJ² equivalente a 32 millones de metros cúbicos de madera (Ghilardi *et al.*, 2007; Masera *et al.*, 2010).

El Cuadro 19 muestra la estimación del consumo estatal de leña, en toneladas de materia seca y energía calorífica, para usuarios exclusivos y mixtos para los años 1990, 2000, 2005, 2010 y proyecciones para 2020 y 2024. El estado de Oaxaca reporta aproximadamente el 10% del consumo nacional de leña; con una disminución de 27.6 PJ año⁻¹ (1.9 millones de t MS³ año⁻¹), en 1990, a 26.7 PJ año⁻¹ (1.8 millones de t MS año⁻¹) en el 2010.

Cuadro 19. Consumo de leña en toneladas y energía calorífica a nivel nacional y de Oaxaca.

	Consumo total de leña (tMS)	Consumo total de leña (PJ año ⁻¹)	Consumo total de leña (tMS)	Consumo total de leña (PJ año ⁻¹)	Consumo total de leña (tMS)	Consumo total de leña (PJ año ⁻¹)
	1990	1990	2000	2000	2005	2005
OAXACA	1,908,658	27.64	2,042,325	29.57	1,910,963	27.67
NACIONAL	19,084,760	276.35	19,672,584	284.86	18,392,499	266.32
	2010	2010	2020	2020	2024	2024
OAXACA	1,847,145	26.75	1,734,247	25.11	1,695,357	24.55
NACIONAL	17,900,804	259.2	17,031,810	246.62	16,713,958	242.02

Fuente: Masera *et al.* (2010).

GIRA (2014) reportó para la Región de la Mixteca Oaxaqueña una oferta de leña de 273 mil tMS y un consumo de 311 mil tMS año⁻¹.

Para el municipio de Yanhuitlán se estimó una disponibilidad de leña 2,793 m³ (cobertura 60-100%) y 203 m³ (cobertura 20-60%). El consumo promedio es de 1.81 cargas familia⁻¹ semana⁻¹ (1.8 kg persona⁻¹ día⁻¹) y un consumo anual de

² 1 Petajoules = 10¹⁵ Joules=2.39E+14 calorías

³ t MS= Toneladas de materia seca

1,180 m³, considerando que el 75% de los hogares consumen leña (Contreras *et al.*, 2003).

Cruz y Aguirre (1992) reportan un consumo de leña, para Santa María Tiltepec, de 1.21 cargas (30 kg familia⁻¹ semana⁻¹) que se obtiene principalmente de los agostaderos. Las principales especies utilizadas para este propósito son: *Quercus spp.*, *Comarostaphylis polifolia*, *Pinus pseudostrobus var. oaxacana*, *Casimiroa edulis*, *Alnus sp.*, *Rhus standleyi*, *Arctostaphylos pungens*, *Ceanothus coeruleus* y *Acacia schaffneri*.

5.9. Manejo de agostaderos

Los agostaderos se definen como tierras con vegetación natural o introducida, donde predominan gramíneas, herbáceas y arbustos (Pellant *et al.*, 2005), para el pastoreo de ganado (INIFAP, 2011) y fauna silvestre, y la conservación del suelo y agua (INE, 1994). Se caracterizan por ser zonas con limitaciones físicas que impiden la producción agrícola, generalmente presentan baja precipitación, topografía accidentada, drenaje pobre, suelos secos, arenosos o húmedos (Cruz y Aguirre, 1992).

La transformación ganadera ha sido el principal factor asociado al cambio de uso del suelo; en México cada año se pierden entre 189 mil y 501 mil hectáreas de bosques tropicales y entre 127 mil y 167 mil hectáreas de bosques templados para uso agrícola y ganadero (Balvanera *et al.*, 2009).

El coeficiente de agostadero está en función al tipo de vegetación (Villa *et al.*, 2014) y la biomasa de forraje disponible, se puede determinar con ayuda de modelos biofísicos del crecimiento de la vegetación aplicados a imágenes satelitales (Díaz *et al.*, 2003), como es el caso del IVPN o Índice de Vegetación de Pendientes Normalizadas (Villa *et al.*, 2014). Otras metodologías comprenden muestreos en campo, estimaciones visuales, alturas o volúmenes

de plantas, radiometría, entre otros (Medina *et al.*, 2009); o líneas Canfield para evaluar el estado de los agostaderos (Contreras *et al.*, 2003).

5.9.1. Condición del pastizal

Es el estado de salud en el cual el pastizal es capaz de producir de forma natural en relación a la vegetación clímax (CONAZA, 1994); y como resultado de las prácticas de manejo (Kunst *et al.*, 2007).

Huss *et al.* (1986) establecen la condición del pastizal en base a especies deseables e indeseables (Cuadro 20).

Especies deseables o decrecientes: son las más apetecibles por el ganado, bajo un pastoreo intenso decrecen; presentes en un 80% de la vegetación clímax. Para la clasificación de la condición del pastizal se consideran el porcentaje total de todas las presentes.

Especies menos deseables o crecientes: son poco menos apetecibles por el ganado y bajo un pastoreo intenso se incrementan. Presentes en menos del 20% en la vegetación clímax. Para la clasificación de condición se considera un total de hasta 30%, pero no más.

Especies indeseables o invasoras: no son apetecibles por el ganado y bajo un pastoreo intenso aparecen o se incrementan, no aparecen en la vegetación clímax. No se consideran para la clasificación de la condición del pastizal.

Cuadro 20. Clases de condición de pastizales.

Clase de condición de pastizal	Porcentaje de especies deseables y de las menos deseables permisibles
Excelente	76-100
Bueno	51-75
Regular	26-50
Malo	0-25

Fuente: CONAZA (1994).

Huss (1993), describe la condición de pastizal en cuatro categorías:

Condición excelente: dominada por especies altamente deseables y productivas, agradables al paladar y de raíces profundas; existen unas pocas menos deseables y la capacidad de pastoreo es máxima; el terreno está bien cubierto y el suelo está lleno de raíces deseables, el ambiente es estable y no hay desertificación.

Condición buena: la presencia de especies deseables es más reducida y existe un mayor número de especies menos deseables; la capacidad de pastoreo es levemente inferior, pero satisfactoria. La cubierta y la cantidad de raíces son suficientes para estabilizar el pastizal.

Condición regular: aumenta la presencia de especies invasoras que consumen grandes cantidades de agua, se reduce la presencia de especies deseables, se reduce substancialmente la capacidad de pastoreo, la cubierta del terreno y la producción de raíces, dando origen a un escurrimiento excesivo y mayor riesgo de erosión.

Condición mala: presencia de pocas plantas deseables y menos deseables, entre las cactáceas, puede alcanzar una condición irreversible debido a los procesos de erosión y desertificación.

5.9.2. Unidad animal

La unidad animal (UA), se establece como una relación entre la oferta y demanda de forraje, determinada por la ingesta potencial. La UA considera que el bovino de referencia se encuentra en etapa de gestación o crianza con peso variable entre los 400 y 450 kg y con un consumo diario de forraje, en base a materia seca (MS), del 3% de su peso vivo. En el Cuadro 21 se reportan las equivalencias en unidades animal para diferentes especies y de acuerdo a su etapa de desarrollo (DOF, 2000; INIFAP, 2011).

Cuadro 21. Equivalencias en unidad animal para diferentes especies.

Tipo de ganado	Unidad Animal
Vaca de 450 kg de peso con su cría al pie	1.00
Toro adulto mayor de dos años de edad	1.25
Cría destetada de 8 a 12 meses de edad	0.60
Novillo o novillana de 12 a 24 meses de edad	0.75
Oveja con cría	0.20
Cabra con cabrito	0.17
Cordero o cabrito destetado de hasta seis meses de edad	0.12
Sementales ovinos o caprinos	0.26
Cinco colmenas	1.00

Fuente: DOF (2000); INIFAP (2011).

5.9.3. Carga animal y coeficientes de agostadero

Capacidad de carga animal (CCA): Es la cantidad de animales, o unidades animal que un área determinada puede soportar de acuerdo a su capacidad de producción de forraje por un tiempo determinado (Ecuación 13).

$$CCA = \frac{\sum(MUAE * FU)}{RUA} \quad 13$$

Dónde: CCA es la capacidad de carga animal (UA ha⁻¹), MUAE es la masa por Unidad de Área por cada Especie, FU factor de uso y RUA es el Requerimiento Unidad Animal.

De acuerdo a la Ley Agraria, coeficiente de agostadero (IA) “es la superficie que se requiere para alimentar una cabeza de ganado mayor o su equivalente en ganado menor, atendiendo los factores topográficos, climatológicos y pluviométricos que determinen la capacidad forrajera de la tierra de cada región” (Ecuación 14) (DOF, 1992).

$$IA = \frac{ha}{UA} \quad 14$$

Dónde: IA es el coeficiente o índice de agostadero, ha UA⁻¹ año⁻¹, ha: superficie de pastizal (ha) y UA es la unidad animal adecuada para mantener una explotación permanente.

En México la instancia encargada de determinar los coeficientes de agostadero es la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través del Comité Técnico Consultivo de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). La COTECOCA establece para el estado de Oaxaca, un mínimo de 0.80 ha UA⁻¹ año⁻¹ y un máximo de 33.40 ha UA⁻¹ año⁻¹ y un promedio de 4.12 ha UA⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 22) (SAGARPA, 2009).

Cuadro 22. Coeficiente de agostadero (ha UA⁻¹ año⁻¹) de algunas entidades federativas.

Entidad federativa	Mínimo	Máximo	Ponderado
Guanajuato	6.67	28.14	10.20
Guerrero	1.50	14.50	6.15
Hidalgo	0.80	38.55	6.41
Michoacán	1.50	24.46	7.00
Morelos	6.70	19.68	10.85
Oaxaca	0.80	33.40	4.12
Puebla	0.90	33.40	7.82

Fuente: SAGARPA (2009).

El (Cuadro 23), presenta los coeficientes regionales de agostadero por tipo de vegetación; sin embargo, estos datos pueden subestimar o sobreestimar la capacidad de carga animal, ya que está en función a las condiciones particulares de clima, vegetación, suelo y tipo de ganado de cada sitio de estudio.

Cuadro 23. Coeficientes regionales de agostadero en el estado de Oaxaca

Tipo de vegetación	C. A. (ha ⁻¹ UA ⁻¹)	
	Mínimo	Máximo
Selva alta perennifolia	0.90	3.44
Selva Alta Subcaducifolia	1.20	2.00
Selva Mediana Subperennifolia	0.80	4.74
Selva Mediana Sub-caducifolia	1.20	4.37
Selva Baja Caducifolia	1.70	32.04
Selva Baja Caducifolia Espinosa	6.70	12.00
Selva Esclerofilo Perennifolio	2.20	33.00
Bosque Caducifolio	4.29	20.00
Bosque Esclerofilo Caducifolio	7.60	15.00
Bosque Aciculiesclorofilo	2.30	14.50
Bosques Aciculifolio	3.70	12.70
Bosque Aciculilinearifolio	9.50	11.60
Bosque Escuamifolio	10.85	16.00
Palmar	1.00	8.06
Sabana	3.50	6.20
Pastizal Inducido	7.13	10.40
Matorral Mediano Subinorme	19.82	22.10
Matorral Oligocilindrocaule Afilo	33.40	
Manglar	2.40	
Dunas Costeras	12.00	

Fuente: DOF (1981).

Contreras *et al.* (2003) mencionan que de acuerdo a COTECOCA los coeficientes de agostadero para la condición buena, regular y pobre de los agostaderos es de 15, 25 y 34 ha UA⁻¹. Debido a las bajas coberturas que se tienen infieren que se requieren 3.1 ha por animal de pastoreo considerando solo ovejas y cabra, es decir, 24.8 ha UA⁻¹.

Cruz y Aguirre (1992) reportan para Tiltepec una superficie real de pastoreo de 725 ha con una carga animal de 258.4 UA. Entonces la carga animal real es de 0.36 UA ha⁻¹ (2.81 ha UA⁻¹) de marzo a octubre y 0.26 UA ha⁻¹ (3.84 ha UA⁻¹) de noviembre a febrero, incluyendo las áreas de cultivo después de la cosecha.

5.10. Estudios de caso de la evaluación de los servicios ecosistémicos

Estudios sobre servicios ecosistémicos se han realizado en diversas partes del mundo, algunos con enfoque de valoración sociocultural y otros con enfoque de

valoración económica; centrándose mayormente en los beneficios tangibles y directos que los usuarios obtienen de los ecosistemas o de acuerdo a las necesidades locales.

Calvet *et al.* (2012) identificaron y valoraron los SE proporcionados por los jardines de casa en Cataluña, España. Estos autores identificaron 19 funciones ecosistémicas por medio de literatura, observación y entrevistas: cinco servicios de regulación, dos servicios de soporte/hábitat, cinco servicios de producción y siete servicios culturales; esta última la más valorada.

Meynard *et al.* (2007) analizaron la importancia de investigar los SE en relación con modelos ecológicos y económicos para la toma de decisiones. Estos autores concluyen que el poco valor agregado que se le asigna a los recursos no contribuye al desarrollo de las comunidades rurales lo que afecta la provisión de servicios. Por ejemplo los bosques chilenos que son fuente de producción de madera, leña y carbón. El valor presente neto de la producción de madera, con una tasa de aprovechamiento del 8% (Nahuelhual *et al.*, 2007), fue entre 3,742 y 4,546 US\$ ha⁻¹ con manejo sustentable y entre 3,093 y 5,718 US\$ ha⁻¹ sin manejo, para bosques secundarios y maduros, respectivamente; y un valor anual entre 302 y 367 US\$ ha⁻¹ con manejo sustentable y entre 250 y 462 US\$ ha⁻¹ sin manejo, para bosques secundarios y maduros, respectivamente. En estos bosques, la recreación reporta un valor anual de 1.6 y 6.3 US\$ ha⁻¹; el valor del mantenimiento de la fertilidad del suelo fue de 26.3 US\$ ha⁻¹ y suministro de agua para el consumo humano fue de 235 US\$ ha⁻¹. Además, estimaron un volumen promedio de producción de leña de 37 y 32.5 m³ ha⁻¹ y de madera aserrada 70.4 y 75 m³ ha⁻¹, en bosques secundarios (*Nothofagus spp.*) y bosques maduros, respectivamente.

Zhiyun *et al.* (2011)⁴ clasificaron 13 tipos de ecosistemas y determinaron el valor indirecto de los servicios de regulación en Hainan Island, China. En promedio los ecosistemas conservan 5.35 t ha⁻¹ año⁻¹ de suelo, con un valor de 3.84 US\$ ha⁻¹ año⁻¹; fijación de C 16.18 t ha⁻¹ año⁻¹, con un valor de 166.09 a 790.47 US\$ ha⁻¹ año⁻¹; ciclo de nutrientes 27.67 t ha⁻¹ año⁻¹, con un valor de 10,414.83 US\$ ha⁻¹ año⁻¹; y como barrera rompedoras un valor de 7.20 a 9.60 US\$ ha⁻¹ año⁻¹.

Los servicios hidrológicos es un tema de importancia en el mundo, debido a que el agua es uno de los recursos preponderantes para el sustento de la vida y desarrollo de diversas actividades económicas. Zhiyun *et al.* (2011) estimaron para Hainan Island, China un volumen de retención de agua de 2,698.46 m³ ha⁻¹ año⁻¹ con un valor de 267.01 US\$ ha⁻¹ año⁻¹.

Meynard *et al.* (2007) mencionan que los cambios de uso de suelo y destrucción de la cobertura vegetal afectan la disponibilidad de agua. El rendimiento hídrico es mayor en bosques nativos en comparación con plantaciones exóticas; como es el caso de los bosques en Valdivia, Chile, donde estimaron para el año 2003 y una precipitación anual de 2,014 mm, la escorrentía total y superficial de 1,263 mm en bosques nativos y 683 mm para plantaciones exóticas de *Pinus radiata* (Oyarzún *et al.*, 2005); Lara y Urrutía (2010) demostraron que hay una correlación positiva y significativa entre el porcentaje de cobertura de bosque nativo y el coeficiente de escurrimiento. Nuñez *et al.* (2006) estimaron el valor de producción de agua en bosques nativos, de 61.2 a 162 US\$ ha⁻¹ año⁻¹.

En México existen pocos estudios de caso sobre SE, ya que muchas veces no se cuenta con la metodología adecuada para cuantificarlos y valorarlos, o las

⁴ Se realizó la conversión de CNY (Yuan renminbi chino) a dólares estadounidenses (US\$) 1 CNY=0.147672 US\$ (fecha de cambio 03/11/2016).

metodologías empleadas no son extrapolables a otros sitios. Algunos estudios realizados se enfocan a esquemas de compensación económica por la conservación de bosques y servicios ambientales que estos proveen (Perevochtchikova y Ochoa, 2012). Castillo *et al.* (2009) estudiaron la relación entre la sociedad y el bosque tropical seco, la percepción de los campesinos y la provisión de servicios aunado al turismo en la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala, Jalisco. Almeida *et al.* (2007) identificaron y evaluaron los SE en la cuenca del río Magdalena, D. F., partieron de un diagnóstico socioambiental y cuantificaron la provisión de agua con la metodología de Thornthwaite y balances hídricos. Estos autores reportan una producción promedio de 20 millones de metros cúbicos de agua al año y la captura de carbono, por asociación vegetal, fue en promedio de 55.1 tC ha⁻¹; la asociación de vegetación con mayor captura de carbono correspondió a *Acaena elongata* y *Abies religiosa* con 117 tC ha⁻¹. La percepción y herencia cultural de los beneficiarios a través de entrevistas les permitió concluir que algunos de los beneficios son los relacionados al ecoturismo y provisión de agua para diversos usos.

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés) llevaron a cabo el Proyecto GEF⁵ Mixteca con la finalidad de identificar, evaluar y valorar socialmente los SE en la cuenca del río Mixteco. La región se dividió en Unidades Ecosistémicas Territoriales (UET) y emplearon modelos como SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), InVEST (*Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs*), *Corridor Design* y el Análisis Espacial de la Oferta y Demanda de Combustibles de Madera (WISDOW, por sus siglas en inglés). Además, realizaron encuestas, talleres y recorridos de campo, que les permitieron identificar y priorizar los SE. Los SE que priorizaron fueron:

⁵ Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés)

producción de alimentos derivados de la agricultura y la ganadería, forraje, producción y calidad del agua, aprovechamiento de leña y madera, extracción de resina, bienes y servicios culturales proporcionados por la flora y fauna (ecoturismo, uso doméstico, medicinal, gastronómico, ornamental o ceremonial), polinización, control de la erosión y captura de carbono. Mencionan que cerca del 20% de la cuenca presenta procesos de degradación, causados principalmente por cambios de uso forestal a uso agropecuario que afectan la provisión y regulación de otros servicios.

El Proyecto Mixteca (2015) reporta un rendimiento promedio de 0.97 t ha⁻¹ en cultivos de maíz, frijol y trigo cultivados en laderas. Para la producción ganadera estimó una capacidad de carga de 0.40 a 0.70 UA ha⁻¹ año⁻¹, dicha actividad está compuesta mayormente por caprinos (85%), seguido por ovinos. En el aprovechamiento de leña, reportó una oferta y demanda de 311 mil tMS y 273 mil tMS, respectivamente. En cuanto a la producción y calidad del agua estimó un escurrimiento anual de 896.8 millones de metros cúbicos. Además, reporta que la calidad del agua se ve afectada por los aportes de aguas residuales tratadas y sin tratar, materia orgánica, residuos sólidos municipales, aporte de sedimentos, lixiviados agrícolas y pecuarios. Y finalmente, realizó un análisis de calidad de hábitat para el establecimiento de corredores biológicos y ecoturísticos.

5.11. InVEST (Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs)

En años recientes se ha incrementado el uso de herramientas que integran la ecología, economía y geografía para cuantificar y evaluar los SE; que son herramientas importantes para la toma de decisiones, planeación y conservación de los recursos naturales (Bagstad *et al.*, 2013a). Una de estas herramientas es el InVEST, software libre y de código abierto, que tiene como finalidad el mapeo, cuantificación y valoración de los SE. Este programa comprende 18 modelos: captura y almacenamiento de carbono, carbono azul

(ecosistemas costeros), vulnerabilidad costera, polinización de cultivos, pesca, calidad del hábitat, evaluación de riesgo de hábitat, producción de madera bajo manejo, acuacultura marina, calidad del agua marina, olas y erosión costera, energía eólica marina, recreación, producción de energía hidroeléctrica y producción de agua, calidad escénica, retención de sedimentos, purificación de agua y energía de olas (Sharp *et al.*, 2015). Estos modelos usan como información de entrada datos cartográficos del medio biofísico y de las condiciones económicas; las salidas son datos cartográficos de variables del medio biofísico y/o económico. Además, permite un análisis espacial local, regional o global de acuerdo a las necesidades de área de estudio.

InVEST ha sido empleado en diversos casos de estudio, por ejemplo, Bagstad *et al.*, (2013b) generaron escenarios para cuantificar los cambios en la provisión de SE (carbono, agua y belleza escénica), para casos de crecimiento urbano y manejo que pastizales con mezquite en la cuenca del río Pedro en el Sureste de Arizona, USA y Norte de Sonora, México.

Nelson *et al.* (2009) utilizaron InVEST en la cuenca Willamette, Oregon bajo tres escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo para conocer la afectación a los servicios hidrológicos (calidad del agua, mitigación de tormentas), conservación del suelo, captura de carbono, conservación de la biodiversidad, y el valor de productos básicos (productos agrícolas, madera, entre otros).

Dhakal *et al.* (2014) evaluaron los impactos potenciales de la conversión forestal (plantaciones de bosques de coníferas a bosque mixtos y bosques secundarios) sobre el hábitat de vertebrados en peligro de extinción (*Ursus thibetanus* y *Accipiter gentilis*) y especies comunes (*Sus scrofa* y *Cervus nippon*) en Toyota, Japón; bajo dos escenarios (ecológico y económico) y teniendo como línea base del año 2012 y proyecciones cada 30 años hasta el 2072.

Polasky *et al.* (2011) cuantificaron, en el estado de Minnesota, USA entre 1992 y 2001, cambios en los SE y hábitat para la biodiversidad, así como, cambios en la rentabilidad, beneficios sociales y económicos bajo escenarios de cambio de usos del suelo (sin expansión agrícola, sin expansión urbana, con expansión agrícola, con expansión forestal y conservación).

Goldstein *et al.* (2012), trabajaron en Hawaii para evaluar las implicaciones financieras y ambientales en la aplicación de escenarios de planeación de acuerdo al uso del suelo, con la finalidad de generar planes de manejo para la agricultura y bosques diversificados que permitan mitigar el cambio climático, promover la seguridad alimentaria y la diversificación de oportunidades económicas rurales.

Leh *et al.* (2013), mapearon y cuantificaron los SE de biodiversidad, producción de agua, almacenamiento de carbono, retención de nutrientes y retención de sedimentos para Ghana y Cote d'Ivoire en África Occidental para 2000, 2005 y 2009.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. Delimitación de la zona de estudio

La cuenca de Tiltepec delimitada a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) cuenta con una superficie de 112.57 km². Esta se localiza entre las coordenadas 17°26'41.12" y 17°36'9.67" de Latitud Norte; y 97°17'55.4" y 97°24'37.33" de Longitud Oeste con una altura media de 2,273 msnm (Figura 9).

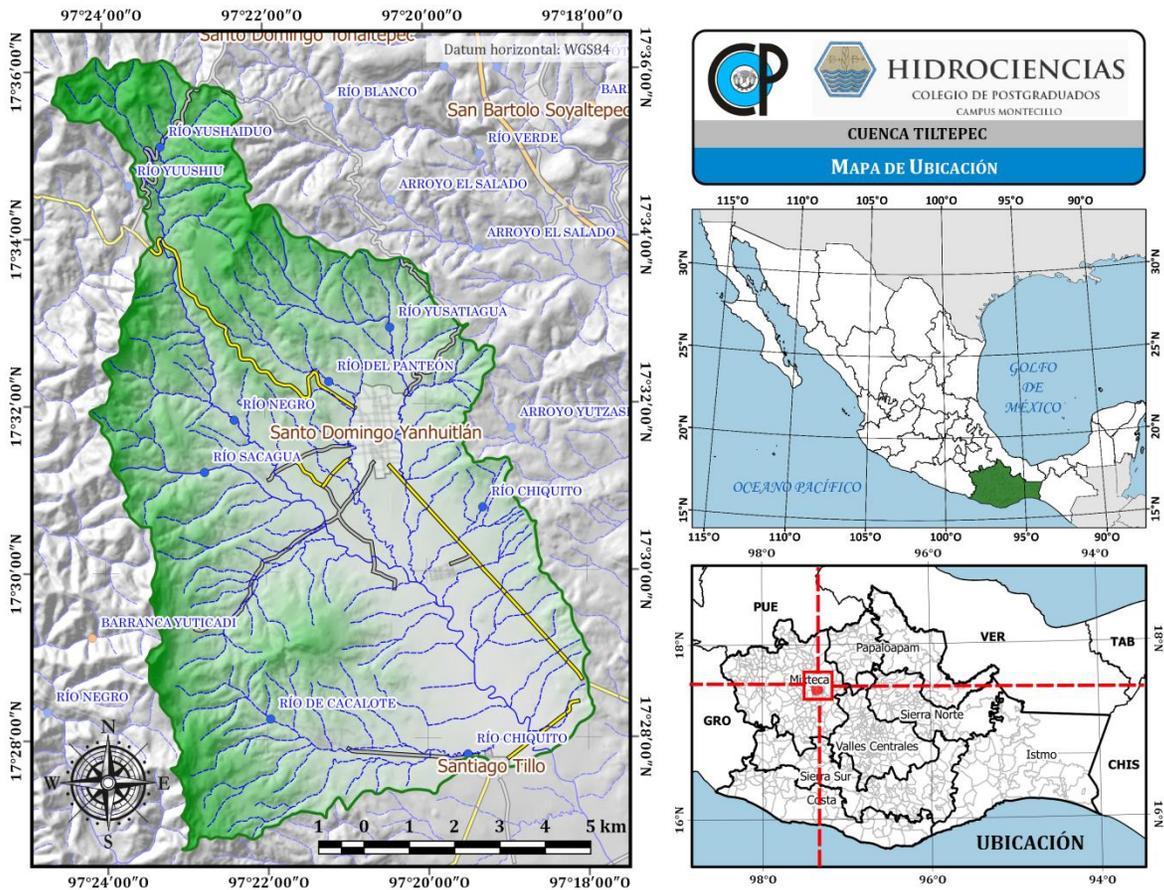


Figura 9. Localización geográfica de la cuenca de Tiltepec.

6.2. Caracterización del medio biofísico de la cuenca

Para conocer el estado de los recursos de la cuenca, se realizó un diagnóstico del medio biofísico, ambiental, socioeconómico y cultural del área de estudio;

tomando en cuenta datos climatológicos, mapa de pendientes, suelos, uso actual del suelo y población.

6.2.1. Clima

Predomina el clima Templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano, con un cociente de precipitación/temperatura de 51.3, un porcentaje de lluvia invernal menor al 5%, con verano fresco largo y una oscilación térmica extrema en promedio de 7 °C.

El periodo de lluvias abarca generalmente los meses de abril a octubre y los meses más lluviosos se presentan entre junio y septiembre. La precipitación promedio de los últimos 15 años es de 703.2 mm, con una desviación estándar de 101 y un coeficiente de variación del 14%. Los años más lluviosos fueron 2012 y 2014 con 888 y 834.9 mm respectivamente y el más seco fue 2007 con 590.7 (Cuadro 24).

Cuadro 24. Precipitación 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán.

Mes	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Prom PP
Ene	0.0	0.0	14.5	2.0	0.0	0.0	0.0	1.0	10.2	1.0	2.6	1.4	30.6	0.0	4.5
Feb	0.0	22.6	2.0	0.0	0.0	5.5	11.0	0.0	10.0	0.0	11.4	0.2	0.0	0.0	4.5
Mar	0.0	6.0	94.0	0.0	17.5	1.0	0.0	0.0	0.0	1.8	10.6	4.4	42.2	28.6	14.7
Abr	38.5	0.0	10.8	79.5	5.0	9.0	47.5	69.5	38.0	33.4	11.4	56.2	25.2	39.6	33.1
May	39.0	32.0	74.5	69.5	33.5	55.0	55.5	76.5	3.5	42.0	95.4	8.4	168.8	127.2	62.9
Jun	109.5	246.5	214.0	103.0	66.0	1.5	117.5	176.5	129.3	129.3	191.4	124.2	220.4	117.4	139.0
Jul	144.4	120.3	42.0	133.3	69.5	144.0	179.5	104.8	158.5	194.6	140.8	108.0	88.2	85.2	122.4
Ago	120.8	36.4	128.5	140.0	219.0	131.0	146.0	51.3	191.0	193.8	223.8	63.4	22.6	82.3	125.0
Sep	199.2	154.5	66.0	25.5	80.0	101.5	132.0	188.5	94.2	100.8	146.8	213.4	178.2	235.4	136.9
Oct	23.7	117.0	105.0	64.5	66.0	49.5	8.0	62.0	0.0	40.4	50.6	53.2	53.3	44.4	52.7
Nov	0.0	0.0	0.0	3.5	32.2	0.0	0.5	0.0	7.0	0.6	3.2	17.8	5.4	21.8	6.6
Dic	0.0	3.5	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	6.6	0.0	0.8	0.0	0.4	0.0	0.4	1.0
Anual	675.1	738.8	751.3	620.8	590.7	498.0	697.5	736.7	641.7	738.5	888.0	651.0	834.9	782.3	703.2

Fuente: INIFAP (2016).

El análisis de la precipitación diaria para el año 2015 (Figura 10), muestra 119 días con lluvia, que corresponden al 32% del año. El periodo de lluvias inició a mediados de marzo y terminó a principios de noviembre con presencia de dos eventos extremos (30-mayo y 02-septiembre). Debido a las condiciones topográficas, edáficas, uso del suelo, zonas desprovistas de vegetación y la

presencia de humedad antecedente, que satura el suelo y reduce la infiltración, estos eventos extremos generan escurrimientos superficiales que causan erosión del suelo y arrastre de sedimentos en la cuenca.

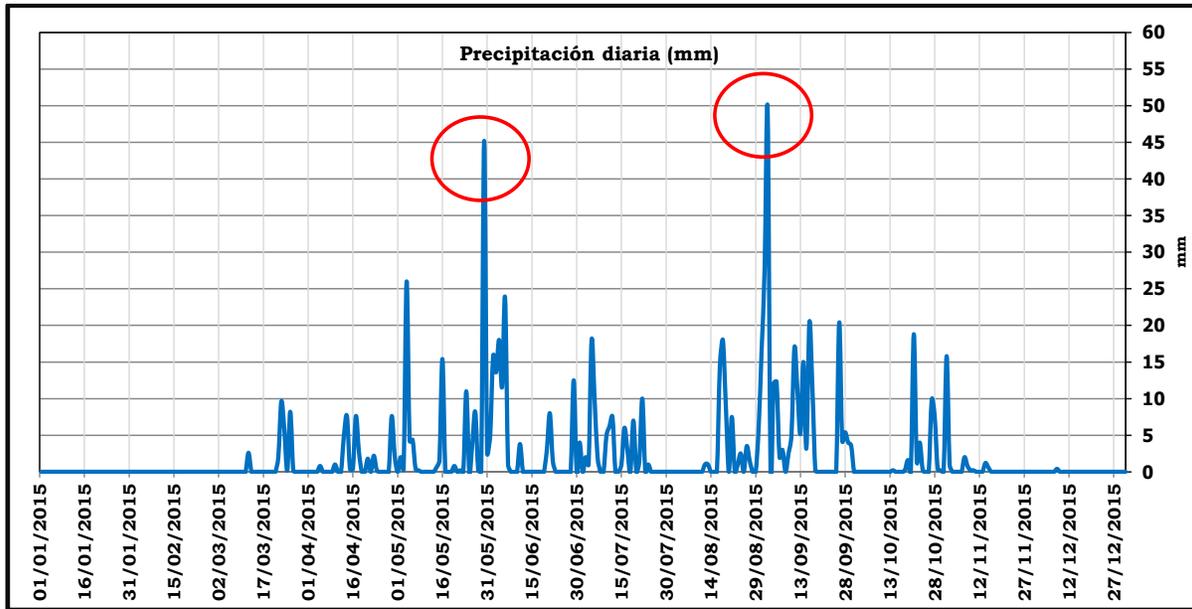


Figura 10. Precipitación diaria para el año 2015 de la estación Santo Domingo Yanhuitlán.

La variación de la temperatura, en los últimos 15 años (Cuadro 25), presenta un promedio 13.7 °C, con una desviación estándar de 1.3 y coeficiente de variación del 9%. De acuerdo a los registros, la temperatura máxima se presenta normalmente en abril, cuando alcanza temperaturas de hasta 30 °C y el mes más frío es enero con una media de 9.7 °C y mínimas por debajo de los 0 °C.

Cuadro 25. Temperatura media 2001-2015 de la estación Santo Domingo Yanhuitlán.

Mes	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Prom T°
Ene	7.4	11.1	10.6	8.0	6.8	5.9	7.9	8.7	10.2	12.0	11.7	13.7	11.3	11.2	9.7
Feb	11.0	13.3	9.9	8.9	8.9	8.6	9.7	8.6	11.4	13.7	13.7	15.2	14.1	13.0	11.4
Mar	12.0	14.0	12.4	11.3	11.2	10.2	12.9	8.2	12.2	14.3	14.6	15.2	16.1	14.8	12.8
Abr	15.8	14.6	12.1	14.2	11.4	11.7	13.6	13.2	13.0	17.9	15.6	18.9	16.9	17.4	14.7
May	15.5	15.5	14.7	13.3	14.1	14.2	14.1	14.1	15.6	17.4	17.3	17.3	16.7	17.2	15.5
Jun	16.3	16.5	15.5	16.3	15.1	14.8	16.0	15.5	16.6	15.8	16.4	17.2	16.7	16.5	16.1
Jul	16.6	16.1	14.6	13.5	15.8	15.4	15.5	14.5	15.9	16.1	15.5	16.2	15.7	17.0	15.6
Ago	16.3	16.3	14.0	15.9	14.8	15.1	15.3	15.2	15.9	16.6	15.9	16.0	16.0	17.3	15.8
Sep	15.5	16.5	14.5	15.6	15.1	14.6	15.2	15.6	15.0	15.6	15.4	16.2	15.6	17.8	15.6
Oct	14.5	15.7	13.7	13.5	14.5	14.5	13.3	13.6	11.7	13.0	14.2	15.3	14.0	16.3	14.1
Nov	12.7	11.9	8.3	12.1	13.0	12.6	11.7	12.2	11.4	12.4	13.4	13.6	12.1	15.3	12.3
Dic	12.3	14.1	7.2	11.2	7.5	6.9	9.1	10.9	8.5	11.2	13.1	13.0	13.5	14.4	10.9
Anual	13.8	14.6	12.3	12.8	12.4	12.0	12.8	12.5	13.1	14.7	14.7	15.6	14.9	15.7	13.7

Fuente: INIFAP (2016).

La evaporación media reportada para el área de estudio, para los últimos 15 años (Cuadro 26 y Cuadro 27), es de 1,629 mm, con un valor mínimo de 1,338 mm (año 2015) y máximo de 1,863 mm (año 2008); con una desviación estándar de 171.7 y coeficiente de variación del 11%. Los meses con mayor evaporación son de marzo a mayo, periodo que coincide con los meses más calurosos. Los datos mensuales, para cada año, muestran una variabilidad de 15% al 25%, solo el año 2015 presenta una variación del 30%.

Cuadro 26. Evaporación 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán.

Mes	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ene	118.6	112.8	108.4	117.5	132.3	134.1	144.0	139.2	137.8
Feb	140.3	118.2	136.4	144.5	155.5	143.4	135.6	146.3	130.0
Mar	190.2	166.8	169.7	203.8	194.3	176.9	208.6	198.2	201.9
Abr	208.6	180.7	168.5	183.9	225.0	177.1	215.6	190.7	181.7
May	140.4	201.8	156.4	173.4	151.9	178.9	205.9	180.1	150.2
Jun	142.8	112.6	137.3	176.3	152.9	130.5	154.6	180.9	150.2
Jul	129.6	127.5	142.8	159.8	138.6	189.5	184.2	152.9	166.9
Ago	148.1	142.8	152.0	123.9	142.2	146.2	133.0	175.5	168.5
Sep	113.5	127.9	116.1	113.7	134.1	145.6	114.7	110.8	134.6
Oct	96.7	115.8	126.1	115.8	124.6	124.6	129.5	111.7	136.3
Nov	105.1	106.7	117.8	102.1	102.0	102.0	110.7	108.2	94.0
Dic	106.1	97.4	113.5	123.0	104.2	119.2	126.6	119.1	86.9
Anual	1640.0	1610.9	1645.0	1737.8	1757.5	1767.7	1862.9	1813.5	1738.9

Fuente: INIFAP (2016).

Cuadro 27. Continuación. Evaporación media 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuitlán.

Mes	2011	2012	2013	2014	2015	Prom	Prom
Ene	157.7	138.6	82.7	99.2	117.1	124.3	105.6
Feb	148.4	127.4	139.8	146.7	136.7	139.2	118.3
Mar	165.4	164.1	130.2	155.5	121.3	174.8	148.6
Abr	164.6	150.4	94.2	86.6	132.6	168.6	143.3
May	71.3	142.1	136.9	125.2	124.4	152.8	129.9
Jun	148.7	107.5	117.1	106.5	39.6	132.7	112.8
Jul	104.0	118.1	122.4	120.4	142.8	142.8	121.4
Ago	127.2	114.0	117.1	130.4	140.1	140.1	119.1
Sep	112.6	108.3	98.3	52.7	48.5	109.4	93.0
Oct	123.2	123.2	111.4	119.9	115.5	119.6	101.7
Nov	129.8	130.1	107.5	109.7	100.0	109.0	92.6
Dic	156.1	134.9	95.6	115.2	119.5	115.5	98.2
Anual	1608.9	1558.6	1353.1	1368.0	1338.0	1628.6	1384.3

Fuente: INIFAP (2016).

La Figura 11 muestra a junio y septiembre como los meses con mayor precipitación, la presencia de canícula en los meses de julio y agosto y un periodo de sequía de noviembre a marzo. En los meses de junio y septiembre la precipitación media supera la evaporación, cuyo excedente de agua ofrece un servicio de provisión a los habitantes de la cuenca.

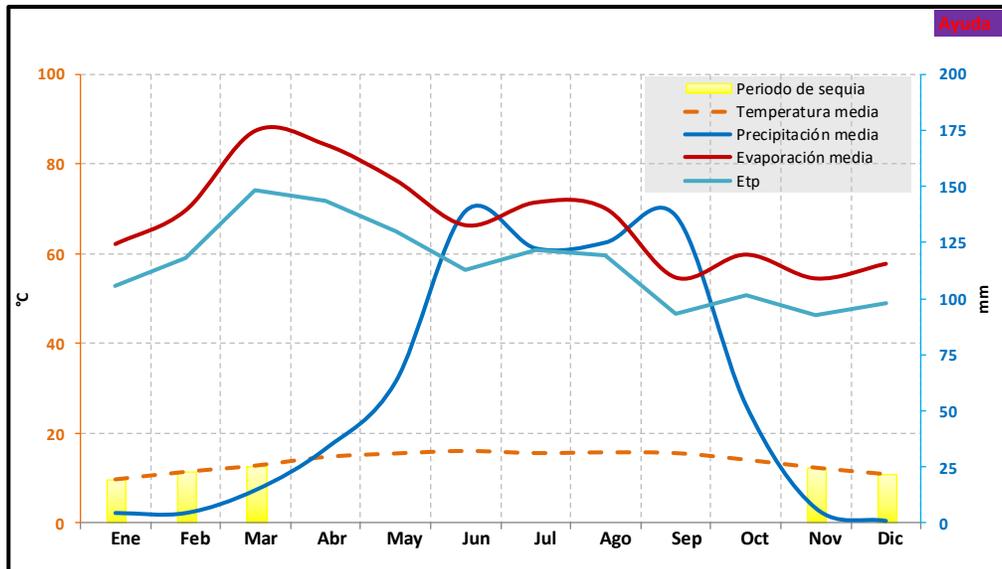


Figura 11. Climograma para la cuenca de Tiltepec.

En 2001 se presentó el mayor evento de precipitación máxima en 24 horas (102.5 mm), con una probabilidad de excedencia del 6% y un periodo de retorno de 16 años, y el evento mínimo se presentó en 2003 con una precipitación de 33 mm, con una probabilidad de excedencia del 94% y un periodo de retorno de 1.1 años. La media de los eventos extremos es de 59.1 mm con una variación del 34% (Cuadro 28).

Cuadro 28. Precipitación máxima en 24 h para el período de 2001-2015 para la estación Santo Domingo Yanhuatlán.

Año	PPmax24h (mm)	Ordenado (PP de mayor a menor)				
		Año	PP (mm)	m	Prob. de excedencia	Pr (años)
2001	102.5	2001	102.5	1	0.06	16.0
2002	88.5	2002	88.5	2	0.13	8.0
2003	33.0	2014	82.4	3	0.19	5.3
2004	44.0	2009	80.0	4	0.25	4.0
2005	44.0	2007	62.0	5	0.31	3.2
2006	52.0	2011	57.6	6	0.38	2.7
2007	62.0	2012	54.6	7	0.44	2.3
2008	54.0	2008	54.0	8	0.50	2.0
2009	80.0	2006	52.0	9	0.56	1.8
2010	38.0	2015	49.5	10	0.63	1.6
2011	57.6	2013	44.2	11	0.69	1.5
2012	54.6	2004	44.0	12	0.75	1.3
2013	44.2	2005	44.0	13	0.81	1.2
2014	82.4	2010	38.0	14	0.88	1.1
2015	49.5	2003	33.0	15	0.94	1.1

PP Precipitación y Pr Periodo de retorno

En base a la información anterior, se generó la precipitación esperada para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. A 10 años la precipitación esperada es de 92 mm y a partir de los 25 años la precipitación excede la máxima registrada durante 2001 (Cuadro 29).

Cuadro 29. Periodos de retorno para la estación Santo Domingo Yanhuitlán

Pr (años)	Factor	PP esperada (mm)
10	1.00	92.0
25	1.25	115.0
50	1.50	138.0
100	2.00	184.0

6.2.2. Pendientes

La FAO (2009), clasifica la pendiente en 10 categorías que va de plano con una pendiente de 0 a 0.2% a muy escarpado con pendientes mayores de 60% (Cuadro 30).

Cuadro 30. Clases de gradiente de la pendiente.

Clase	Descripción	%
01	Plano	0-0.2
02	Nivel	0.2-0.5
03	Cercano al nivel	0.5-1.0
04	Muy ligeramente inclinado	1.0-2.0
05	Ligeramente inclinado	2-5
06	Inclinado	5-10
07	Fuertemente inclinado	10-15
08	Moderadamente escarpado	15-30
09	Escarpado	30-60
10	Muy escarpado	>60

Fuente: FAO (2009).

De acuerdo al Cuadro 31 y Figura 12, el 19.7% de la superficie tiene una pendiente entre 0 y 5%, clasificada entre plano y ligeramente inclinado, donde se encuentra la mayor parte de la zona agrícola y de acuerdo a la clasificación agrológica (*Land Capability Classification*), estos rangos de pendiente pertenecen a las clases I y II, correspondiendo a suelos de excelentes a buenos para el desarrollo de cultivos. El 15% de los terrenos presentan una pendiente entre 5 y 10%, suelos de clase III, que son medianamente aptos para cultivos agrícolas, propensos a la erosión y donde se recomienda establecer obras de conservación como terrazas, bancales, entre otros. El 9.2% del área de estudio

presenta una pendiente fuertemente inclinada y el 24.3% moderadamente escarpado, correspondiendo a la clase IV, son suelos inadecuados para el establecimiento de cultivos agrícolas, pero con aptitud para el establecimiento de pastizales. El 31.8% presenta pendientes escarpadas a muy escarpadas, corresponden de las clases VI a VIII. La clase VI (pendientes $\leq 55\%$) son suelos aptos para el pastoreo o silvicultura, las clases VII (pendientes $\leq 80\%$) y VIII (pendientes $> 80\%$) son suelos aptos para bosque, fauna silvestre, esparcimiento o usos hidrológicos (SCS, 1961).

Cuadro 31. Rango de pendientes para la cuenca de Tiltepec.

Rango de pendiente (%)	Superficie (ha) (a)	%	% acumulada	Rango promedio (b)	(a)x(b)
0-5	2,219.6	19.7	19.7	2.5	5,549.0
5-10	1,685.0	15.0	34.7	7.5	12,637.8
10-15	1,040.2	9.2	43.9	12.5	13,003.3
15-20	984.0	8.7	52.7	17.5	17,220.7
20-25	919.3	8.2	60.8	22.5	20,685.6
25-30	827.2	7.3	68.2	27.5	22,748.8
30-35	738.6	6.6	74.7	32.5	24,005.4
35-40	638.8	5.7	80.4	37.5	23,955.3
40-45	545.8	4.8	85.3	42.5	23,198.2
> 45*	1,658.1	14.7	100.0	57.9	96,006.8
Total	11,257	100			259,011.3
Pendiente ponderada (%) =					23.0

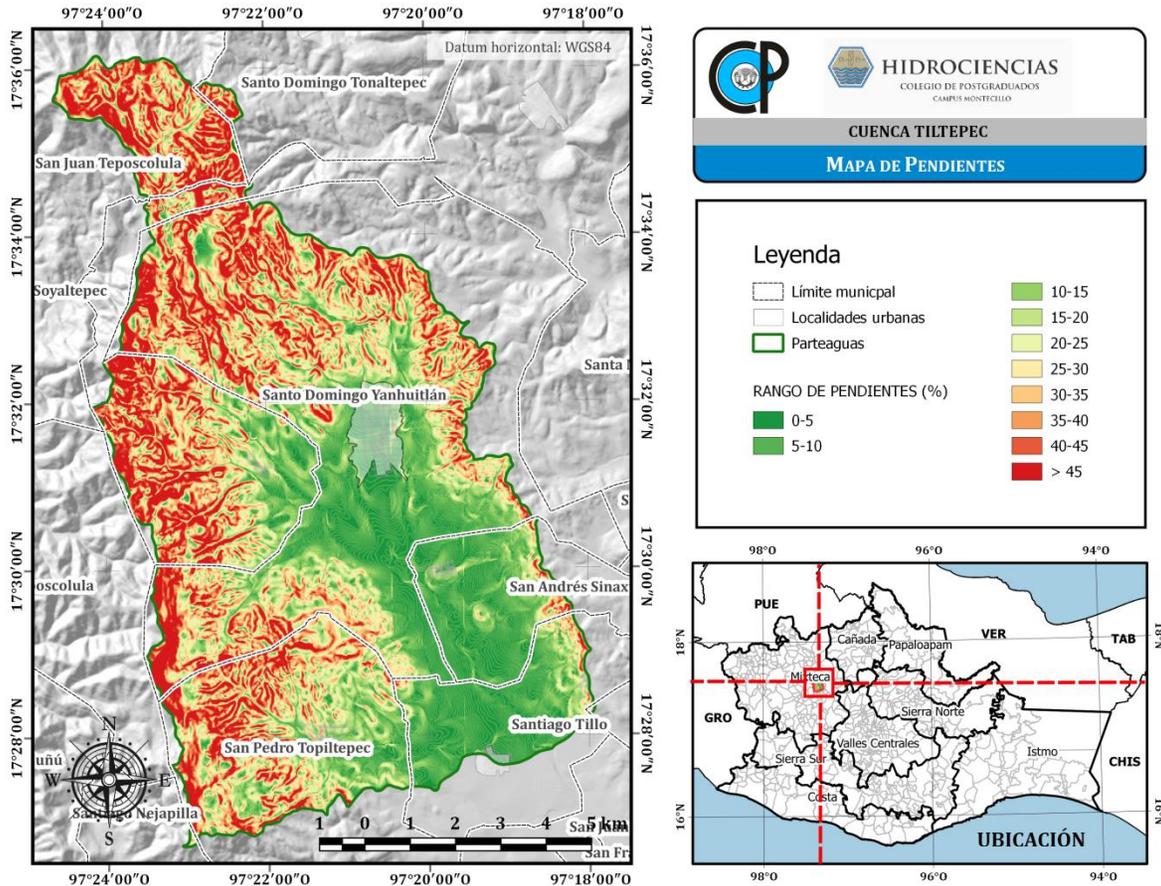


Figura 12. Pendientes topográficas en la cuenca de Tultepec.

Fuente: Elaboración propia con base en Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). INEGI, 2015. * El rango de pendientes varía de >45 a 122 %. El rango medio ponderado es de 57.9%.

6.2.3. Geología y fisiografía

El área de estudio se ubica en la Provincia fisiográfica Zona Montañosa de Guerrero – Oaxaca y cuenca Oaxaca o Tamazulapan, (Álvarez Jr., 1961) o Provincia Sudserranense y subregión Nochixtlán (Cuanalo *et al.*, 1989), Sierra Madre del Sur y subprovincia Mixteca Alta (INEGI, 2010). La cuenca de estudio está separada de la cuenca del Balsas por el levantamiento metamórfico de Acatlán, constituida por clásticos del Jurásico y Cretácico inferior, calizas del cretácico medio, y clásticos, calizas y evaporitas del cretácico superior. La península de Tehuacán divide esta cuenca de la Sierra Madre Oriental,

constituida por esquistos del Paleozoico superior e incrustaciones graníticas y gneises del Precámbrico (Álvarez Jr., 1961).

La región comprende una zona compleja de materiales sedimentarios, ígneos y metamórficos, fuertemente plegados de amplitud alta con valles sinclinales y colinas; además, montañas con crestas fuertemente erosionadas, planicies y lomeríos. La altura al nivel del mar varía entre los 1,800 y 2,800 m. El tipo de rocas que predominan son ígneas (lavas, brechas, tobas, basaltos y andesitas) y sedimentarias (rocas clásticas y otras sedimentarias) (Cuanalo *et al.*, 1989) (Figura 13).

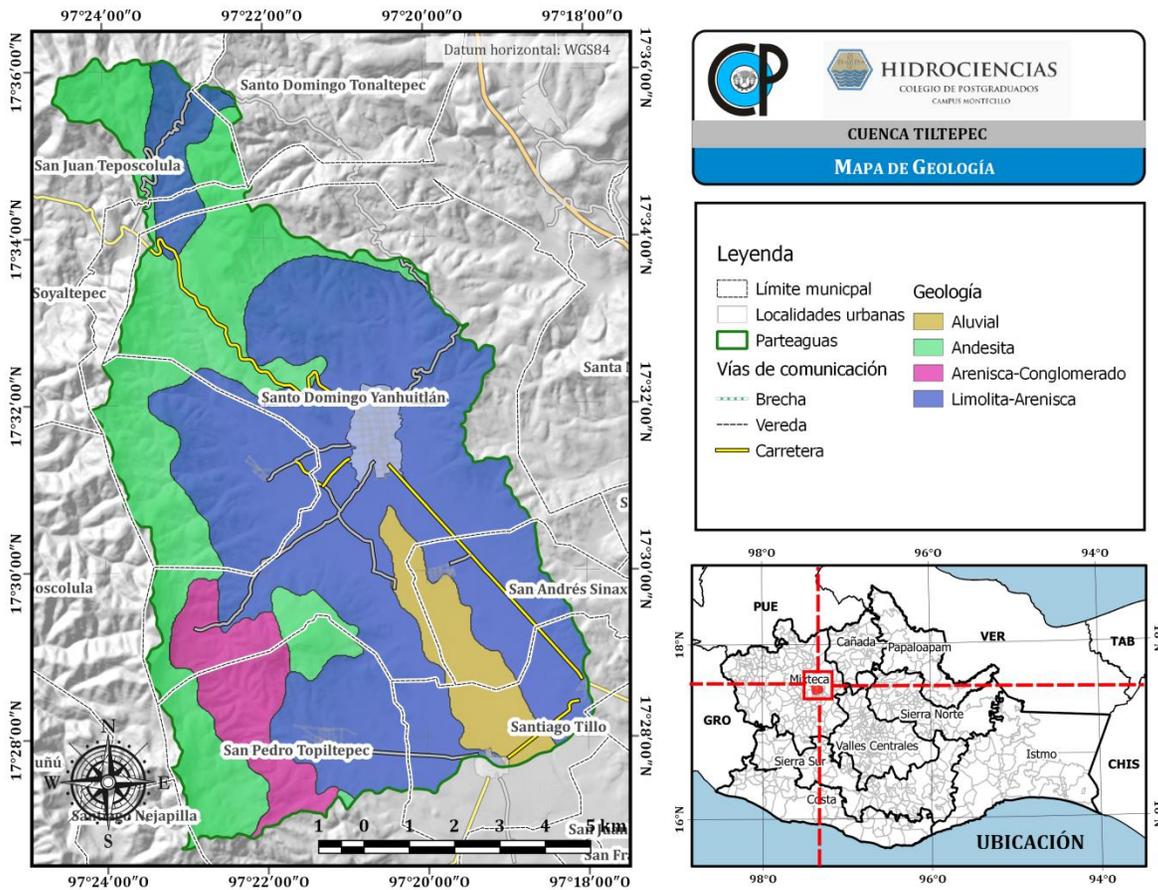


Figura 13. Geología de la cuenca de Tiltepec.

6.2.4. Suelos

De acuerdo al INEGI (2006), los suelos en la cuenca de Tiltepec son principalmente: Leptosoles (29.8%), Luvisoles (11.1%), Phaeozem (33.4%) y Vertisoles (25.3%) (Figura 14).

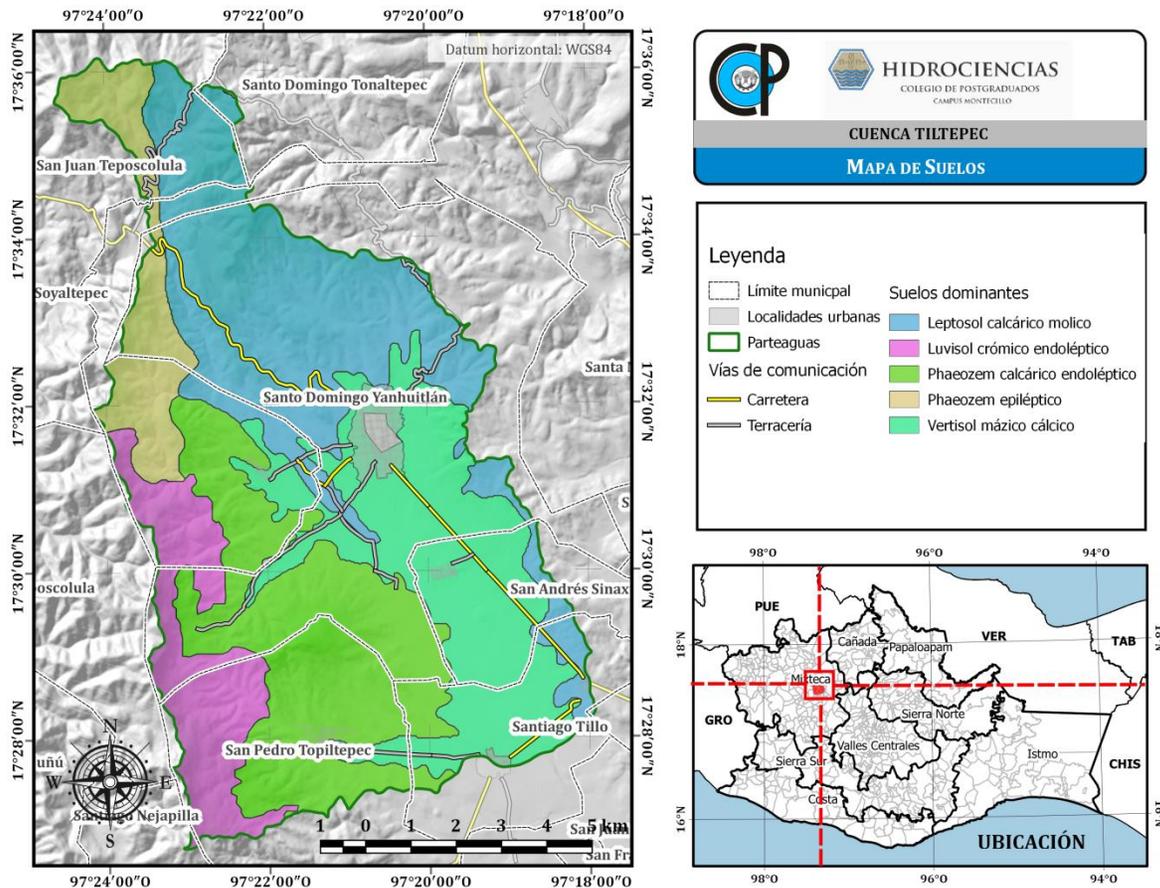


Figura 14. Suelos de la cuenca de Tiltepec.

A continuación se describen cada una de las unidades y subunidades de suelo presentes en la cuenca (IUSS, 2007):

Leptosol calcárico mólico: son suelos muy someros sobre roca continua y gravillosos y/o pedregosos, comunes en regiones con pendientes fuertemente disectadas o zonas fuertemente erosionadas. Los leptosoles que presentan un

horizonte mólico provienen de material calcáreo intemperizado con un contenido de moderado a alto en materia orgánica.

Luvisol crómico endoléptico: son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos. Su origen es de una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo till glaciario, y depósitos eólicos, aluviales y coluviales. Presentan roca continua que comienza entre 50 y 100 cm de la superficie del suelo.

Phaeozem calcárico endoléptico y phaeozem epiléptico: Suelos oscuros ricos en materia orgánica con alta saturación de bases. Proviene de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till glaciario y otros. Los phaeozems son suelos porosos, fértiles y son excelentes tierras agrícolas. Los phaeozem calcárico endoléptico contienen material calcáreo intemperizado y roca continua que comienza entre 50 y 100 cm de la superficie del suelo; en cambio, los epilépticos presentan roca continua que comienza dentro de 50 cm de la superficie del suelo.

Vertisol mázico cálcico: son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles, forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan. Su origen proviene de sedimentos que contienen elevada proporción de arcillas expandibles producidas por neoformación a partir del intemperismo de las rocas. Presentan potencial agrícola, pero las propiedades físicas y el régimen de humedad del suelo representan serias restricciones de manejo; la textura del suelo es pesada y el predominio de minerales de arcilla expandibles resulta en rango de humedad del suelo restringido entre stress hídrico y exceso de agua. La labranza se obstaculiza por la adhesividad cuando el suelo está mojado y dureza cuando está seco, el subgrupo mázico cálcico se refiere a un suelo masivo y duro o muy

duro en los primeros 20 cm del suelo con concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

6.2.5. Uso del suelo y vegetación

De acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), los ecosistemas presentes en el área de estudio se clasifican en: Bosque templado (bosque de encino y pino-encino), pastizal, selva seca (selva baja caducifolia) y matorral (matorral xerófilo y chaparral). A continuación, se describen cada uno de los ecosistemas, usos del suelo y tipos de vegetación:

Los bosques templados de México son el segundo bioma más extenso del país (21% del territorio) (Guzmán *et al.*, 2014) y uno de los más diversos. Incluye diversos tipos de vegetación, entre los que se encuentran: bosques de coníferas, bosques de pino, bosques de abeto u oyamel, bosques de ayarín, bosques de cedro y táscate, bosques de encino y bosques mixtos de pino y encino. Se desarrollan en zonas con temperaturas promedio entre 12 y 23°C y con climas de subhúmedos a templado húmedos, con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm; crecen sobre suelos muy variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos, por lo general con abundante materia orgánica y hojarasca (CONABIO, 2016).

En la cuenca de Tiltepec el bosque de encino cubre el 19.4% de la superficie, comprende especies como *Quercus glaucoides*, *Quercus magnoliifolia*, *Quercus consperma*, *Quercus castanea* y *Quercus crassifolia*. El bosque de pino-encino comprende el 2.8% de la superficie dominada principalmente por *Pinus oaxacana* asociado con *Quercus spp.*, presentándose individuos aislados de *Juniperus flácida* y *Cercocarpus fothersgilloides* o ramón (Cruz, 1992).

La selva baja caducifolia son comunidades vegetales dominadas por árboles pequeños que normalmente pierden sus hojas durante la época seca del año.

Son propias de climas cálidos con lluvias escasas y se ubican en zonas muy frágiles y en condiciones climáticas que favorecen la desertificación. Comprende los siguientes tipos de vegetación: selva baja caducifolia, bosque tropical deciduo, selva baja decidua y selva subhúmeda.

La selva baja caducifolia cubre el 5.6% de la cuenca, los componentes arbóreos de esta selva presentan altura baja, normalmente de 4 a 10 m. El estrato herbáceo es bastante reducido y sólo se puede apreciar después de que ha empezado la época de lluvias y retoñan o germinan las especies herbáceas. Las formas de vida crasa y suculenta son frecuentes, especialmente en los géneros *Agave*, *Opuntia*, *Stenocereus* y *Cephalocereus*. Algunas de las especies que predominan en este tipo de ecosistemas son: *Bursera sp.*, *Ipomoea sp.* (Cazahuate), *Leucaena leucocephala* (Guaje), *Erythrina sp.* (Colorín).

Los matorrales son comunidades vegetales dominadas por arbustos de altura inferior a 4 m, propias de climas secos con lluvias escasas y zonas frágiles que favorecen la desertificación. Los tipos de vegetación que pertenecen a este tipo de ecosistemas son: matorral xerófilo (seco), cardonales, tetecheras, izotales, nopaleras, matorral espinoso, matorral inerme (sin espinas), parvifolio (hojas pequeñas), magueyales, lechuguillales, guapillales y chaparrales.

En la cuenca los tipos de vegetación que corresponden a este tipo de ecosistema son: matorral xerófilo con 27.4% y el chaparral con 0.2%; algunas de las especies de matorral y chaparral que se encuentran son: *Arctostaphylos pungens*, *Rhus standleyi*, *Amelanchier denticulata*, *Amelanchier nervosa*, *Dodonaea viscosa* y especies de *Dalea spp.* (Cruz, 1992).

Los pastizales son comunidades vegetales donde predominan los pastos con pocos árboles y arbustos, los pastizales naturales se encuentran en regiones semiáridas y de clima templado frío.

Los pastizales en la zona de estudio cubren el 11.6% de la superficie; estos anteriormente fueron bosques pero debido a los cambios de uso del suelo para implementar la agricultura y/o ganadería, fueron desprovistos de su vegetación. Las gramíneas de mayor abundancia son: *Bouteloua hirsuta*, *Hilaria cenchroides*, *Lycurus phalaroides*, *Munlenbergia rigida*, *Bouteloua curtipendula*, *Microchloa kunthii*, *Rhynchelytrum repens* y *Aristida spp* (Cruz, 1992).

En las partes bajas de la cuenca, zonas con alta perturbación y pastoreo, al eliminar la vegetación natural se desarrolla comunidades de vegetación secundaria, como: huizache (*Acacia schaffneri*), tepozán (*Buddleia mexicana*), azumiate (*Baccharis salicifolia*), palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*), jarilla (*Dodonaea viscosa*), manzanita o tini (*Arctostaphylos pungens*), ramonal (*Ceanothus caeruleus*) y pastizales inducidos (Cruz, 1992).

La Figura 15 y Cuadro 32, muestran la distribución del uso de suelo y vegetación dentro de la cuenca de Tiltepec. El uso de suelo de mayor importancia es el área agrícola con 3, 622.24 ha (32.2%), matorral xerófilo y el bosque de encino con 27.4% y 19.4%, respectivamente.

Los usos del suelo agrícola, las zonas de matorral xerófilo y los pastizales cubren 71% de la cuenca y corresponden a terrenos con procesos de erosión y con presencias de cárcavas que están asociadas con la pendiente de los terrenos; originadas por la deforestación y sobrepastoreo especialmente de caprinos (Contreras *et al.* 2003). Estos problemas de erosión han sido atendido por los productores, investigadores y programas de gobierno con acciones de conservación del suelo y agua, reforestaciones, restricciones al pastoreo y conciencia en la protección de los suelos agrícolas y forestales principalmente.

Dentro de las acciones realizadas destaca la construcción de los sistemas de lama bordo por los productores para tener zonas de cultivos, la recuperación de zonas de cárcavas utilizando bordos de piedra, construcción de terrazas de

banco y de formación sucesiva, así como la reglamentación para el uso y manejo de áreas comunales con énfasis en la recuperación de áreas degradadas.

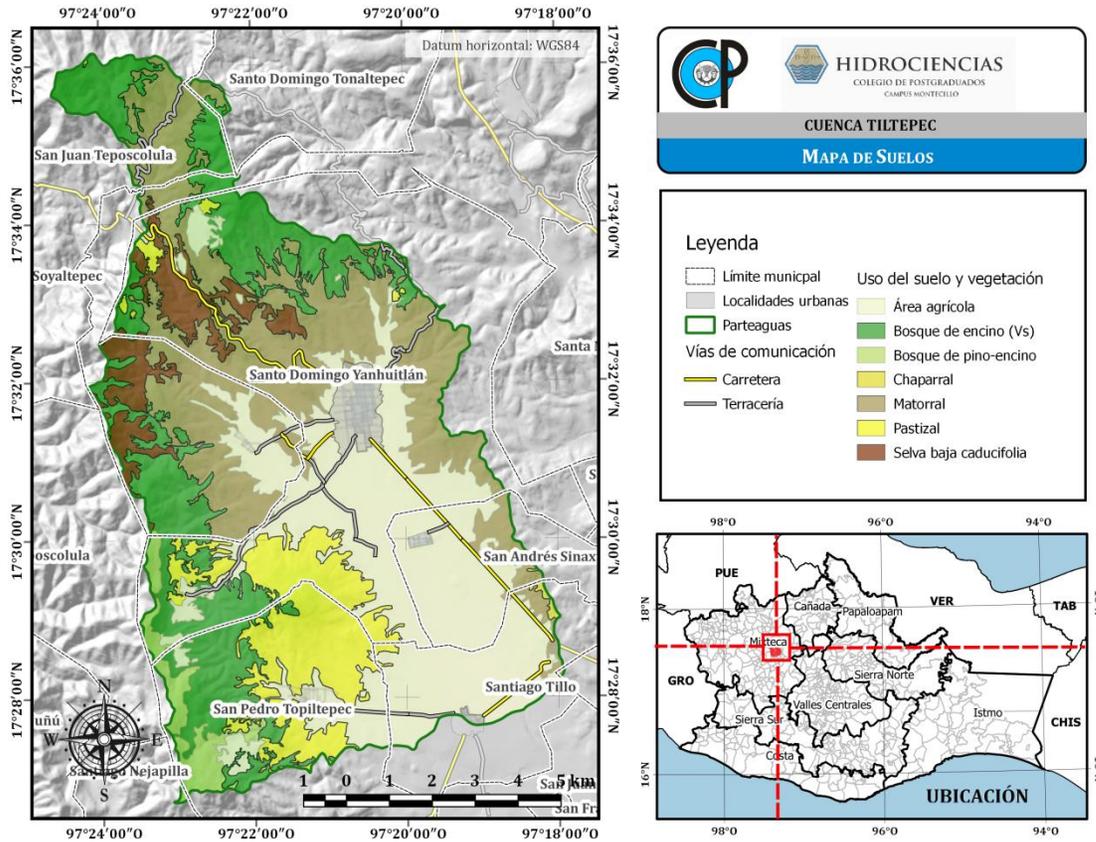


Figura 15. Uso de suelo y vegetación para la cuenca de Tiltepec.

Cuadro 32. Uso de suelo y vegetación en la cuenca de Tiltepec.

Uso del suelo y vegetación	Superficie (ha)	%
Bosque de encino	2,186.4	19.4
Bosque de pino-encino y encino-pino	317.1	2.8
Chaparral	17.0	0.2
Matorral xerófilo	3,081.0	27.4
Selva baja caducifolia	632.6	5.6
Área agrícola	3,622.2	32.2
Asentamientos humanos	96.0	0.9
Pastizales	1,304.7	11.6
Total	11,256.9	100

Fuente: WWF (2010).

6.2.6. Hidrografía

El área de estudio pertenece a la región V Pacífico Sur, región hidrológica 20 Costa Chica – río Verde, cuenca río Atoyac, subcuenca río Sordo; los principales afluentes de la cuenca de Tiltepec son: río Negro, río Chiquito y río Sacagua.

La longitud del cauce principal es de 23.6 km con una pendiente de 2.51% y la longitud total de cauces de 250.2 km. La cuenca presenta un orden de corriente nivel 4 (de acuerdo al criterio geomorfológico Horton), una densidad hidrográfica de 1.05 corrientes por km² y una densidad de drenaje de 2.22 km km⁻². Estas características de la red de drenaje indican que la cuenca presenta un drenaje de regular a bueno, producto de la degradación de las laderas que van conformando las corrientes del sistema de drenaje y que provoca escorrentías con altas capacidad de remoción y transporte de sedimentos (Cuadro 33).

Cuadro 33. Número y orden de corrientes en la cuenca de Tiltepec.

Número de orden		
Criterio Geomorfológico (Horton)		
No. de orden	No. de Corrientes	Longitud Total (km)
1	89	125.32
2	23	65.44
3	5	35.85
4	1	23.59
SUMA	118	250.20

6.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca

La cuenca de Tiltepec comprende parte de los municipios de San Pedro Topiltepec, Santiago Tillo, San Andrés Sinaxtla, Santo Domingo Yanhuitlán, San Bartolo Soyaltepec, San Juan Teposcolula, Santo Domingo Tonaltepec y Santiago Nejapilla. El 77.5% de la superficie de la cuenca se localizan en Santo Domingo Yanhuitlán (46%), San Pedro Topiltepec (16.2%) y San Bartolo

Soyaltepec (15.3%) y el 22.5% restante corresponde al resto de los municipios (Cuadro 34 y Figura 16).

6.3.1. Demografía

La cuenca ocupa 8 municipios y un total de 25 localidades, con una población total de 2,736 habitantes, 52% mujeres y 48% hombres. Las localidades con mayor número de habitantes son Santo Domingo Yanhuitlán (1,002), Santiago Tillo (388), Santa María Tiltepec (220) y San Pedro Añañe (161) (Cuadro 35).

Cuadro 34. Superficie por municipio y dentro de la cuenca de Tiltepec.

Clave de Municipio	Municipio	Superficie del Municipio (ha)	Superficie del Municipio en la cuenca (ha)	Porcentaje (%)
523	Santo Domingo Yanhuitlán	6,963.5	5,178.6	46.0
332	San Pedro Topiltepec	3,282.2	1,822.3	16.2
121	San Bartolo Soyaltepec	7,492.4	1,720.9	15.3
493	Santiago Tillo	1,706.8	874.0	7.8
96	San Andrés Sinaxtla	2,260.8	851.4	7.6
221	San Juan Teposcolula	8,699.7	754.9	6.7
521	Santo Domingo Tonaltepec	2,653.1	48.1	0.4
479	Santiago Nezapilla	2,044.9	5.8	0.1
Total		35,103.4	11,256.0	100.0

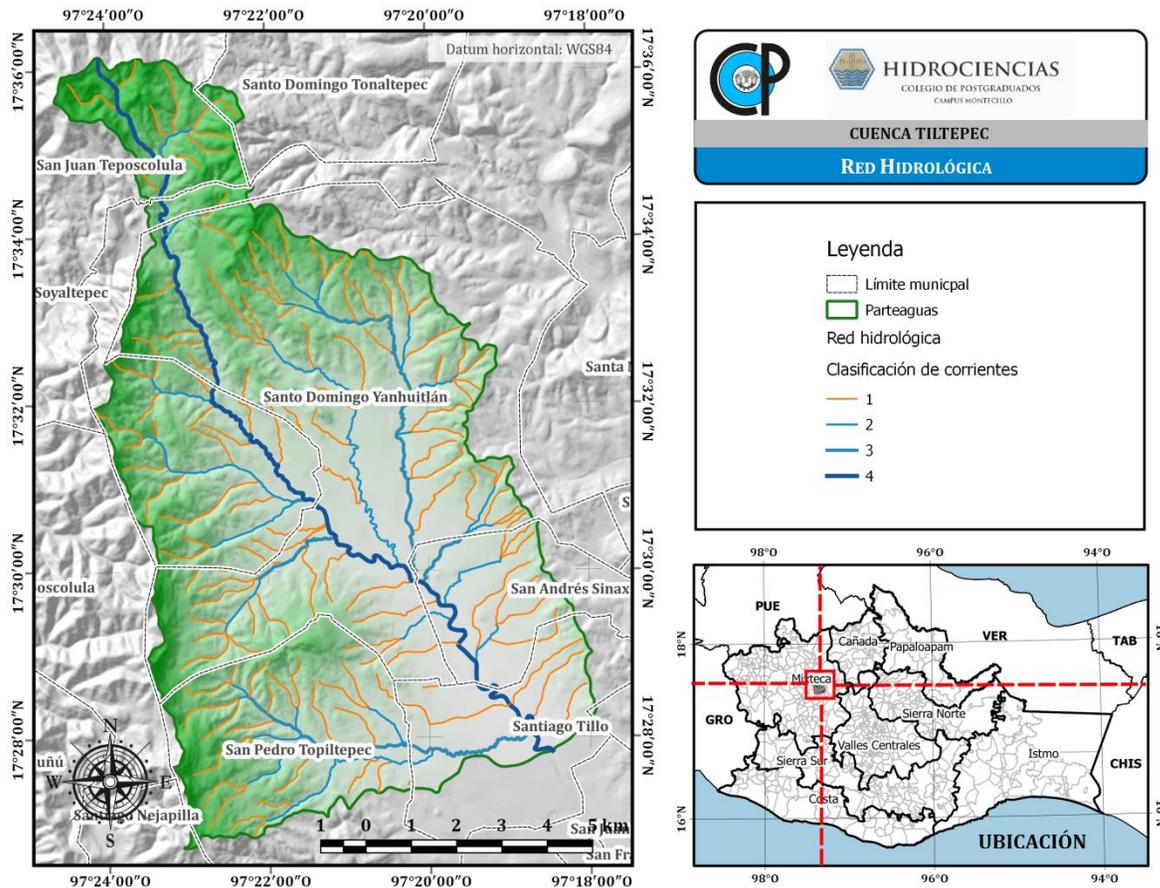


Figura 16. Red hidrológica de la cuenca de Tultepec.

En la mayoría de las localidades ubicadas en la cuenca, existe un mayor número de mujeres, y en la población masculina predominan los adultos mayores, ya que los jóvenes emigran en busca de empleos, razón por la cual existe escasez de mano de obra para las labores del campo, lo que ha originado que no se siembren gran parte de las áreas agrícolas de la cuenca y que algunas zonas con obras de conservación de suelos se encuentren abandonadas y destruyéndose (Cuadro 35).

Cuadro 35. Población de hombres y mujeres por localidad en la cuenca de Tiltepec.

Municipio/Localidad	Población Total (Hab)	Hombres	Mujeres	Porcentaje (%)
San Andrés Sinaxtla				
Santa María Suchixtlán	152	69	83	5.6
La Reforma	14	8	6	0.5
Tapia	6	3	3	0.2
San Bartolo Soyaltepec				
San Pedro Añañé (Añañé)	161	77	84	5.9
San Juan Teposcolula				
Santa María Pozoltepec	75	35	40	2.7
San Pedro Topiltepec				
Santa María Tiltepec	220	117	103	8
Santiago Tillo				
Santiago Tillo	388	177	211	14.2
San Mateo Yucucuy	142	69	73	5.2
Fraccionamiento el Arroyuelo	20	11	9	0.7
Santo Domingo Yanhuitlán				
Santo Domingo Yanhuitlán	1002	469	533	36.6
La Cieneguilla	13	10	3	0.5
El Jazmín	51	27	24	1.9
Tooxi	67	29	38	2.4
Xacañi	157	75	82	5.7
Río Grande	49	25	24	1.8
Xaacahua	41	18	23	1.5
Caja de Agua	18	8	10	0.7
San Sebastián (1era Sección)	75	39	36	2.7
Tijua	16	5	11	0.6
Los Dos Corazones	14	7	7	0.5
Yudayo	4	1	3	0.1
La Laguna	8	3	5	0.3
Barrio de los Arcos	37	15	22	1.4
La Cantera	4	2	2	0.1
Rancho Celerino Avendaño	2	2	0	0.1
TOTAL	2,736	1,301	1,435	

Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda (2010).

6.3.2. Índice de marginación y rezago social

Con base en las carencias de las necesidades básicas de la población, como acceso a la educación, vivienda, distribución de la población e ingresos

monetarios, el 84% de las localidades presentan un grado de marginación alta, 11% marginación media y el 5% marginación baja. El rezago social evaluado a través del rezago educativo, acceso a los servicios de salud, acceso a los servicios básicos en la vivienda y la calidad y espacios en la vivienda, el 63% de las localidades presentan rezago social medio, 32% bajo y 5% muy bajo (Cuadro 36).

Cuadro 36. Grado de marginación y rezago social por localidad para la cuenca de Tiltepec.

Municipio/Localidad	Grado de marginación	Rezago social
San Andrés Sinaxtla		
Santa María Suchixtlán	Bajo	Muy bajo
La Reforma	Alto	Medio
San Bartolo Soyaltepec		
San Pedro Añañé (Añañe)	Alto	Bajo
San Juan Teposcolula		
Santa María Pozoltepec	Alto	Medio
San Pedro Topiltepec		
Santa María Tiltepec	Alto	Medio
Santiago Tillo		
Santiago Tillo	Medio	Bajo
San Mateo Yucucuy	Alto	Medio
Fraccionamiento el Arroyuelo	Alto	Bajo
Santo Domingo Yanhuitlán		
Santo Domingo Yanhuitlán	Medio	Bajo
La Cieneguilla	Alto	Bajo
El Jazmín	Alto	Medio
Tooxi	Alto	Medio
Xacañi	Alto	Medio
Xaacahua	Alto	Medio
San Sebastián (Primera Sección)	Alto	Medio
Tijua	Alto	Medio
Los Dos Corazones	Alto	Medio
Barrio de los Arcos	Alto	Bajo
Río Grande	Alto	Medio

Fuente: CONAPO (2010).

6.3.3. Población económicamente activa y actividades económicas

El Censo de Población y Vivienda 2010 reporta información sobre la población económicamente activa (PEA) e inactiva (PEINAC) para las localidades dentro de la cuenca de Tiltepec. De acuerdo a la población total, la PEA y PEINAC representan aproximadamente el 50% cada una, la PEA el 66% es masculina y el 34% femenina. Las principales actividades económicas que destacan en la zona son las relacionadas con la agricultura, ganadería y comercio.

La Figura 17, muestra la distribución de la PEA y PEINAC por localidad, las localidades con una mayor PEINAC son: San Pedro Añañe, Santiago Tillo, Santa María Pozoltepec, Santa María Tiltepec y Fraccionamiento El Arroyuelo, debido a que son localidades que presentan altos índices de migración masculina, quedándose generalmente mujeres, niños y ancianos.

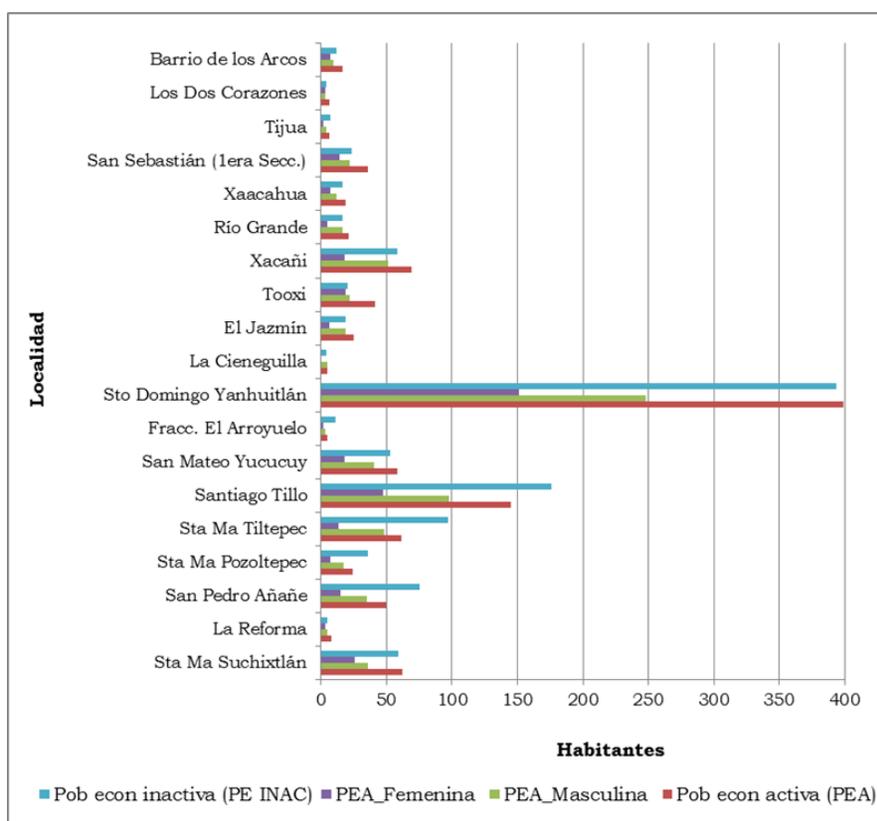


Figura 17. Población económicamente activa por localidad para la cuenca de Tiltepec. Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda (2010).

6.3.4. Viviendas y acceso a los servicios de agua potable y drenaje.

El número de viviendas contabilizadas en la cuenca son 1,532 y sólo el 50% están habitadas, lo que evidencia el grado de migración de los productores de la región en busca de empleo y solo utilizan las viviendas en los periodos de vacaciones o de fiestas regionales; las localidades con mayor número de viviendas son: Santo Domingo Yanhuitlán, Santiago Tillo, Santa María Tiltepec y San Mateo Yucucuy (Figura 18).

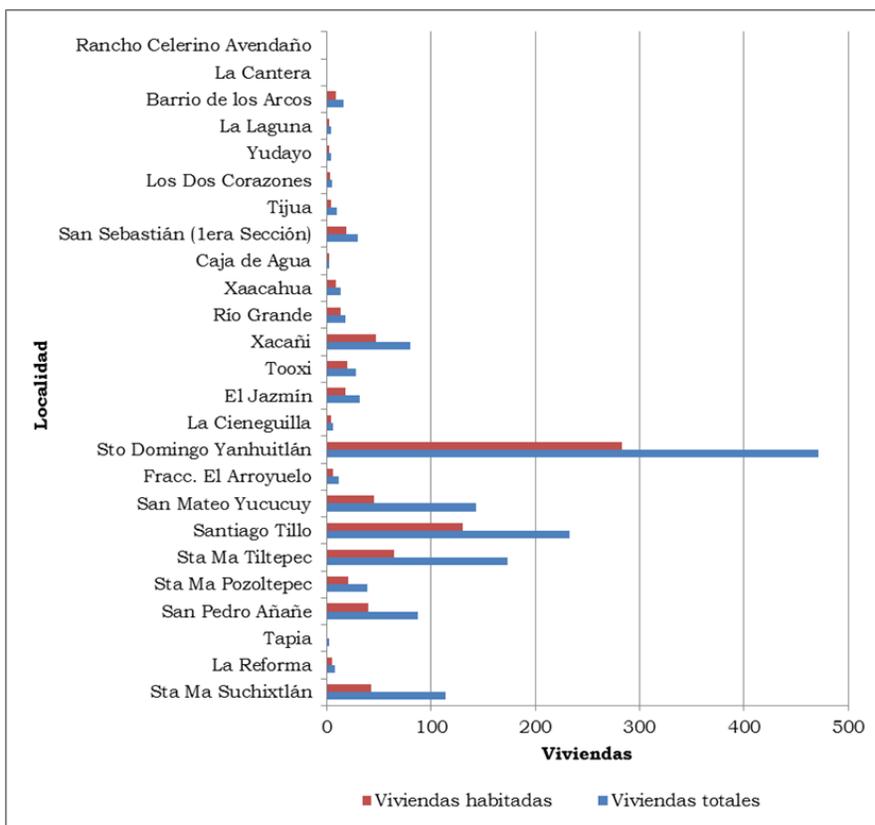


Figura 18. Número de viviendas por localidad para la cuenca de Tiltepec.
Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda (2010).

Del total de viviendas habitadas, el 88% cuenta agua entubada y el 52% con drenaje (Figura 19); la mayoría de las comunidades rurales tienen su propio sistema de suministro y distribución de agua potable de manantiales, además es común el uso de letrina o baños ecológicos.

En las épocas de estiaje se tienen problemas de abasto de agua potable, razón por la cual se han construido con apoyos gubernamentales tanque de almacenamiento y de regulación de agua que les permite abastecer de agua potable a la población en los meses críticos, contando con personal encargado de la distribución de agua, y nombrado por las propias comunidades.

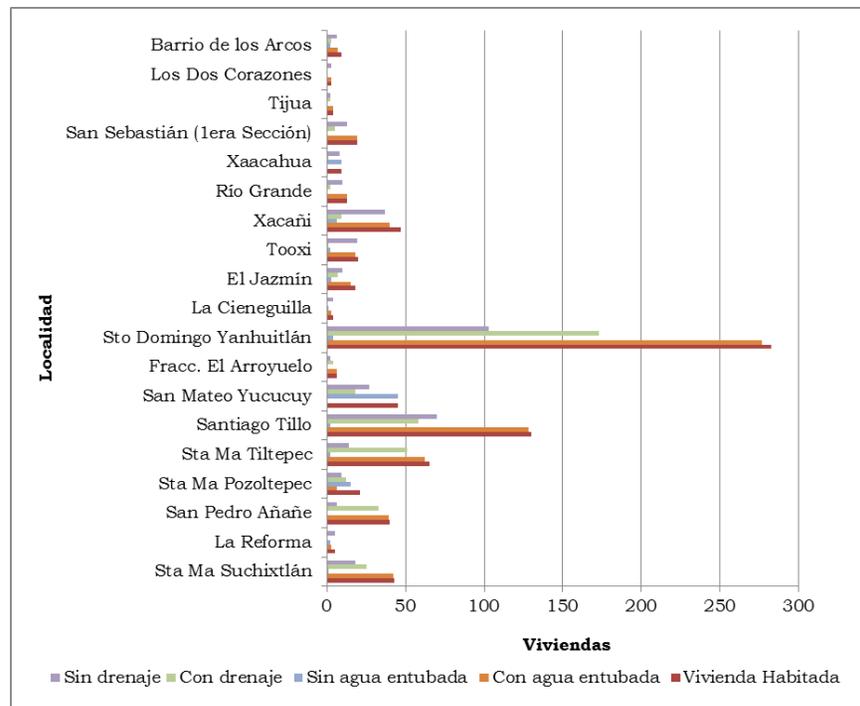


Figura 19. Servicios de agua potable y drenaje por localidad en la cuenca de Tultepec. Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda (2010).

6.3.5. Tenencia de la tierra

El tipo de propiedad que predomina es social, que corresponde a los núcleos agrarios constituidos como ejido y comunidades agrarias. Las tierras de uso común representan el 55%, ejidal 43% y aproximadamente el 2% de la superficie está destinada para uso urbano (Cuadro 37). En cuanto a su legislación, establece como autoridades: la Asamblea, el Comisariado Ejidal o Bienes Comunales y el Consejo de Vigilancia.

Cuadro 37. Tenencia de la tierra por localidad para la cuenca de Tiltepec.

Localidad	Superficie (ha)	Superficie Parcelada (ha)	Superficie Asentamientos Humanos (ha)	Superficie Uso Común (ha)
Santa María Suchixtlán	1,044.05	793.60	19.07	231.38
San Pedro Añañe	1,643.66	526.72	16.79	1,100.14
Santa María Pozoltepec	1,285.79	242.55	6.06	1,037.18
Santa María Tiltepec	2,112.37	690.95	30.54	1,390.89
San Mateo Yucucui	847.79	566.73	48.43	232.63
Santiago Tillo	1,024.01	999.14	24.87	0.00
Santo Domingo Yanhuitlán*	7,007.73	2,611.27	118.04	4,278.42

Fuente: RAN (2016). *Se reporta para el total del municipio

6.3.6. Productividad agrícola y pecuaria

En actividad agrícola predomina en los municipios la siembra de maíz, trigo y avena forrajera. En Santo Domingo Yanhuitlán se reporta una superficie sembrada de 1,656.76 ha, San Andrés Sinaxtla con 1,513.72 ha y Santiago Tillo con 1, 248.53 ha; municipios donde se concentra la mayor parte de la zona agrícola de la cuenca. De acuerdo al SIAP (2015) el valor de producción fue de 10 millones de pesos para Santo Domingo Yanhuitlán, Santiago Tillo con 9.5 millones de pesos y San Andrés Sinaxtla con 9.4 millones de pesos (Figura 20).

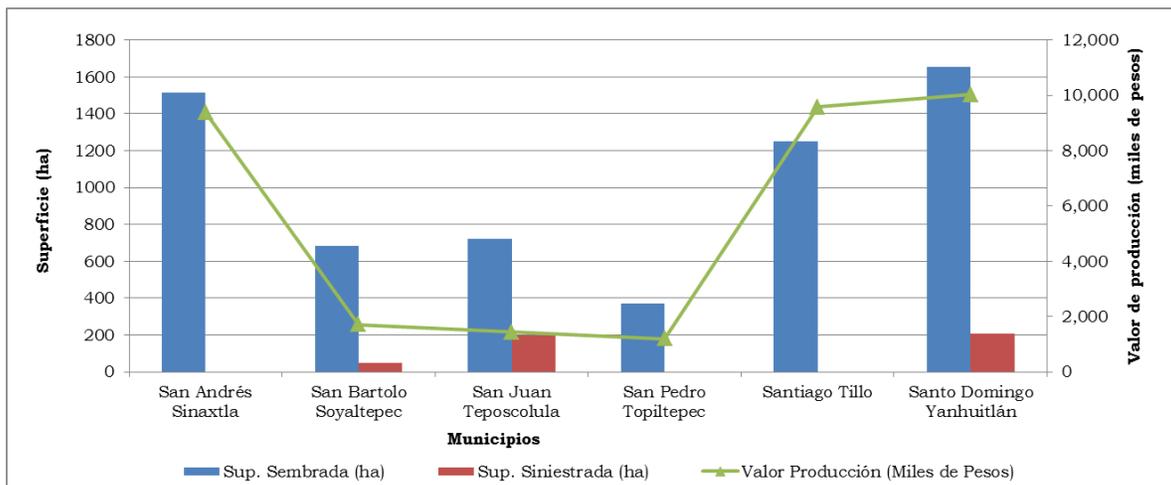


Figura 20. Superficie sembrada y valor de producción del ciclo agrícola PV-OI 2015 para los municipios de la cuenca de Tiltepec.

Fuente: SIAP-SAGARPA (2015).

Para el ciclo agrícola 2015, se reportaron siniestros en tres municipios que variaron de 7 a 27% de la superficie sembrada; los municipios más afectados fueron San Juan, Santo Domingo Yanhuitlán y San Bartolo Soyaltepec (SIAP, 2015).

Los municipios que reportan siembra de cultivos perennes son: San Andrés Sinaxtla, San Bartolo Soyaltepec, San Juan Teposcolula y Santiago Tillo. Siendo San Andrés Sinaxtla el más representativo con 40 ha sembradas y un valor de producción de 289.07 miles de pesos (Figura 21).

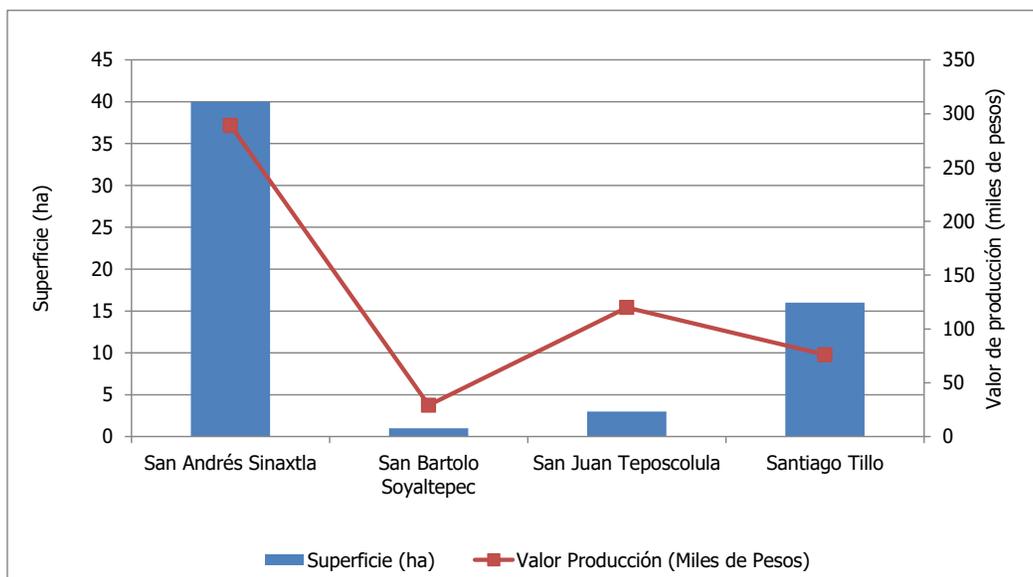


Figura 21. Superficie sembrada y valor de la producción de cultivos perennes (2015) para los municipios de la cuenca de Tiltepec.
Fuente: SIAP-SAGARPA (2015).

Como parte de la actividad pecuaria se producen y comercializan bovinos, porcinos, ovinos, caprinos y aves de corral. Los municipios con mayor importancia en la actividad pecuaria son: San Bartolo Soyaltepec que produce y comercializa el 57.1% de porcinos, 27.9% de caprinos y el 21.9% de ovinos y Santo Domingo Yanhuitlán que produce el 21.7% de bovinos y el 30.4% de aves de corral (Cuadro 38).

Cuadro 38. Producción pecuaria para los municipios de la cuenca de Tiltepec 2015.

Producción (Toneladas)						
Municipio	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	Aves de corral	Total
San Andrés Sinaxtla	11	4	9	4	5	33
San Bartolo Soyaltepec	59	121	23	36	15	254
San Juan Teposcolula	61	28	23	26	4	142
San Pedro Topiltepec	33	9	20	20	6	88
Santiago Tillo	8	5	1	0	13	27
Santo Domingo Yanhuitlán	67	23	8	8	21	127
Santo Domingo Tonaltepec	48	2	15	20	2	87
Santiago Nejapilla	22	20	6	15	3	66
Total	309	212	105	129	69	824

Fuente: SIAP-SAGARPA (2015b).

En cuanto al valor de producción pecuaria, se reporta para el año 2015 un total de 27,106 miles de pesos; San Bartolo Soyaltepec con el 29.5%, San Juan Teposcolula el 17.3% y Santo Domingo Yanhuitlan el 15.1%. La producción bovina genera el 36.4% del valor de la producción, seguido de la producción porcina con el 21.7%, caprinos (18.2%), ovinos (14.9%) y aves de corral (8.9%) (Cuadro 39).

Cuadro 39. Valor de producción de la actividad pecuaria para los municipios de la cuenca de Tiltepec.

Valor de producción (miles de pesos)						
Municipio	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	Aves de corral	Total
San Andrés Sinaxtla	348	119	357	155	190	1,169
San Bartolo Soyaltepec	1,887	3,391	872	1,366	477	7,993
San Juan Teposcolula	1,910	768	870	972	179	4,699
San Pedro Topiltepec	1,026	244	773	775	201	3,019
Santiago Tillo	297	138	49	0	455	939
Santo Domingo Yanhuitlán	2,207	617	303	302	670	4,099
Santo Domingo Tonaltepec	1,463	73	578	779	108	3,001
Santiago Nejapilla	717	535	231	583	121	2,187
Total	9,855	5,885	4,033	4,932	2,401	27,106

Fuente: SIAP-SAGARPA (2015b).

A pesar los problemas de sobrepastoreo y degradación de los suelos que origina la producción caprina, especialmente en terrenos comunales, sigue siendo una actividad pecuaria importante. Sin embargo, se han establecido reglas para

regular la producción caprina, razón por la cual en el municipio de Santiago Tillo no se reportan volúmenes, ni valor de la producción (Cuadro 39).

6.4. Diagnóstico de la cuenca y microcuenca de Tiltepec

El diagnóstico de la cuenca permitió conocer el estado en el que se encuentra la cuenca y microcuenca de Tiltepec. A continuación se describe los trabajos de recuperación de suelos que se han realizado para la conservación del suelo y agua; las áreas susceptibles a erosionarse, áreas con potencial de retención de sedimentos y la distribución del escurrimiento superficial.

6.4.1. Recuperación de suelos en la cuenca de Tiltepec

El 71% de la superficie de la cuenca de Tiltepec tiene usos del suelo clasificados como chaparral, matorrales xerofitos, zonas agrícolas y pastizales y el resto está cubierto por bosques de pino, pino encino y selva baja caducifolia. En la mayor parte de los usos del suelo se presentan zonas con problemas de erosión y especialmente con presencia de cárcavas que aparecen distribuidas en la cuenca.

A través del tiempo, se han realizado acciones de conservación para reducir la tasa de erosión de los suelos y recuperar las áreas erosionadas. Los productores han establecido estrategias de recuperación con sistemas de lama bordo para crear zonas de producción de cultivos, establecimiento de terrazas de banco y de formación sucesiva, que en conjunto cubren una superficie de 814 ha, que representan el 7.23% del área total de la cuenca (Cuadro 40 y Figura 22).

Cuadro 40. Inventario de obras y prácticas de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec.

Tipo de obra de conservación	Superficie (ha)	Porcentaje
Lama bordo	47.4	5.8
Terrazas de banco	490.3	60.2
Terrazas de formación sucesiva sucesiva	276.8	34
Total	814.5	

En la Figura 23 se muestran imágenes de las terrazas de banco, terrazas de formación sucesiva, recuperación de zonas degradadas con cárcavas, el establecimiento de zanjas bordo y los sistemas de lama bordo ubicadas en la cuenca. Existen fuertes diferencias en el manejo y mantenimiento de las obras de conservación en suelos de áreas agrícolas y forestales entre parcelas de los productores o las áreas de bienes comunales.

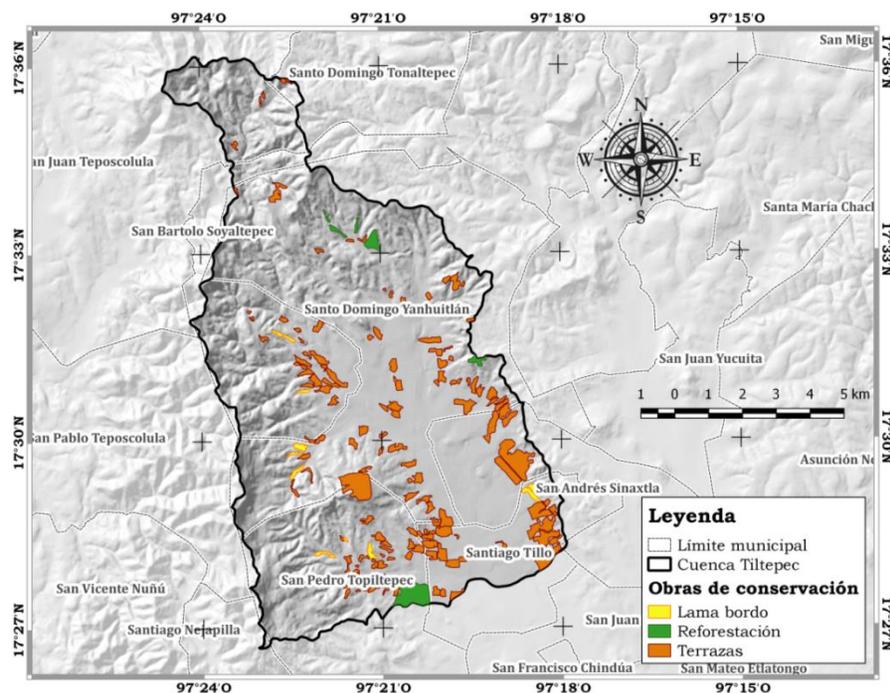


Figura 22. Localización de obras de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec.

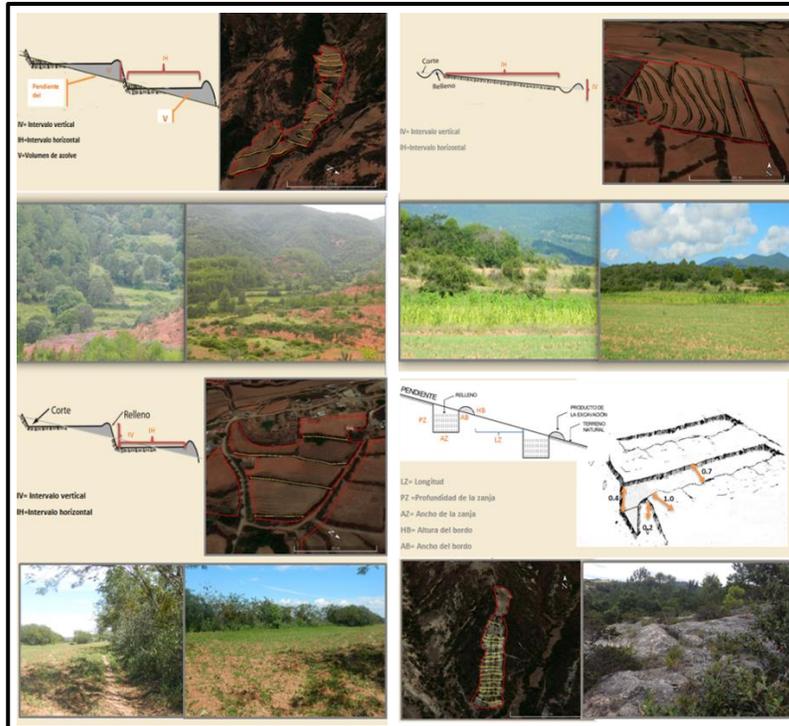


Figura 23. Identificación y georreferenciación de las obras de conservación en la cuenca de Tiltepec.

En las visitas de campo se identificaron evidencias del establecimiento del sistema lama bordo por parte de los productores para recuperar zonas con cárcavas y tener zonas de cultivo (Figura 24 a), que actualmente se siembran parcialmente, y algunas parcelas están abandonadas, sin mantenimiento y con alto riesgo de falla (Figura 24 b). Existen zonas de cárcavas que han sido recuperadas con apoyo gubernamental, utilizando maquinaria para la formación de terrazas de banco, en terrenos comunales que no se han aprovechado para la producción; las cuales se han destruido y reparado nuevamente pero que siguen abandonadas (Figura 24 c).

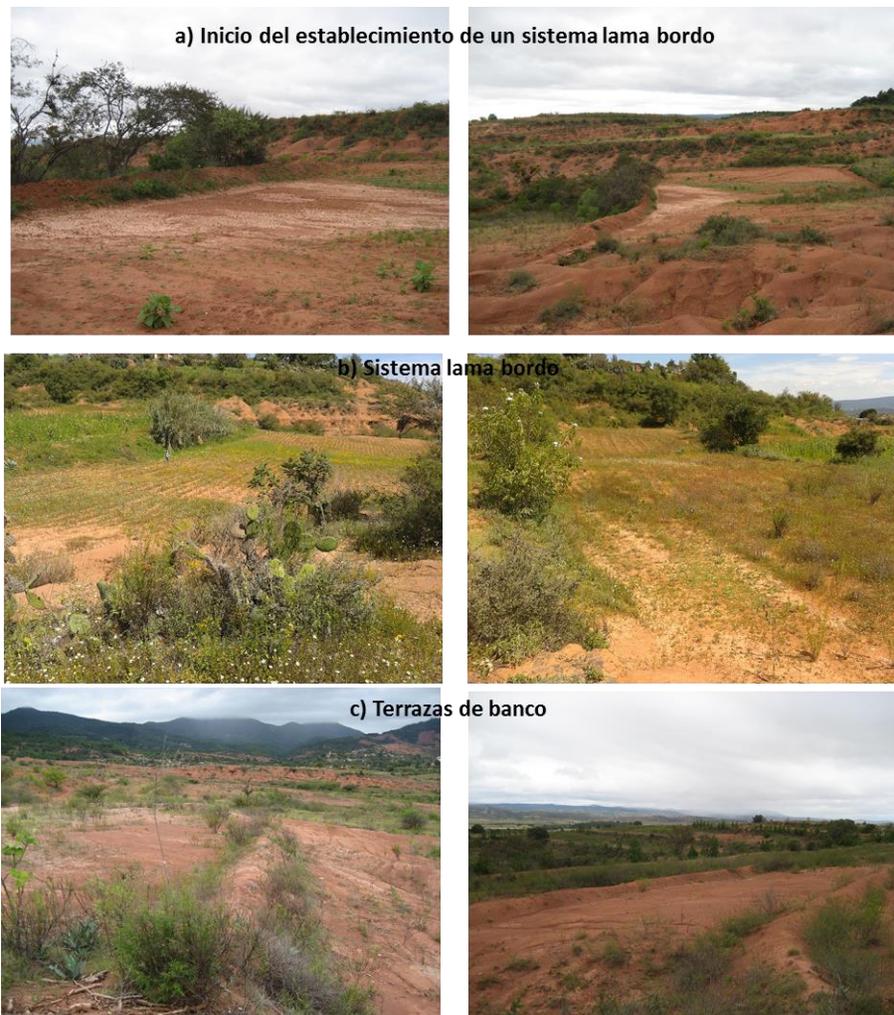


Figura 24. Principales acciones de conservación de suelos en la cuenca de Tiltepec.

Las causas del abandono de las parcelas de producción pueden atribuirse a los siniestros frecuentes por efecto de la sequía y por la fuerte migración de productores que buscan fuentes de ingreso, situación más evidente en los terrenos de propiedad comunal.

Complementariamente, se han realizado acciones de reforestación, regulación de pastoreo de ganado caprino, control de la tala de árboles, reglamentación para la extracción de leña, entre otras acciones. Estas acciones son controladas por las autoridades de bienes comunales y los gobiernos municipales pero desafortunadamente no existe una regulación similar en

todas las localidades. En la cuenca prevalecen zonas donde el ordenamiento para el manejo de recursos naturales es mínimo y otras localidades que son ejemplo regional del manejo de sus recursos en áreas comunales como el caso de Santa María Tiltepec.

Las áreas degradadas se han reducido en 560 ha en el periodo de 1998 a 2014 en periodos húmedos que se atribuyen a las acciones de manejo de los agostaderos y las reforestaciones realizadas en diferentes partes de la cuenca y que se traducen en un servicio ecosistémicos de las obras de conservación y reforestaciones (Cuadro 41 y Figura 25).

Cuadro 41. Reducción de la superficie degradada en la cuenca de Tiltepec

Época	Año	Superficie (ha)
Húmeda	1998	2,229.21
Húmeda	2014	1,668.88

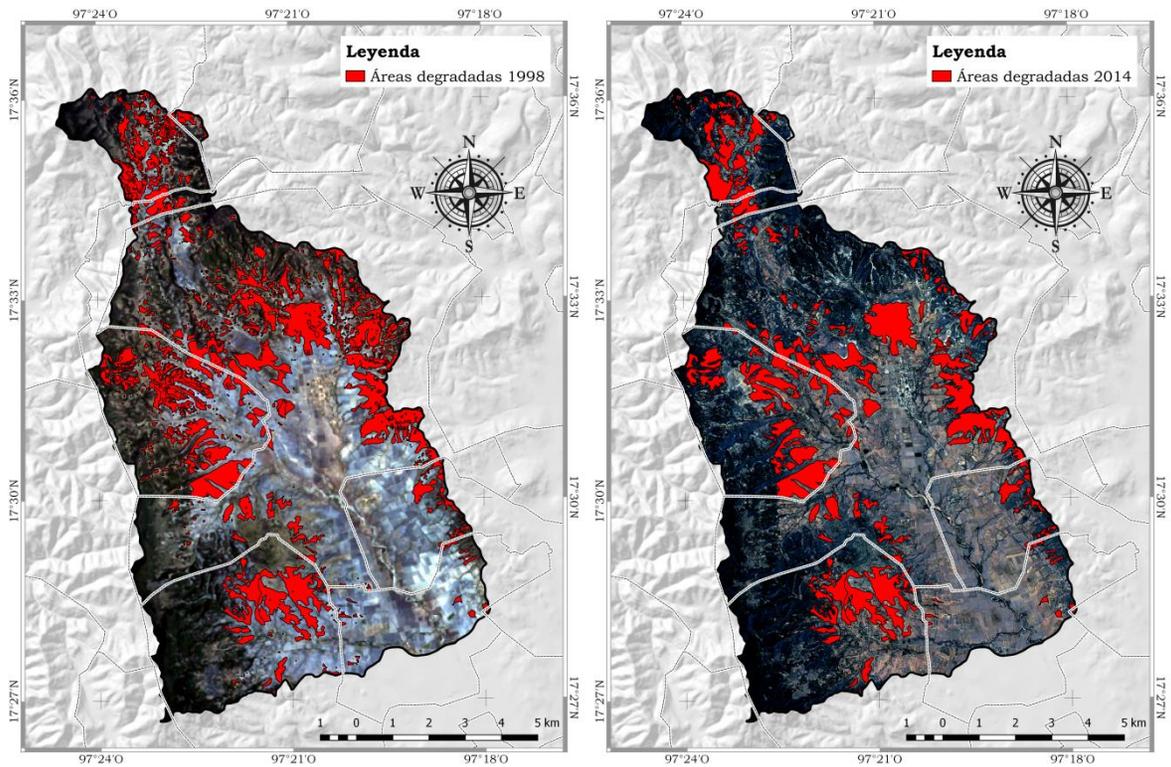


Figura 25. Comparación de las áreas degradadas 1998 y 2014, periodo húmedo.

El conservar en buen estado y uso las obras de conservación tiene beneficios importantes en los servicios ecosistémicos ya que captan sedimentos y se convierten en áreas para la producción de alimentos que son servicios de provisión que ofertan las obras. Por esta razón, es importante rehabilitar las obras de conservación construidas por la población, autoridades de bienes comunales y agentes municipales; ya que de los servicios ecosistémicos con mayor deterioro en la región Mixteca, es la regulación de la erosión del suelo el que mayor impacto tiene en la producción de alimentos, la calidad y cantidad de agua, como lo reporta la WWF (2015).

6.4.2. Producción de agua con el modelo InVEST: cuenca de Tultepec

De acuerdo al modelo InVEST, la lámina estimada de agua escurrida para la cuenca de Tultepec es de 166.1 mm, que corresponde al 17% de la precipitación media anual (Cuadro 42).

Cuadro 42. Producción de agua con InVEST para la cuenca de Tultepec.

Parámetro	Valor
Superficie (ha)	11,257.0
Precipitación media (mm)	973.3
ETP (mm)	1,065.9
Eta (mm)	806.8
Producción de agua (mm)	166.1

La distribución espacial de la producción de agua está determinada en función al uso y cobertura del suelo (Figura 26), la profundidad de raíces, la evapotranspiración actual y la distribución espacial de la precipitación. Las zonas con mayor producción de agua se presentan en la parte norte de la cuenca, donde predomina una cobertura vegetal de matorral, mayor precipitación y mayor relieve. Las áreas con menor producción de agua se tienen en las planicies de la cuenca; mientras las partes con vegetación arbustiva reportan la mayor producción de agua o servicios de provisión del agua en la cuenca. Las áreas agrícolas y los bosques (pino-encino y encino-pino) son las de menor producción debido a que reportan mayor demanda evapotranspirativa.

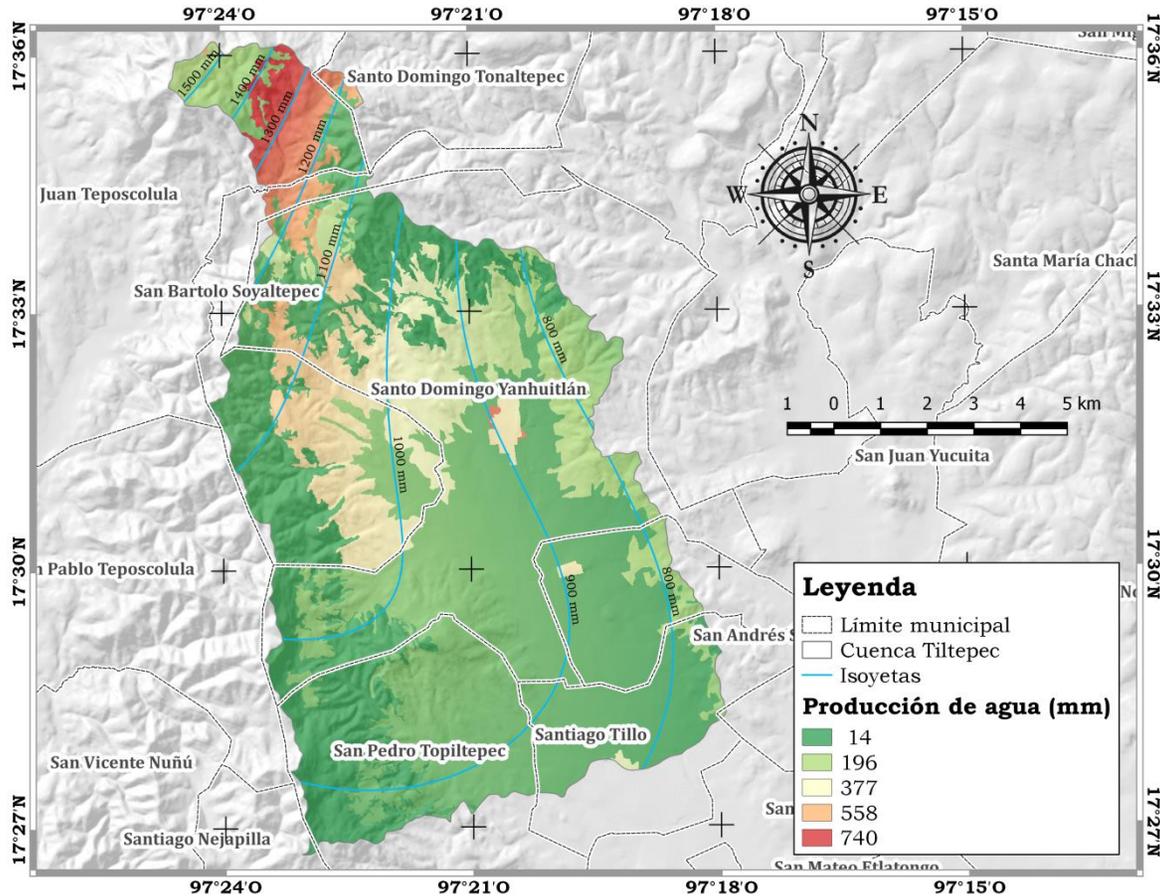


Figura 26. Producción de agua con InVEST para la cuenca de Tiltepec.

6.4.3. Producción de sedimentos con el modelo InVEST: cuenca de Tiltepec

InVEST estimó una producción de 37,277.60 toneladas de sedimentos y una erosión de 418,012.83 toneladas para la cuenca de Tiltepec. El servicio ecosistémico que proporciona la vegetación se muestra en los sedimentos retenidos que es de 963,934.39 t cuenca⁻¹ (Cuadro 43).

Cuadro 43. Producción de sedimentos con InVEST para la cuenca de Tiltepec.

Parámetro	t cuenca ⁻¹
Sedimentos retenidos	963,934.39
Sedimentos exportados	37,277.60
USLE	418,012.83

La distribución espacial de las obras de conservación muestra que a pesar de los esfuerzos realizados por productores e instancias de gobierno, aún permanecen cerca de 1,614 ha degradadas que corresponden a más del 14% de la superficie de la cuenca (Figura 27 a).

InVEST (erosión (USLE), sedimentos retenidos y exportados) muestra que erosión de los suelos varía de 22 a 377 t ha⁻¹ (Figura 27 b) que está asociada con áreas degradadas y las zonas de exportación de sedimentos (Figura 27 d). Por el contrario, las zonas con mayor vegetación reportan valores más altos en la retención de sedimentos, lo que muestra la eficiencia de la vegetación en la retención de sedimentos (Figura 27 c). Cabe mencionar, que las obras de conservación como: lama bordo y terrazas (de banco y formación sucesiva) también retienen sedimentos, además de que permiten establecer sitios más aptos para la agricultura y la ganadería.

6.4.4. Producción de agua con el modelo InVEST: microcuenca de Tiltepec

La lámina estimada de agua escurrida para la microcuenca de Tiltepec es de 81.3 mm, que corresponde al 8.6% de la precipitación media anual (Cuadro 44).

Cuadro 44. Producción de agua con InVEST para la microcuenca de Tiltepec.

Parámetro	Valor
Superficie (ha)	968.21
Precipitación media (mm)	936.1
ETP (mm)	1,323.5
Eta (mm)	853.6
Producción de agua (mm)	81.3

De acuerdo con la Figura 28, la distribución de la producción de agua está relacionada con el uso y cobertura del suelo; por tanto, los sitios sin vegetación aparente y con presencia de cárcavas son los que reportan mayor producción de agua, con coeficientes de escurrimientos de 0.18 y un coeficiente de infiltración de 0.72; en contraste en las zonas de bosques de pino encino se tiene la menor producción de agua superficial con un coeficiente de escurrimiento de 0.02 y un coeficiente de infiltración de 0.98 que indica la eficiencia del ecosistema para la recarga de los acuíferos y la producción de agua en los manantiales que son los que ofertan el agua para población y que es considerado como un servicio ecosistémico de provisión de agua.

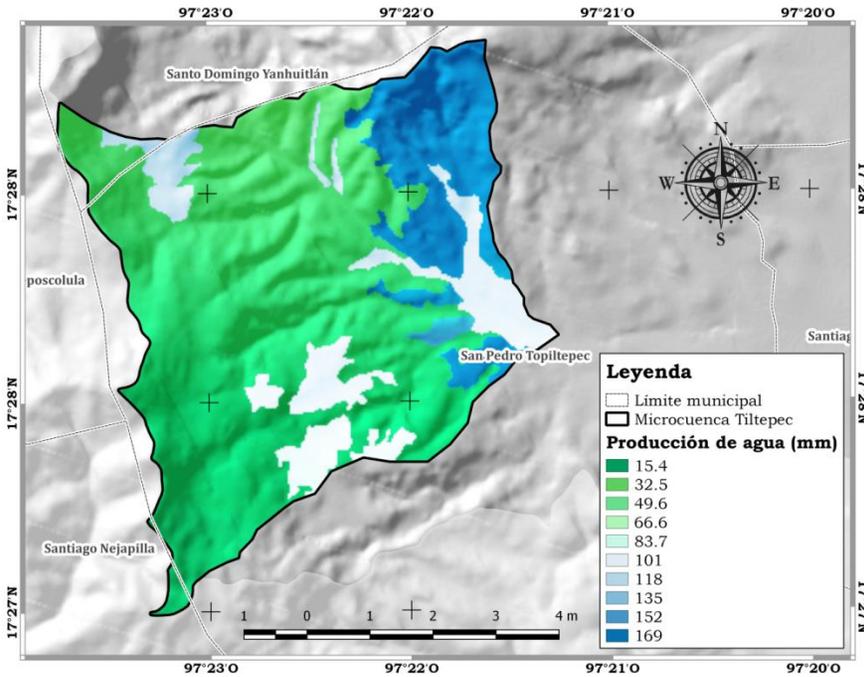


Figura 28. Producción de agua con InVEST para la microcuenca de Tiltepec.

**6.4.5. Producción de sedimentos con el modelo InVEST:
microcuenca de Tiltepec**

La producción de sedimentos exportados para la microcuenca de Tiltepec fue 15,775.05 t cuenca⁻¹ y una erosión de 114,212.74 t cuenca⁻¹, la cobertura vegetal proporciona un servicio ecosistémico en la retención de sedimentos de 369,955.77 t cuenca⁻¹ (Cuadro 45).

Cuadro 45. Producción de sedimentos con InVEST para la microcuenca de Tiltepec.

Parámetro	t cuenca ⁻¹
Sedimentos retenidos	369,955.77
Sedimentos exportados	15,775.05
USLE	114,212.74

La Figura 29 a, muestra la distribución espacial de las áreas con obras de conservación y áreas degradadas que cubren 86 ha y representan el 9% del total de la microcuenca (968 ha); la parte alta de la microcuenca está cubierta de vegetación ya que se ha reglamentado el uso de las áreas forestales por la

población; sin embargo, se aprecian pequeños predios donde se realiza agricultura.

Los valores de erosión del suelo estimados con el USLE varían en un rango de 18 a 72 t pixel⁻¹ (Figura 29 b) y existe una relación entre las áreas de mayor erosión y los sedimentos exportados (Figura 29 d) (1.6 a 6.5 t pixel⁻¹) y las áreas degradadas identificadas en la microcuenca de Tiltepec de acuerdo con el modelo InVEST. En cuanto a la retención de sedimentos (Figura 29 c), los valores más altos resultaron para las partes altas de la microcuenca, que es donde se ubican los ecosistemas de pino-encino (encino-pino) y que son las zonas que proveen de los servicios ecosistémico de regulación de la erosión de los suelos de acuerdo con el modelo InVEST.

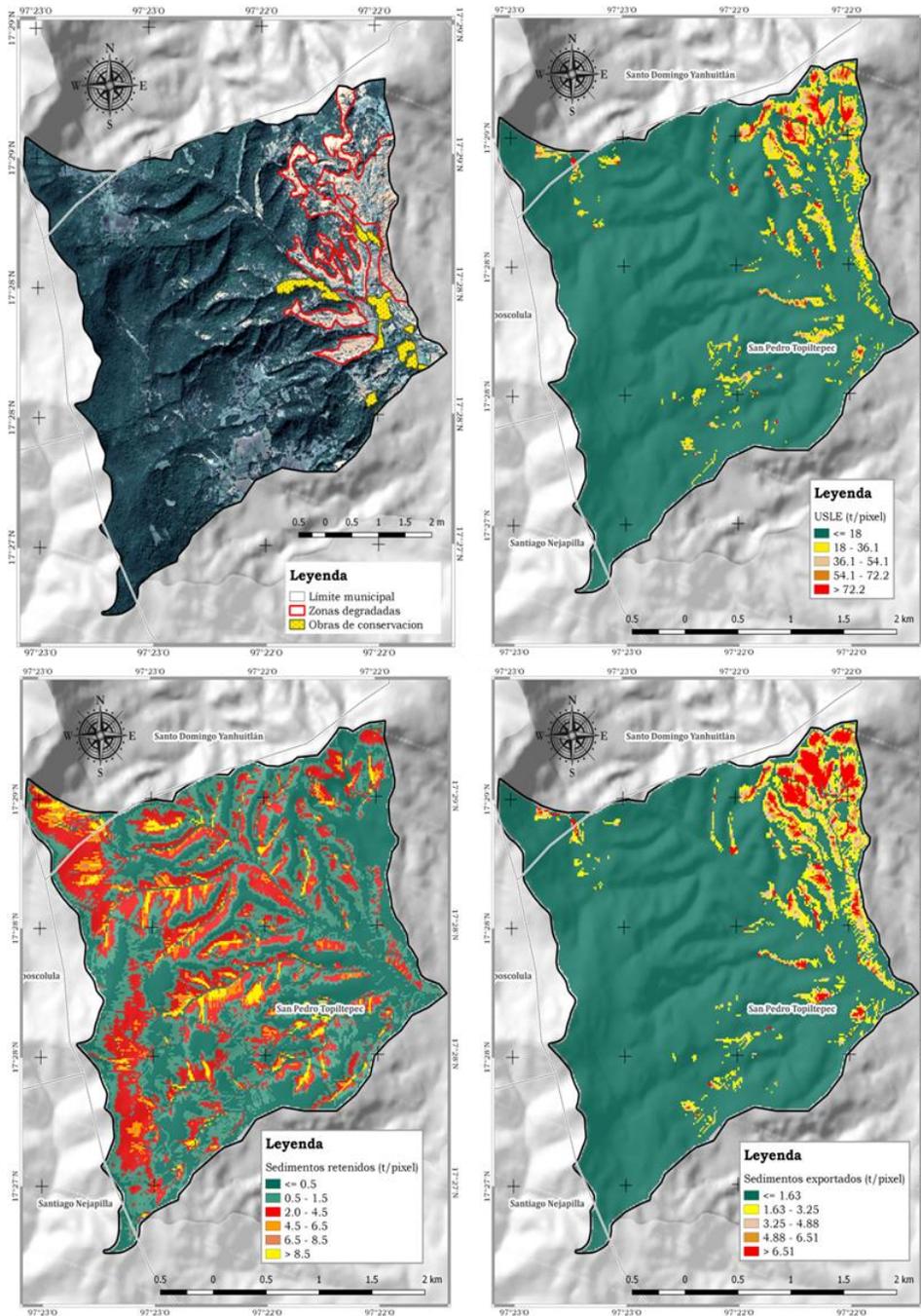


Figura 29. Resultados InVEST para el modelo de producción de sedimentos en la microcuenca de Tiltepec. a) Obras de conservación y áreas degradadas; b) Erosión del suelo estimado con USLE; c) Sedimentos retenidos y d) Sedimentos exportados.

7. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

En este apartado se describe la metodología para analizar los servicios ecosistémicos de cuenca y microcuenca de Tiltepec.

7.1. Servicios ecosistémicos en la cuenca de Tiltepec

Para la cuenca de Tiltepec se analizaron los servicios de provisión y regulación para la producción de alimentos, la recuperación de terrenos degradados con acciones de conservación de suelo; y la producción de agua y sedimentos se estimaron con el modelo InVEST.

7.1.1. Producción de alimentos

Se recopiló la información de superficie sembrada, siniestrada, rendimientos, producción y valor de producción agrícola para el periodo 2005-2015 por municipio. Esta información se adecuó en forma proporcional a la superficie del municipio que está dentro de la cuenca. El número de cabezas de ganado de acuerdo al VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2009) y el valor de producción ganadera para el periodo 2012-2015 se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017) para los municipios dentro de la cuenca y en forma proporcional a la superficie dentro de la misma.

Con la información proporcionada se generaron índices de productividad agrícola y ganadera que permitieron analizar el servicio ecosistémico de producción de alimentos.

Productividad agrícola. Se estimó considerando la superficie sembrada, cosechada y siniestrada, la producción anual, los rendimientos y el precio medio rural y el valor de la producción de los cultivos de frijol, maíz y trigo para el periodo 2005 a 2015; que son los cultivos más representativos dentro del área de estudio y base de la economía familiar y local. La información fue

valorada de manera proporcional a la superficie que se encuentra dentro del área de estudio.

Se realizó un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la superficie sembrada, siniestrada, la producción anual, los rendimientos en el periodo de 2005 a 2015 para definir los riesgos en la producción de alimentos que prevalecen en los diferentes municipios y su relación a la variación temporal de la precipitación en el tiempo y cómo influye está en la producción anual y la productividad de los cultivos.

Productividad ganadera. Se obtuvo considerando el número de cabezas de ganado de las diferentes especies para obtener el volumen de producción promedio por municipio. Con los precios de los productos pecuarios que prevalecen en la zona se estimó el valor de la producción en pesos por unidad de superficie en la cuenca. Se analizó la producción animal por especies y por municipios y se determinó el impacto de la producción ganadera en la economía regional.

7.2. Servicios ecosistémico de la microcuenca de Tiltepec

La microcuenca de Tiltepec cuenta con una superficie de 968.21 ha, delimitada a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (INEGI, 2015). Se localiza dentro de las coordenadas 17°26'40.2" y 17°29'9.96" de Latitud Norte; y 97°21'12.96" y 97°23'31.2" de Longitud Oeste con una altura media de 2,520 msnm y un rango de pendientes de 2% al 40%, con una pendiente media de 25% (Figura 30).

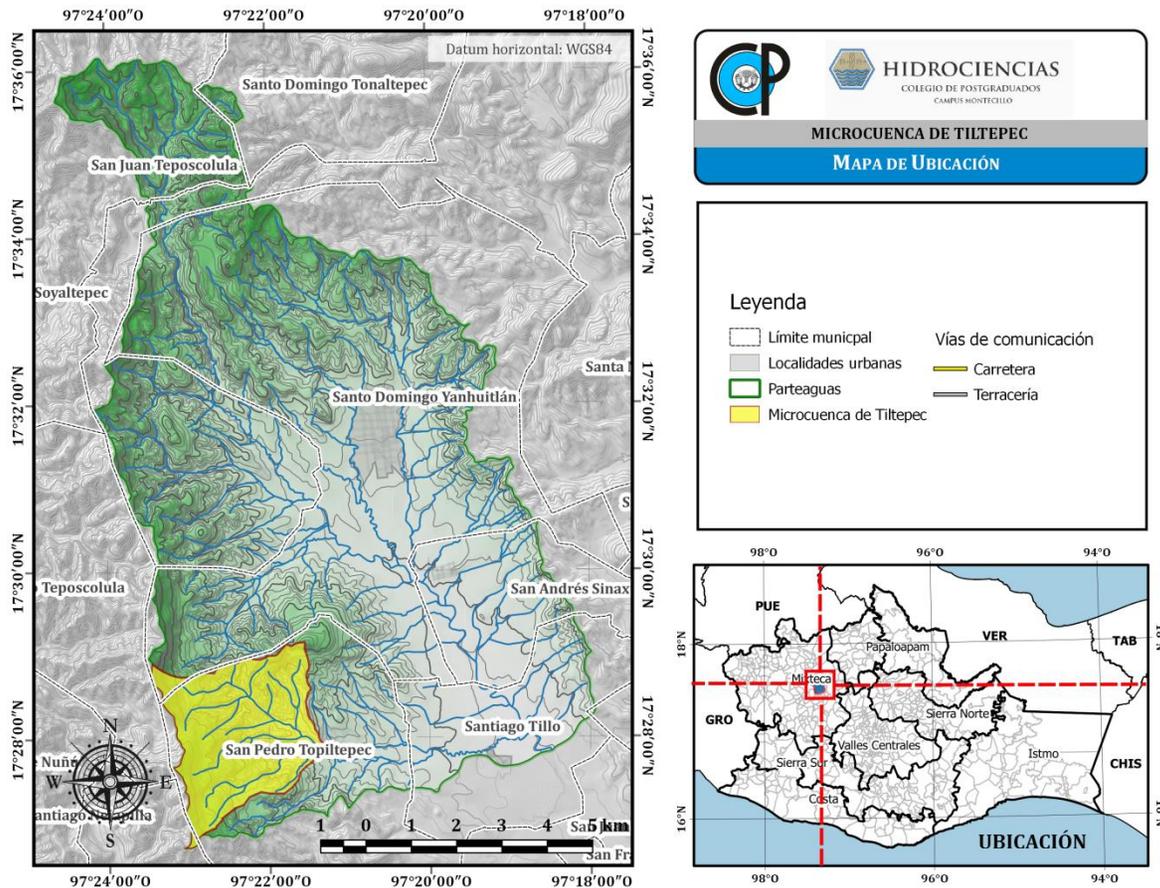


Figura 30. Mapa de ubicación de la microcuenca de Tultepec.

En el uso del suelo y vegetación en la microcuenca de Tultepec predominan los bosques templados de pino-encino y encino-pino ocupando aproximadamente el 70% de la superficie total, seguido por matorral xerófilo (11%), pastizal (6%), área agrícola (8%) y sin vegetación aparente (6%). De acuerdo al INEGI, predominan rocas sedimentarias e ígneas extrusivas. Dentro de las sedimentarias se encuentran: la limolita, arenisca y conglomerados; y de origen ígneo, la andesita; los suelos que se presentan son: luvisoles, phaeozem y vertisoles (Figura 31).

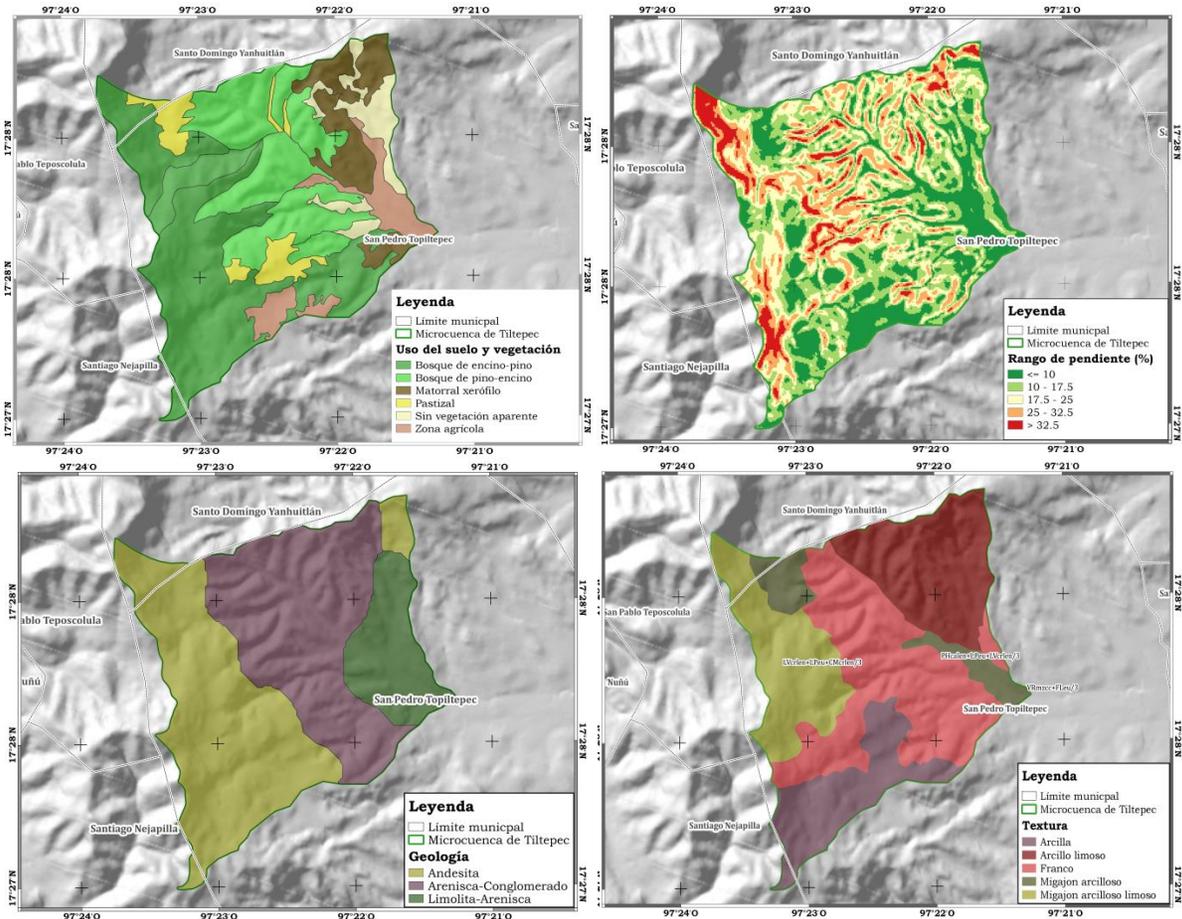


Figura 31. Caracterización biofísica de la microcuenca de Tultepec.

Los servicios ecosistémicos que se analizaron para esta microcuenca son: producción de agua, leña y forraje mediante encuestas y trabajo de campo; y, producción de agua y sedimentos con el modelo MUSLE, de acuerdo con la siguiente metodología.

7.2.1. Producción de leña

El análisis de la oferta y demanda de leña se realizó para la localidad de Santa María Tultepec. Para conocer la demanda, se aplicaron encuestas (Figura 32) a los habitantes de la localidad para obtener información sobre la importancia de su uso en sus hogares en comparación con otros tipos de combustibles, especies que ocupa, obtención en campo, especies que prefieren y por qué, costo por carga, usos frecuentes, fuentes de obtención, frecuencia de

extracción, entre otros aspectos; con la finalidad conocer la situación actual y la importancia de este servicio de provisión para los habitantes.

							
PROYECTO							
MONITOREO DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA. PRODUCCIÓN DE LEÑA							
LOCALIDAD		MUNICIPIO		DISTRITO			

1. ¿Qué tipo de combustibles emplea y cual es el uso que les da?							
TIPO	NIVEL DE IMPORTANCIA¹	USOS					
Leña							
Ramas secas							
Gas LP							
Carbón							
Electricidad							
Olotes							
Otros (especifique)							
¹ 1=siempre; 2=regular; 3=nunca							
2. ¿Qué especies ocupa para leña?							
3. ¿De las especies mencionadas en la pregunta anterior cuál prefiere y por qué?							
4. ¿Cuánto ocupa de leña a la semana?							
Medida	Cantidad	Equivalencias en Kg.	Num de veces recolecta				
Tercios							
Carga							
Trozos							

Figura 32. Encuesta para conocer la demanda de leña.

Para determinar el tamaño de muestra se utilizó la Ecuación 15.

$$n = \frac{NZ^2pq}{d^2(N - 1) + Z^2pq} \quad 15$$

Dónde: n : es el tamaño de muestra, N : el tamaño de la población, Z : el nivel de confianza 95% = 1.96 ($z^2 = 3.8416$), p : es la proporción de la población (<25% cuando se conoce distribución y >50% cuando es imposible determinarla), q : la diferencial de p ($1 - p$) = % y d : es el coeficiente de confiabilidad, error estándar (10%).

Posteriormente, se analizó la información de las entrevistas para determinar el tipo de combustibles que ocupan y su nivel de importancia, usos, plantas que ocupan y prefieren, medios de obtención, personas dentro de la familia que se encargan de proveer la leña, parajes de recolección y distancias que recorren, periodicidad de consumo, costo de la leña, costo anual del consumo de leña y valor estimado anual del consumo de leña.

La cuantificación de leña en campo se realizó mediante un muestreo aleatorio estratificado que consistió en dividir el área de estudios en subgrupos o estratos, en este caso por tipos de vegetación. Se tomó la información generada WWF (2010); posteriormente, en cada tipo de vegetación se realizó un muestreo aleatorio simple para conocer la producción de leña (oferta), cuantificando únicamente el material seco (ramas, troncos o árboles muertos) (Figura 33), se procedió de la siguiente manera:

1. Para especies arbóreas los muestreos se realizaron en cuadrantes de 10 x 10 m y para arbustivas en cuadrantes de 5 x 5 m. Se recolectó todo el material que pudiera servir como leña (ramas y/o troncos secos) y se pesó para conocer la producción de leña por unidad de superficie.
2. De cada sitio se tomó una muestra por especie para secarlo en laboratorio a una temperatura de 60 °C en una estufa Thermo scientific™ durante aproximadamente 15 días o hasta que las muestras llegaran a un peso constante.

3. Finalmente, se determinó la relación peso seco/peso húmedo y la densidad de cada material, con la finalidad de convertir la producción de leña a metros cúbicos por unidad de superficie.



Figura 33. Material y aspecto del muestreo de leña en campo y procesamiento de muestras en laboratorio.

El contenido de humedad ($u\%$), expresa la masa de agua presente en relación con la masa de la madera verde (Ecuación 16) (Fernández *et al.*, 2014).

$$u\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100 \quad 16$$

Dónde: Ph es el peso en fresco de la madera y Ps: peso de la madera totalmente seco.

Para determinar la densidad del material leñoso se realizó en base al Teorema de Arquímedes (Ecuación 17) (Fernández *et al.*, 2014).

$$P_c = \frac{m_c}{m^*_c} * P_a \quad 17$$

Dónde: P_c es la densidad del cuerpo (g cm^{-3}); P_a densidad del agua (g cm^{-3}); m_c masa del cuerpo (g) y m^*_c es la masa relativa al valor de empuje del cuerpo de agua (g).

7.2.2. Producción de forraje

Para determinar la producción de forraje y coeficientes de agostadero, se utilizó el procedimiento siguiente:

1. En una imagen SPOT 7 con resolución de 1.5 m se identificaron previamente los sitios de agostadero, en función al tipo de vegetación (pastizales), y áreas degradadas donde se presentan áreas pequeñas que se ocupan para pastoreo y donde hay presencia de herbáceas.
2. Se trazó una línea de 20 m con orientación oriente-poniente en cada sitio del agostadero (Figura 34).
3. Sobre cada línea se ubicaron 6 cuadrantes de 0.25 m x 0.25 m, se tomaron tres fotografías por cuadrante para determinar la cobertura vegetal, mediante clasificación supervisada de imágenes digitales; posteriormente, se cortó el material vegetal en tres cuadrantes (inicio, medio y final).

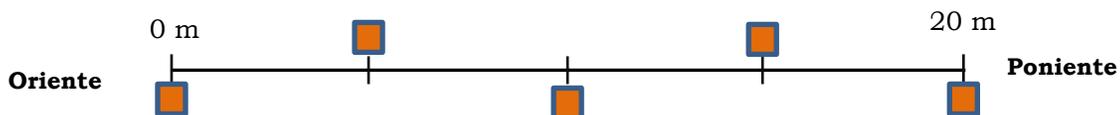


Figura 34. Línea de muestreo para determinar cobertura vegetal y producción de forraje.

4. Para el corte del material vegetal se separó por especies y sólo la producción del presente año (2015), se colectó en bolsas de papel para su posterior procesamiento. Adicionalmente, se tomaron muestras de la vegetación presente en cada sitio para su posterior identificación (Figura 35).

5. Se aplicaron encuestas a los habitantes de Santa María Tiltepec para realizar un inventario ganadero y conocer el manejo que le dan al ganado y a los agostaderos.
6. En laboratorio, se procedió a pesar las muestras para obtener el peso húmedo y posteriormente secarlas en estufa a 65°C por 72 hr hasta obtener un peso constante (peso en seco); con esto se determinó el contenido de humedad y materia seca del forraje disponible.



Figura 35. Material y aspecto del muestreo de forraje en campo y procesamiento en laboratorio.

7.2.2.1. Procesamiento de imágenes digitales.

La determinación de la cobertura vegetal se realizó con el software QGIS, mediante clasificación supervisada, de las fotografías tomadas en cada sitio (Figura 36). Para cada fotografía se realizó una corrección ortogonal para corregir distorsiones geométricas y de escala. Posteriormente, se recortaron para tener imágenes de 0.25 x 0.25 m, correspondiente a la superficie muestreada, y se establecieron zonas de entrenamiento para identificar de manera general cinco tipos de objetos: cobertura vegetal verde y seca, materia

orgánica, piedra y suelo desnudo. Por cada sitio se realizó un promedio de los objetos observados en cada cuadrante, con la finalidad de identificar la condición del sitio de acuerdo a la cobertura, y la susceptibilidad a presentar problemas de erosión por la baja cobertura vegetal.

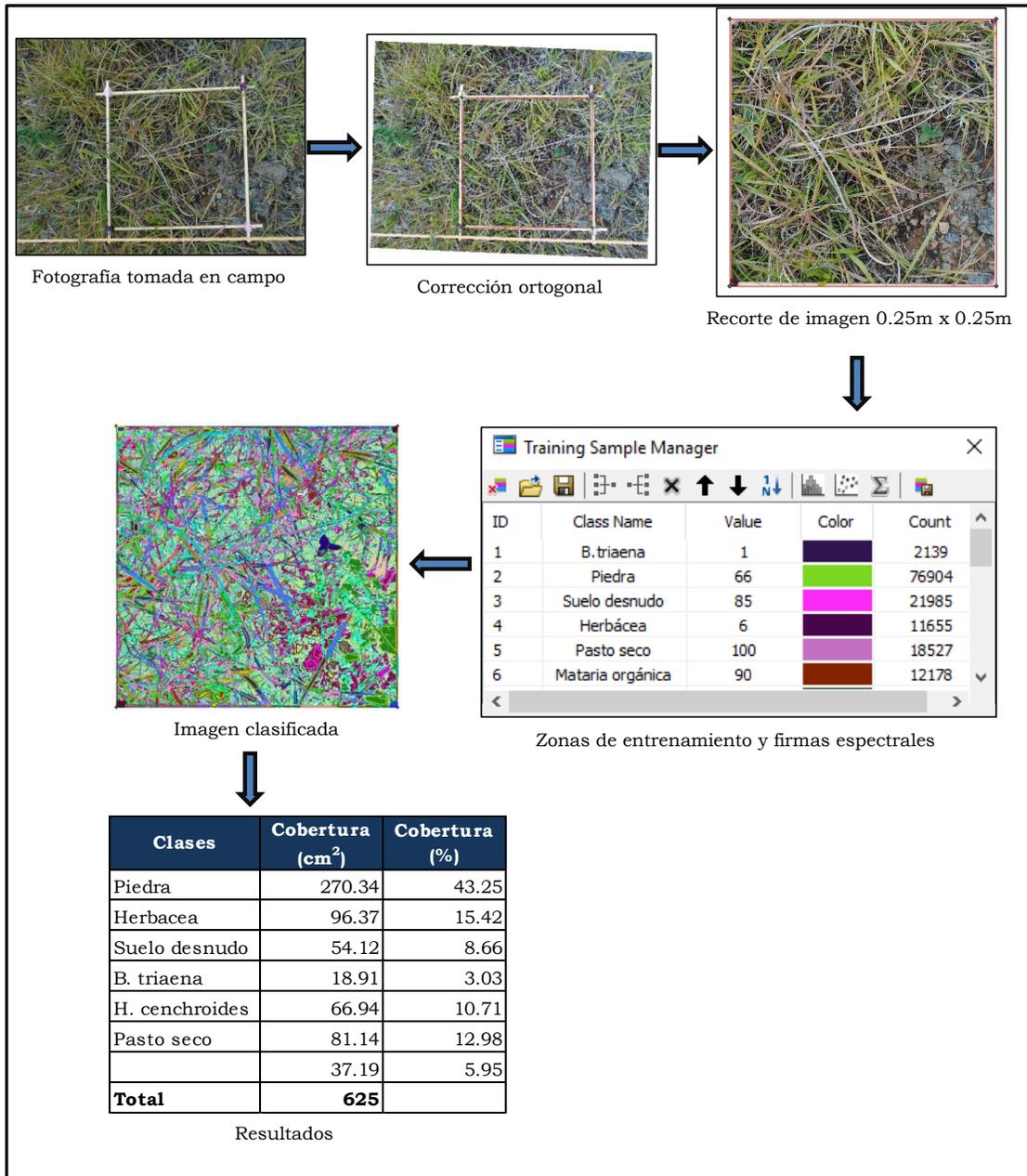


Figura 36. Diagrama para la determinación de la cobertura vegetal en fotografías digitales.

7.2.2.2. Producción de agua para consumo humano

Se estimó la demanda actual de agua y para el año 2030 para la localidad de Santa María Tiltepec, tomando como referencia el consumo doméstico per cápita (Cuadro 46) publicado por CONAGUA (2007), la población reportada en el Censo de Población y Vivienda, INEGI (2010) y la tasa de crecimiento total (Cuadro 47) para el estado de Oaxaca publicada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010-2030) para proyectar la población.

Cuadro 46. Consumo doméstico per cápita en función al tipo de clima.

Temperatura media anual (°C)	Tipo de Clima	Consumo por clase socioeconómica (l hab ⁻¹ día ⁻¹)		
		Residencial	Media	Popular
Mayor que 22	Cálido	400	230	185
De 18 a 22	Semicálido	300	205	130
De 12 a 17.9	Templado	250	195	100
De 5 a 11.9	Semifrío	250	195	100

Fuente: CONAGUA (2007).

Cuadro 47. Tasa de crecimiento total para el Estado de Oaxaca.

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Tasa de crecimiento total	0.82	0.78	0.74	0.70	0.67	0.64	0.61	0.58	0.56	0.53	0.50
Año	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
Tasa de crecimiento total	0.48	0.46	0.44	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	

Fuente: CONAPO (2015).

Para estimar la población para el año 2030 se empleó la Ecuación 18.

$$P_{i+n} = P_i * (1 + Tc)^n \quad 18$$

Dónde: P_i : población conocida al inicio del periodo (año i) (hab), P_{i+n} : Población “ n ” años después (hab), Tc : tasa de crecimiento (adimensional) y n : número de periodos que hay entre P_i y P_{i+n} .

Teniendo el consumo per cápita de agua y la población, se obtuvo el gasto medio, que es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio (Ecuación 19).

$$Q_{med} = \frac{D * P}{86,400} \quad 19$$

Dónde: Q_{med} : gasto medio diario ($l s^{-1}$); D: dotación ($l hab^{-1} día^{-1}$); P: número de habitantes; 86,400 $s día^{-1}$

Los gastos máximo diario y máximo horario, son los requeridos para satisfacer las necesidades de la población en un día de máximo consumo, y hora de máximo consumo en un año tipo, respectivamente (CONAGUA, 2007) (Ecuaciones 20 y 21).

$$Q_{Md} = CV_d * Q_{med} \quad 20$$

$$Q_{Mh} = CV_h * Q_{Md} \quad 21$$

Dónde: Q_{Md} : gasto máximo diario, ($l s^{-1}$); Q_{Mh} : gasto máximo horario ($l s^{-1}$); CV_d : coeficiente de variación diaria; CV_h : coeficiente de variación horaria; Q_{med} : gasto medio diario ($l s^{-1}$).

Los coeficientes de variación se derivan de la fluctuación de la demanda debido a las diversas actividades dentro de las poblaciones (Cuadro 48).

Cuadro 48. Coeficientes de variación.

Coeficiente de variación	Valor
Coeficiente de variación diaria (CVd)	1.40
Coeficiente de variación horaria (CVh)	1.55

Fuente: CONAGUA (2007).

Para cuantificar la oferta de agua se identificaron las fuentes de suministro de agua potable para la población, como es el caso de manantiales y depósitos de almacenamiento. Se aforaron y cubicaron para conocer la producción y capacidad de almacenamiento de agua (Figura 37).

Los aforos se realizaron mediante el método volumétrico, que consiste en medir el tiempo en que se llena un recipiente de volumen conocido. El gasto se determinó mediante la Ecuación 22.

$$Q = \frac{V}{t} \quad 22$$

Dónde: Q: es el gasto ($l\ s^{-1}$); V: es el volumen del recipiente (L); y t: el tiempo en que se llena el recipiente en segundos.



Figura 37. Fuentes de abastecimiento de agua potable. Santa María Tiltepec.

Finalmente se realizó un balance entre las entradas y salidas de agua para conocer si la oferta cubre la demanda de agua tanto para uso doméstico como para otros usos dentro de las localidades o si existe la necesidad de construir obras de almacenamiento y regulación del agua.

7.2.2.3. Producción de sedimentos (MUSLE)

Para realizar el análisis de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM o MUSLE por sus siglas en inglés), se presenta un diagrama de flujo de la información requerida y procesos considerados en el modelo (Figura 43).

1. Los datos de precipitación se tomaron del INIFAP para la estación Santo Domingo Yanhuitlán y durante 2015.
2. Para determinar el factor K ponderado (Figura 38), se aplicó la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978). Se realizaron muestreos de suelo en campo y posteriormente se enviaron a laboratorio para determinar sus parámetros físicos, como: textura, porcentaje de arenas, limos y arcillas, y materia orgánica.

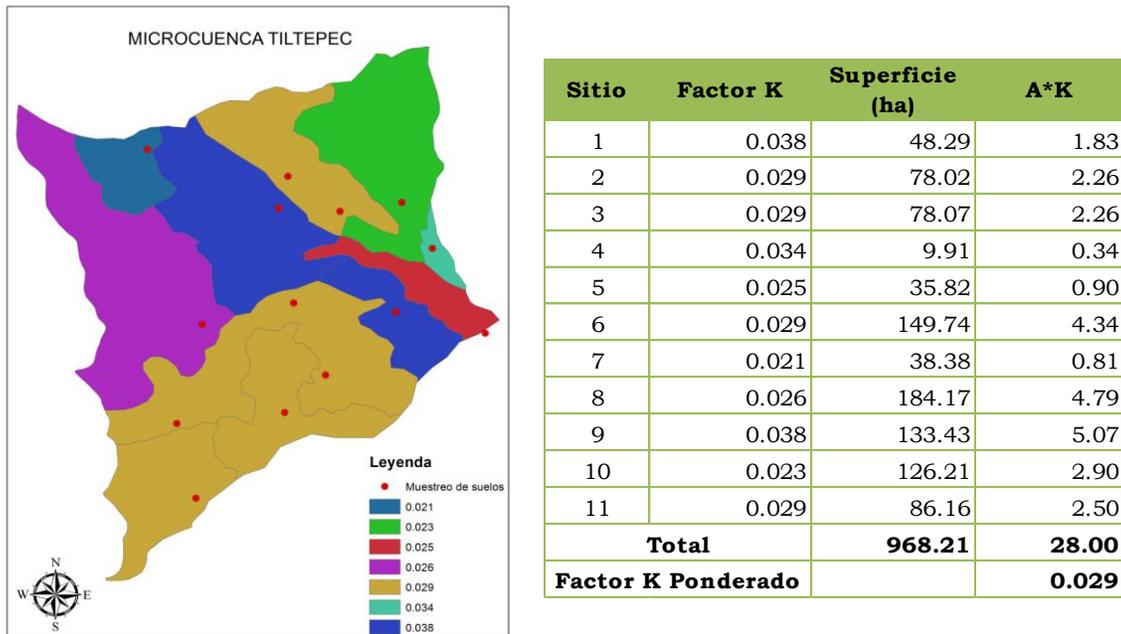


Figura 38. Factor K para la microcuenca de Tiltepec

3. Para el factor LS, se utilizó el modelo de Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015),

con una resolución espacial de 15 m por píxel, obteniéndose el valor de LS ponderado para la microcuenca (Figura 39).

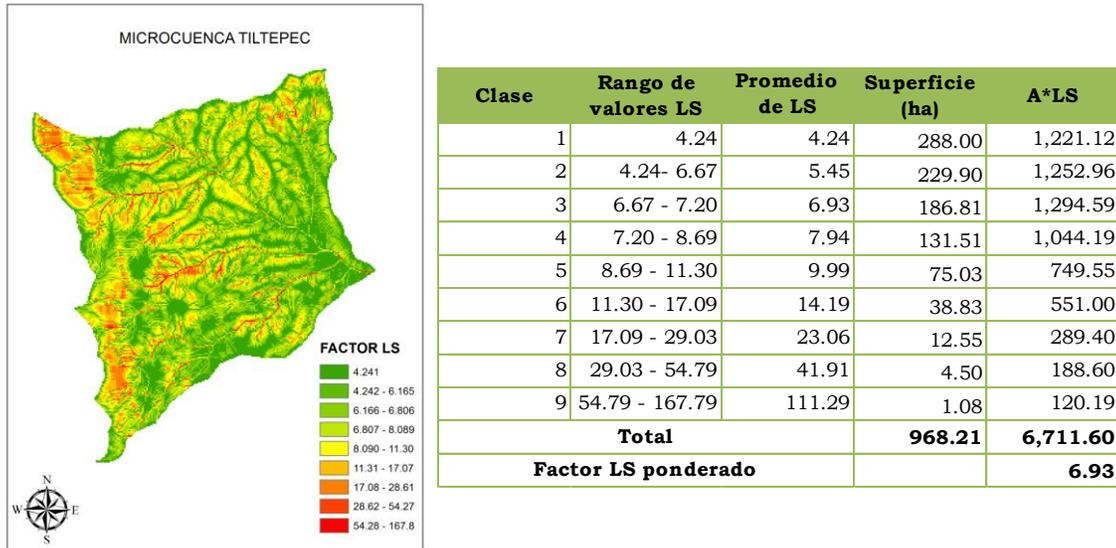
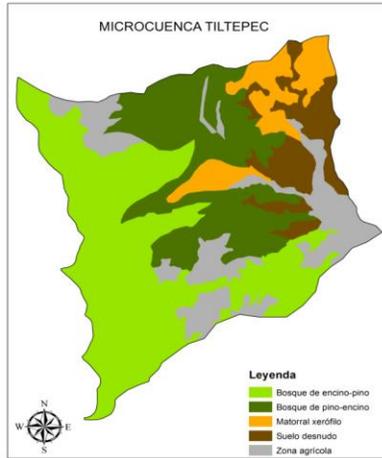


Figura 39. Factor LS para la microcuenca de Tiltepec

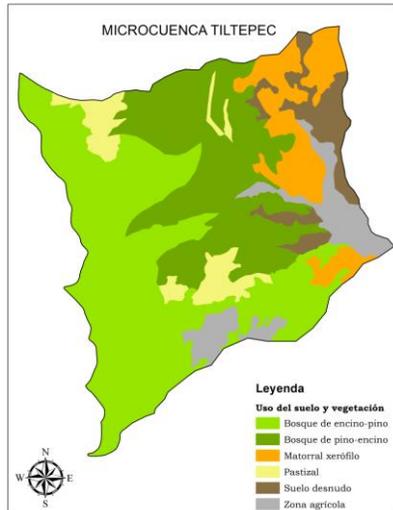
- El valor del factor C, se definió con base a lo propuesto Kirkby y Morgan (1980) y Figueroa *et al.* (1991) y se ponderó en función a la superficie por tipo de uso del suelo con base a la clasificación realiza por la WWF, (2010). El valor ponderado de curva numérica se asignó por uso del suelo, tratamiento, condición hidrológica y grupo hidrológico del suelo; los valores se definieron para condiciones anteriores (1984) y actuales (2015) (Figura 40 y Figura 41).



Condición antes			
Uso de suelo	Factor C	Superficie (ha)	A*C
Bosque de encino-pino	0.004	403.35	1.61
Bosque de pino-encino	0.004	239.20	0.96
Matorral xerófilo	0.2	82.25	16.45
Suelo desnudo	0.9	89.37	80.43
Zona agrícola	0.6	154.04	92.42
Total		968.21	191.88
Factor C ponderado=			0.198

Uso de suelo	Tratamiento	Condición hidrológica	Grupo de suelos	CN II	Superficie (ha)	A*CN
Bosque de encino-pino		Mala	C	77	403.35	31,057.95
Bosque de pino-encino		Mala	C	77	239.20	18,418.40
Matorral xerófilo		Mala	C	77	82.25	6,333.25
Suelo desnudo			C	91	89.37	8,132.67
Zona agrícola	Surcos rectos	Buena	C	85	154.04	13,093.40
Total					968.21	77,035.67
CN II ponderado=						79.57

Figura 40. Factor C y CN II para la microcuenca de Tiltepec: condiciones anteriores.



Uso de suelo	Factor C	Condición actual Superficie	
		(ha)	A*C
Bosque de encino-pino	0.003	410.9	1.23
Bosque de pino-encino	0.003	261.45	0.78
Matorral xerófilo	0.1	103.36	10.34
Pastizal	0.1	58.21	5.82
Suelo desnudo	0.9	60.82	54.74
Zona agrícola	0.5	73.47	36.74
Total		968.21	109.65
Factor C ponderado=			0.11

Uso de suelo	Tratamiento	Condición hidrológica	Grupo de suelos	CN II	Superficie (ha)	A*CN
Bosque de encino-pino		Buena	C	70	410.9	28,763.00
Bosque de pino-encino		Buena	C	70	261.45	18,301.50
Matorral xerófilo		Mala	C	77	103.36	7,958.72
Pastizal		Mala	C	86	58.21	5,006.06
Suelo desnudo			C	91	60.82	5,534.62
Zona agrícola	Surcos rectos	Buena	C	85	73.47	6,244.95
Total					968.21	71,808.85
CN II ponderado=						74.17

Figura 41. Factor C y CN II para la microcuenca de Tiltepec: condiciones actuales.

- Para el factor de prácticas de manejo “P”, los valores se asignaron en base a lo propuesto por Kirkby y Morgan (1980) y Figueroa *et al.* (1991) ponderando, con base en la superficie por tipo de obra y sin obra (Figura 42).



Obra	Factor P	Superficie (ha)	A*P
Terrazas de formación sucesiva*	0.6	3.96	2.38
Terrazas de banco	0.1	6.47	0.65
Lama bordo	0.1	5.64	0.56
Sin obra	1	952.14	952.14
Total		968.21	955.73
Factor P ponderado=			0.987

Figura 42. Factor de prácticas de manejo para la microcuenca de Tiltepec.

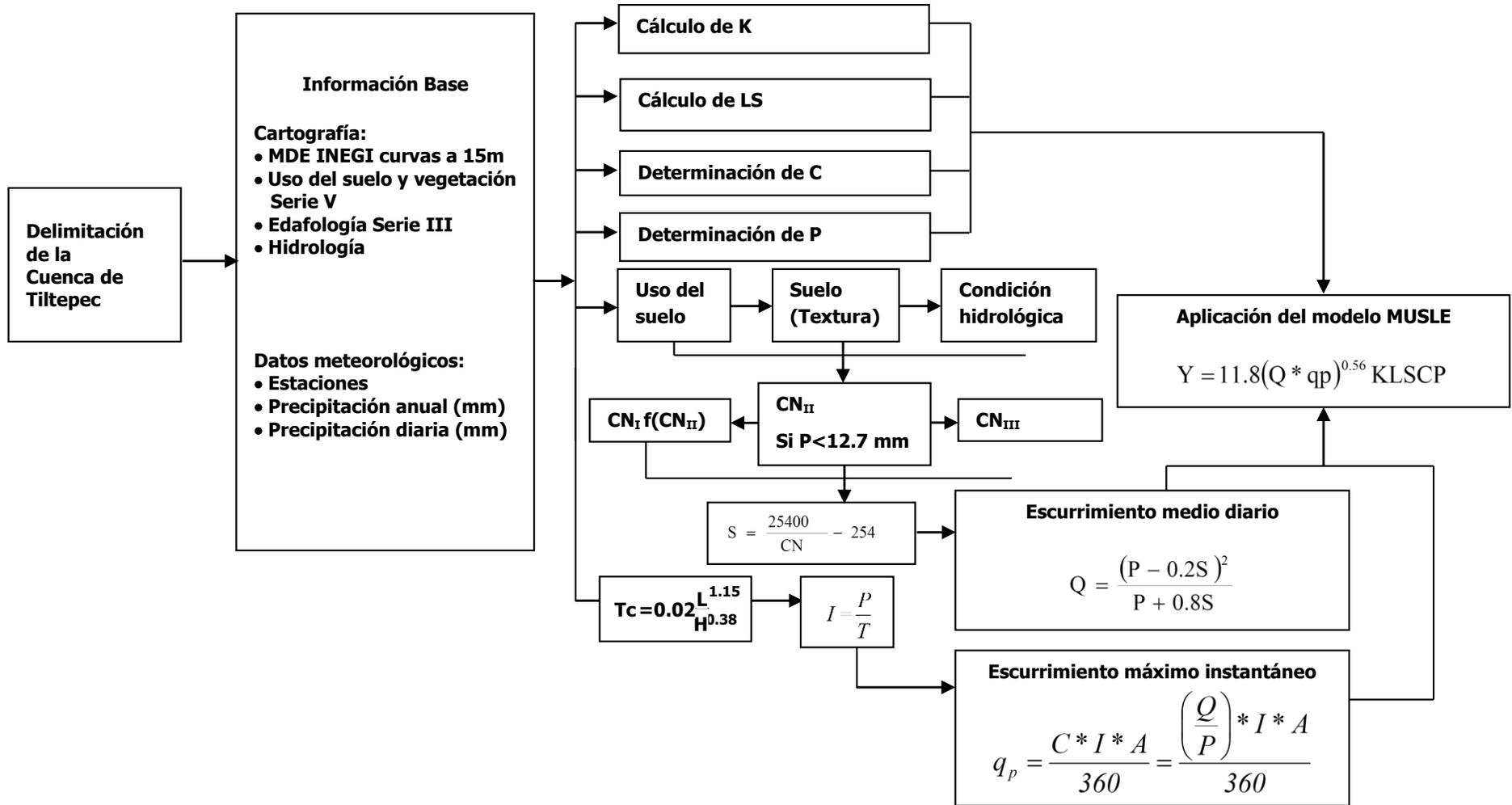


Figura 43. Diagrama del modelo MUSLE para la estimación de escurrimientos y sedimentos en cuencas.

8. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados considerando los servicios ecosistémicos de provisión y regulación, como: producción de alimentos (granos y carne) para la población. Asimismo, se presentan los servicios ecosistémicos de provisión para la producción de leña, forraje, abastecimiento de agua potable para la población y los de regulación con la estimación de escurrimientos y sedimentos con el modelo MUSLE en la microcuenca de Tiltepec.

8.1. Servicios ecosistémicos en la cuenca de Tiltepec

Los servicios ecosistémicos de provisión se analizaron de acuerdo con la información disponible.

8.1.1. Producción de alimentos en la cuenca de Tiltepec

Producción agrícola. En la cuenca de Tiltepec se localizan ocho municipios con una superficie total de 35,103 ha de las cuales solo el 32% están ubicadas dentro de ella, destacando cinco y tres municipios con más de 22% y menos del 8% de su superficie en la cuenca, respectivamente. La superficie agrícola en la cuenca es del 26%, que se calculó proporcionalmente de acuerdo con la superficie agrícola reportada por SIAP (Cuadro 49).

La población por localidades de acuerdo con el CENSO del 2010 en los seis municipios reporta un total de 2,736 habitantes lo que indica que la presión sobre la tierra de cultivo de la población es de 1.08 ha habitante⁻¹ (Cuadro 50).

El promedio de la superficie sembrada en los últimos 10 años (2005-2015) indica que el cultivo de maíz cubre el 46%, el frijol el 28% y el trigo el 26% de la superficie agrícola de la cuenca. La zona agrícola está expuesta a siniestros frecuentes que en promedio son del orden del 7%, 17% y 10% para los cultivos de frijol, maíz y trigo, respectivamente; lo que asociado con los bajos

rendimientos promedio de 0.6, 0.87 y 1.17 t ha⁻¹, de dichos cultivos, se obtienen volúmenes de producción medio anual de 642, 1,286 y 1,166 toneladas de frijol, maíz y trigo, respectivamente (Cuadro 51).

Cuadro 49. Superficie agrícola por municipio estimada en la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Superficie total (ha)	% de la superficie dentro de la cuenca	Superficie en la cuenca (ha)	Superficie agrícola (ha)	% de superficie agrícola
San Andrés Sinaxtla	2,260.79	37.66	851.40	646.21	75.90
San Bartolo Soyaltepec	7,492.39	22.97	1,720.92	168.17	9.77
San Juan Teposcolula	8,699.69	8.68	754.91	70.15	9.29
San Pedro Topiltepec	3,282.21	55.52	1,822.31	208.21	11.43
Santiago Tillo	1,706.76	51.21	874.04	597.12	68.32
Santo Domingo Yanhuitlán	6,963.54	74.37	5,178.59	1,278.00	24.68
Santo Domingo Tonaltepec	2,653.07	1.81	48.14	2.76	5.73
Santiago Nejapilla	2,044.87	0.28	5.77	0.36	6.20
Total	35,103.32	32.07	11,256.09	2,970.97	26.39

Cuadro 50. Población por municipio de acuerdo a las localidades dentro de la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Población Total dentro de la cuenca (Hab)
San Andrés Sinaxtla	172
San Bartolo Soyaltepec	161
San Juan Teposcolula	75
San Pedro Topiltepec	220
Santiago Tillo	550
Santo Domingo Yanhuitlán	1,558
Total	2,736

Si los volúmenes de producción se utilizarán para la alimentación de la población en la zona, se tendría un volumen de 230, 470, 430 kg de frijol, maíz y trigo por habitante por año, respectivamente, lo cual permitiría una soberanía alimentaria, esto es, que trabajan para producir alimentos. Si la producción se destinara a la venta, de acuerdo con los precios medios rurales de estos granos (frijol, maíz y trigo) tendrían un valor de producción de

\$2,677.00, \$1,724.00 y \$1,619.00 por persona por año respectivamente, esto es, sin considerar los costos de producción, ya que al considerarlos serían negativos, ya que solo se trabajaría para producir alimentos y para comercializar una parte de la producción excedente. La productividad de los cultivos (sin considerar los costos de producción por tonelada producida) es de \$8,794.00, \$3,459.00 y \$5,721.00 por hectárea para los cultivos de frijol, maíz y trigo, respectivamente (Cuadro 51).

Dentro de la cuenca, hay municipios con diferentes grados de tecnificación de la producción primaria de alimentos básicos, destacan Santiago Tillo y San Andrés Sinaxtla con mejores indicadores de rentabilidad por unidad de superficie, y San Bartolo Soyaltepec y San Juan Teposcolula con baja rentabilidad y altos índices de siniestralidad. Esto indica una alta variabilidad espacial de los servicios ecosistémicos de provisión de la producción de frijol, maíz y trigo en la cuenca, que son básicos para satisfacer las necesidades de los productores de la región (Cuadro 51).

Cuadro 51. Producción de granos y productividad por municipio dentro de la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Cultivo	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Sup. Siniestrada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	PMR (\$/t)	Valor Producción (Miles de Pesos)	Productividad (\$/ha)
San Andrés Sinaxtla	Frijol	208.12	185.46	22.66	170.62	0.92	11,366.92	1,939.48	9,318.81
	Maíz grano	301.28	261.19	40.09	436.18	1.67	3,705.65	1,616.34	5,364.99
	Trigo grano	136.81	113.86	22.94	247.08	2.17	3,771.79	931.95	6,812.20
San Bartolo Soyaltepec	Frijol	19.97	14.34	5.63	7.17	0.50	12,380.70	88.80	4,446.09
	Maíz grano	77.24	53.43	23.82	28.85	0.54	3,516.60	101.45	1,313.41
San Juan Teposcolula	Trigo grano	70.95	53.00	17.96	37.10	0.70	3,583.96	132.96	1,873.84
	Frijol	13.71	9.57	4.14	3.64	0.38	11,691.16	42.52	3,101.41
	Maíz grano	27.68	17.13	10.56	11.13	0.65	3,439.56	38.29	1,383.20
San Pedro Topiltepec	Trigo grano	28.76	21.08	7.68	14.55	0.69	3,577.27	52.04	1,809.42
	Frijol	43.00	31.80	11.20	14.94	0.47	11,617.46	173.62	4,037.52
	Maíz grano	113.11	72.38	40.73	36.91	0.51	2,889.28	106.65	942.86
Santiago Tillo	Trigo grano	52.10	39.33	12.77	28.71	0.73	3,524.40	101.18	1,942.15
	Frijol	225.10	212.64	12.46	184.99	0.87	11,460.86	2,120.19	9,418.82
	Maíz grano	235.11	188.79	46.32	245.42	1.30	3,688.03	905.13	3,849.77
Santo Domingo Yanhuitlán	Trigo grano	136.90	128.58	8.32	270.02	2.10	3,791.40	1,023.75	7,477.96
	Frijol	322.49	322.49	0.00	261.21	0.81	11,327.27	2,958.83	9,175.09
	Maíz grano	607.88	532.57	75.31	527.25	0.99	3,695.40	1,948.39	3,205.20
Santo Domingo Tonaltepec	Trigo grano	347.63	338.17	9.47	568.13	1.68	3,847.36	2,185.78	6,287.68
	Frijol	0.50	0.36	0.13	0.13	0.37	11,641.62	1.56	3,153.29
	Maíz grano	1.34	0.92	0.42	0.58	0.63	3,371.24	1.96	1,462.50
Santiago Nejapilla	Trigo grano	0.92	0.73	0.19	0.50	0.69	3,540.14	1.78	1,933.50
	Frijol	0.05	0.03	0.02	0.01	0.44	12,350.84	0.18	3,599.11
	Maíz grano	0.12	0.09	0.03	0.06	0.69	3,365.97	0.21	1,784.97
Total	Trigo grano	0.19	0.15	0.04	0.09	0.63	3,483.57	0.33	1,725.67
	Frijol	832.94	776.69	56.24	642.73	0.60	11,729.60	7,325.18	8,794.36
	Maíz grano	1,363.77	1,126.49	237.27	1,286.39	0.87	3,458.97	4,718.42	3,459.84
	Trigo grano	774.26	694.90	79.37	1,166.18	1.17	3,639.99	4,429.76	5,721.28

Adicional a la variabilidad de la productividad promedio en la región, se tiene la variabilidad temporal de los sistemas de producción que está asociada con la precipitación anual y con la presencia de sequía. En general, se aprecia una variación de los rendimientos de los cultivos en el periodo de 2005 a 2015 que va del orden del 0.8 a 0.45 t ha⁻¹ de frijol, de 1 a 0.45 t ha⁻¹ en maíz y de 1.8 a 0.9 t ha⁻¹ de trigo. Estos rendimientos, indican que en la región se sigue la misma técnica de producción, con la mínima aplicación de insumos y donde la precipitación juega un papel importante en la producción ya que puede reducir hasta en 50% el rendimiento (Figura 44).

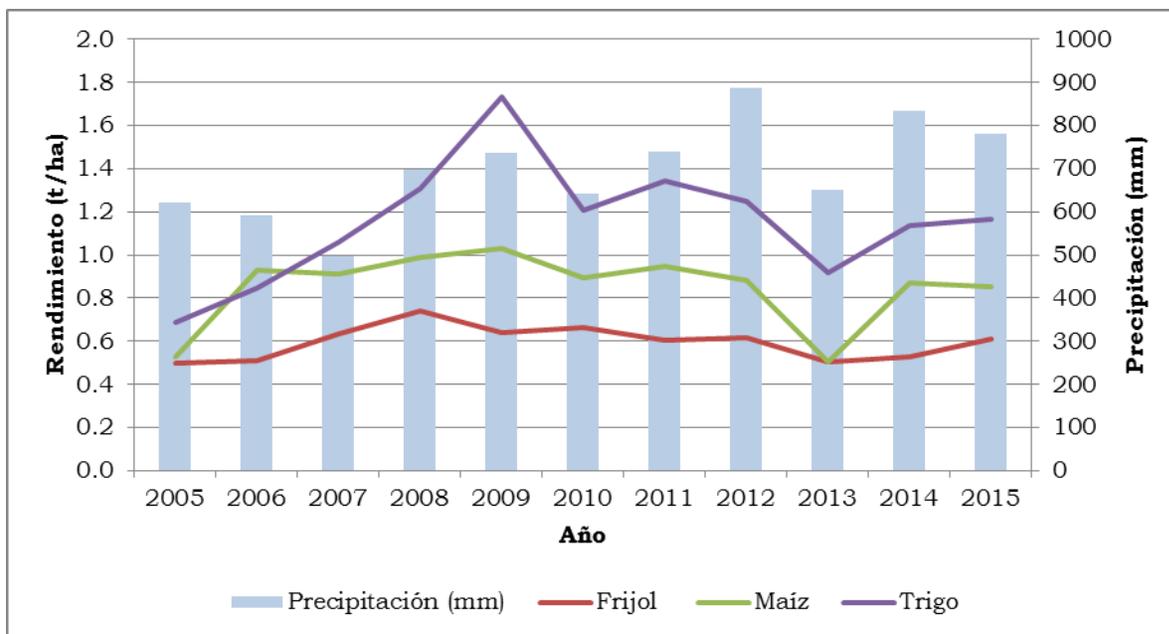


Figura 44. Variabilidad temporal de la producción de los cultivos básicos en la cuenca de Tiltepec.

Si bien cierto, la variación anual de la precipitación afecta el rendimiento de los cultivos, también influye en la presencia de siniestros en la producción de estos granos básicos. Donde los siniestros se presentan 4 veces en 10 años, esto es, hay una probabilidad del 40% de que ocurra un siniestro. Esto origina que la mayor parte de los productores no trabajen o abandonen las parcelas, a excepción de los productores excedentarios que producen para comercializar los granos (Figura 45).

La mayor superficie siniestrada es la destinada a la producción de maíz, que varía de 100 a 750 ha y que corresponde del 7 al 75% de superficie siniestrada; las zonas de frijol reportan menos de un 24% y las zonas trigueras reportan siniestros de menos del 42% (Figura 45).

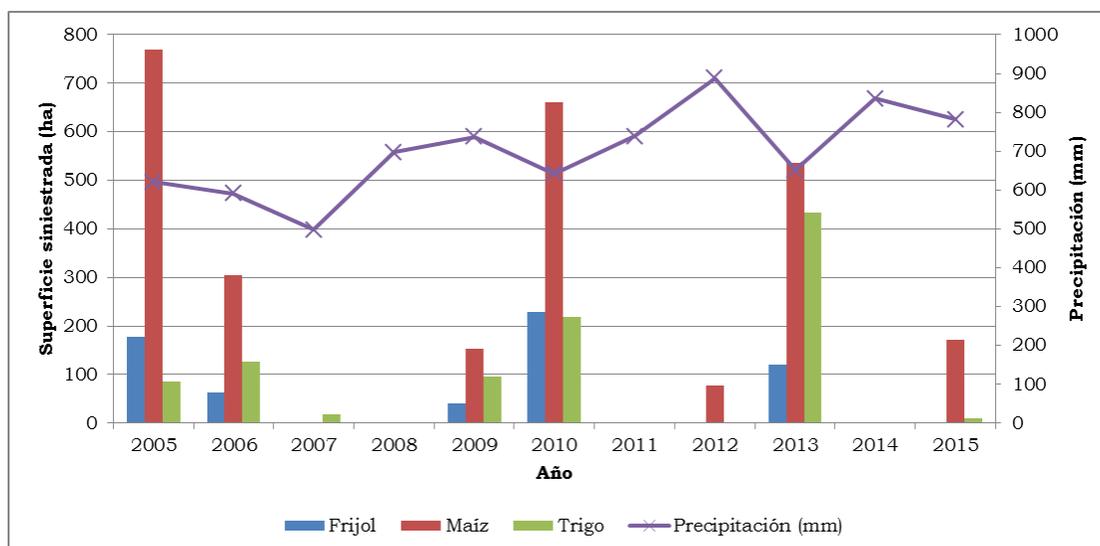


Figura 45. Siniestros en la producción en el período de 2005 a 2015 para la cuenca de Tiltepec.

Producción ganadera. En la cuenca de Tiltepec se han reportado hatos de bovinos, porcinos y aves que se manejan semi-estabulados y que demandan alimentos producto de los esquilmos de los cultivos y de granos cultivados, lo cual se vuelve una presión para los ganaderos (Cuadro 52 y Cuadro 53).

Los hatos de bovinos, ovinos y caprinos, que se desarrollan al libre pastoreo, representan en la cuenca 1,034 U.A. Esto representa un coeficiente de agostadero de 10.8 ha U.A.⁻¹, mayor a la carga animal recomendada para la zona de 15, 25 y 34 ha por unidad animal para condiciones de agostadero de bueno, regular y mala, respectivamente (COTECOCA, 1982). Esto evidencia el sobrepastoreo especialmente por ganado caprino, a pesar que en algunos municipios se ha prohibido el pastoreo de caprinos, aun así, prevalece en la cuenca la sobreexplotación y la cual repercute en la erosión y degradación de los suelos, como reporta Contreras *et al.* (2003).

Cuadro 52. Hatos ganaderos en la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Cabezas de ganado				Aves de corral
	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	
San Andrés Sinaxtla	29	76	1,431	16	739
San Bartolo Soyaltepec	91	16	1,290	254	1,162
San Juan Teposcolula	175	130	1,930	544	1,322
San Pedro Topiltepec	85	6	752	378	402
Santiago Tillo	50	61	593	17	787
Santo Domingo Yanhuitlán	168	83	1,800	938	1,704
Santo Domingo Tonaltepec	37	5	419	24	536
Santiago Nejapilla	14	3	118	N/A	126
Total	649	380	8,333	2,171	6,778

Fuente: VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2009)

Cuadro 53. Cabezas de ganado y U.A. por municipio proporcional a la superficie dentro de la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Bovinos	Ovinos	Caprinos
San Andrés Sinaxtla	11	539	6
San Bartolo Soyaltepec	21	296	58
San Juan Teposcolula	15	168	47
San Pedro Topiltepec	47	418	210
Santiago Tillo	26	304	9
Santo Domingo Yanhuitlán	125	1,339	698
Santo Domingo Tonaltepec	1	8	0
Santiago Nejapilla	0	0	0
Total (cabezas)	245	3,071	1,028
U.A.	245	614	175

Fuente: elaboración propia con datos del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2009)

La actividad ganadera en la cuenca representa una producción de 226.4 toneladas promedio de carne, que se destina a la comercialización y al abasto de la población rural local. Destacan la producción de carne bovina con un 33.6% del total, carne de puerco con un 26.6% y el resto de las especies contribuyen en menor proporción a la producción (Cuadro 54).

Cuadro 54. Producción de carne en la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Producción (Toneladas)					Total
	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	Aves de corral	
San Andrés Sinaxtla	3.01	1.51	3.39	1.51	1.60	11.02
San Bartolo Soyaltepec	8.50	27.79	5.11	7.81	4.88	54.09
San Juan Teposcolula	2.76	3.41	1.65	2.69	0.82	11.33
San Pedro Topiltepec	8.74	7.91	8.61	11.94	6.52	43.72
Santiago Tillo	3.97	2.30	0.51	0.00	5.76	12.55
Santo Domingo Yanhuitlán	48.71	17.11	5.95	5.95	14.87	92.59
Santo Domingo Tonaltepec	0.37	0.04	0.18	0.29	0.07	0.95
Santiago Nejapilla	0.06	0.06	0.01	0.03	0.02	0.18
Total	76.12	60.13	25.41	30.22	34.55	226.43

Fuente: elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA (2012-2015).

Nota: Los valores de producción se reportan de manera proporcional a la superficie de cada municipio dentro de la cuenca.

El promedio del valor de la producción pecuaria en la cuenca es de más de 7 millones de pesos, que representan un valor de la producción de \$2,735.60 per cápita. Santo Domingo Yanhuitlán aporta el 40.1% del valor de la producción pecuaria total, San Bartolo Soyaltepec el 22.8% y San Pedro Topiltepec el 20.2%; el resto de los municipios aportan solo el 16.9% del valor total de la producción de carne (Cuadro 55).

Cuadro 55. Valor de la producción y productividad pecuaria en la cuenca de Tiltepec.

Municipio	Valor de producción (miles de pesos)					Total	Productividad ganadera (\$/ha)
	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	Aves de corral		
San Andrés Sinaxtla	107.43	42.56	133.60	51.12	64.59	399.29	468.98
San Bartolo Soyaltepec	304.81	759.85	190.48	299.99	152.64	1,707.76	992.35
San Juan Teposcolula	95.50	92.98	61.78	103.21	31.18	384.65	509.54
San Pedro Topiltepec	294.39	212.50	327.57	454.01	224.44	1,512.92	830.22
Santiago Tillo	146.08	57.74	25.61	0.00	212.52	441.94	505.63
Santo Domingo Yanhuitlán	1,615.13	453.47	221.25	218.28	489.73	2,997.85	578.89
Santo Domingo Tonaltepec	12.31	0.91	6.47	11.14	3.22	34.05	707.23
Santiago Nejapilla	2.08	1.68	0.49	1.33	0.56	6.15	1,065.53
Total	2,577.73	1,621.69	967.24	1,139.08	1,178.87	7,484.62	707.30

Fuente: elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA (2012-2015).

Nota: Los valores de producción se reportan de manera proporcional a la superficie de cada municipio dentro de la cuenca.

La productividad ganadera promedio en la zona es de \$707.30 ha⁻¹; Santiago Nezapilla tiene la mayor productividad ganadera y Santo Domingo Yanhuitlán, al cubrir casi el 50% de la superficie de la cuenca, presenta la menor productividad (Cuadro 55).

8.2. Servicios ecosistémicos en la microcuenca de Tiltepec

Los servicios ambientales de producción de agua, leña y forraje se estimaron a partir de encuestas a los productores y trabajo de campo. La regulación de la erosión como servicio ecosistémico de importancia se analizó con la variación de las tasas de erosión del suelo y la producción de sedimentos y escurrimientos calculados con el modelo MUSLE.

8.2.1. Oferta y demanda de agua

El inventario de la oferta de agua en la localidad de Santa María Tiltepec permitió identificar las fuentes de abastecimiento y almacenamiento. La fuente principal de abastecimiento es el manantial “Yuyunkono” con un gasto promedio de 1.37 l s⁻¹ que equivale a un volumen de 117.9 m³ día⁻¹ ⁶. Para abastecimiento y regulación de agua potable, la población cuenta con tres tanques de almacenamiento con capacidad de 68.3 m³, 67 m³ y 49.6 m³, este último se abastece del manantial Nodaza que tiene un gasto de 0.19 l s⁻¹ y un volumen diario de 16.5 m³.

Complementariamente, la localidad cuenta con dos estanques de almacenamiento de agua para riego con capacidad de 159.2 m³ y 124.1 m³. Y un depósito en el centro de la localidad para usos recreativos y agua de riego, con capacidad de 435.3 m³, que permite recolectar el agua excedente de los sistemas anteriores y del manantial “Tiltepec”, los cuales generan un gasto de

⁶ El aforo se realizó en el mes de octubre, el gasto de los manantiales se reducen hasta en un 50% en el periodo de sequía.

0.50 l s⁻¹ y 0.19 l s⁻¹, respectivamente, y un volumen total diario de 60 m³ (Figura 46 y Figura 47).



Figura 46. Manantiales Santa María Tiltepec, Oaxaca.



Figura 47. Depósitos de almacenamiento de agua.

Los manantiales que pertenecen a Santa María Tiltepec producen 1.74 l s^{-1} de agua y un volumen diario de 150.4 m^3 ; la localidad cuenta con una capacidad de almacenamiento de 184.7 m^3 para consumo humano y 718.5 m^3 para agua de riego y usos recreativos (Cuadro 56).

Cuadro 56. Oferta de agua Santa María Tiltepec, Oaxaca.

Descripción	Gasto ($l\ s^{-1}$)	Volumen ($m^3\ día^{-1}$)	Capacidad (m^3)
Manantial "Yuyunkono"	1.365	117.9	-
Estanque para riego 1	0.564	48.7	159.2
Estanque para riego 2	-	-	124.1
Tanque de almacenamiento 1	-	-	68.3
Tanque de almacenamiento 2	-	-	67
Manantial "Nodaza"	0.185	15.9	-
Tanque de almacenamiento Nodaza	-	-	49.6
Manantial "Tiltepec"	0.191	16.5	-
Reserva "Alberca"	0.505	43.6	435.3
Demasia	0.568	49.1	-
Total manantiales	1.741	150.41	-
Total almacenamiento para uso humano			184.7
Total almacenamiento para otros usos			718.5

Las demandas de agua potable de la población (220 habitantes) de Santa María Tiltepec para el año 2010 fue en promedio de $0.25\ l\ s^{-1}$ diario para un volumen anual de $7,884\ m^3$, un gasto máximo diario de $0.36\ l\ s^{-1}$ y un máximo horario de $0.55\ l\ s^{-1}$ (Cuadro 57). La oferta de agua por los manantiales es de $1.74\ l\ s^{-1}$ que es un gasto superior a la demanda, aún en las horas de máxima demanda de agua potable.

Cabe señalar que durante la época de estiaje el gasto de los manantiales disminuye y apenas es suficiente para satisfacer la demanda local, de allí la importancia de la estrategia de la localidad de contar con infraestructura para el almacenamiento y distribución de agua.

El crecimiento de la población al 2030 se considera mínimo, se estima que la demanda de agua será de $0.27\ l\ s^{-1}$ para un volumen anual de $8,515\ m^3$, un gasto máximo diario de $0.38\ l\ s^{-1}$ y horario de $0.59\ l\ s^{-1}$; el crecimiento de la población solo aumentaría en 6.4% la demanda de agua (Cuadro 57).

Cuadro 57. Demanda de agua 2010 y 2030.

Localidad	Santa María Tiltepec	
Población (2010)	220	
Población (2030)	234	
Clima	Templado	
Consumo de agua per cápita	100	
Año	2010	2030
Volumen de agua diario (m ³)	21.6	23.3
Volumen de agua anual (m ³)	7,884	8,515
Gasto medio diario (l s ⁻¹)	0.25	0.27
Gasto máximo diario (l s ⁻¹)	0.36	0.38
Gasto máximo horario (l s ⁻¹)	0.55	0.59

La oferta de agua en la localidad es suficiente para abastecer de agua potable a la población actual y futura hasta en las condiciones más críticas; sin embargo, la disponibilidad de agua para apoyar actividades productivas es limitada y no permite reducir los riesgos de siniestros por falta de lluvia, no obstante que hay productores que usan mangueras para conducir el agua de los manantiales a sus parcelas y algunas veces para abastecer de agua potable.

8.2.2. Oferta y demanda de leña

Se aplicaron 42 encuestas a los habitantes de Santa María Tiltepec que representan el 65% de las viviendas totales, los resultados muestran que el 62% de los hogares combinan gas LP y leña, el 24% utiliza solo leña y 14% restante solo utiliza gas (Figura 48); la leña se destina a fines domésticos y en menor proporción a actividades industriales.

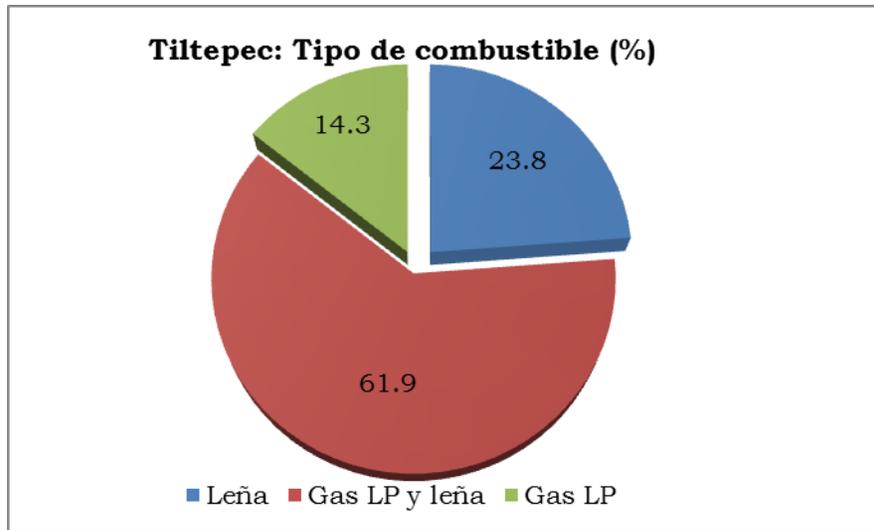


Figura 48. Tipo de combustibles empleados en los hogares.

Los principales usos de la leña son: cocinar alimentos (40.5%), especialmente alimentos que requieren mucho tiempo de cocción como frijoles y carne; elaborar tortillas (23.8%); calentar agua (23.8%) y ocasionalmente elaboración de pan (4.6%), principalmente (Figura 49).

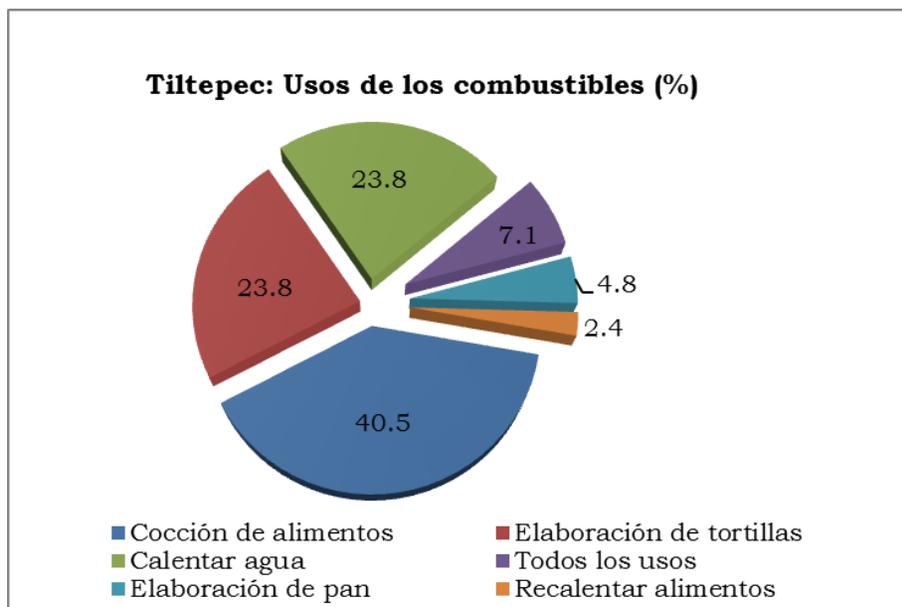


Figura 49. Principales usos de la leña.

Una de las plantas más utilizadas para suministro de leña es el encino (Figura 50), debido a su lenta combustión y su capacidad para producir carbón.

Entre las especies de encino que aprovechan los habitantes de las localidades están: encino amarillo (*Quercus magnoliifolia* Née), encino blanco o de chivo (*Q. castanea* Née), encino rojo (*Q. conspersa* Benth), encino de cuchara (*Q. crassifolia* Humb. & Bonpl.), encino capulín (*Q. laurina* Bonpl). Especies como el huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) y uña de gato (*Mimosa lacerata* Rose. (Kunth) K. Koch) también presentan características similares al encino, en el sentido que producen carbón y conservan el calor por más tiempo. El guaje (*Leucaena leucocephala*), Tepozán (*Buddleja parviflora* H. B. K.), jarilla (*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.), chamizo negro (*Baccharis heterophylla*) y yunuyaca (*Eysenhardtia polystachya* (Ortega Sarg.), son especies que se aprovechan dentro de las localidades por su fácil acceso para las amas de casa. Especies como: el madroño (*Arbutus xalapensis* H.B.K), madroño negro o tini (*Comarostaphylis polifolia* (Kunth) Zucc. ex Klotzsch.) y manzanita (*Arctostaphylos pungens* H. B. K.) son especies que las prefieren en época de lluvias porque sus troncos no absorben el agua.

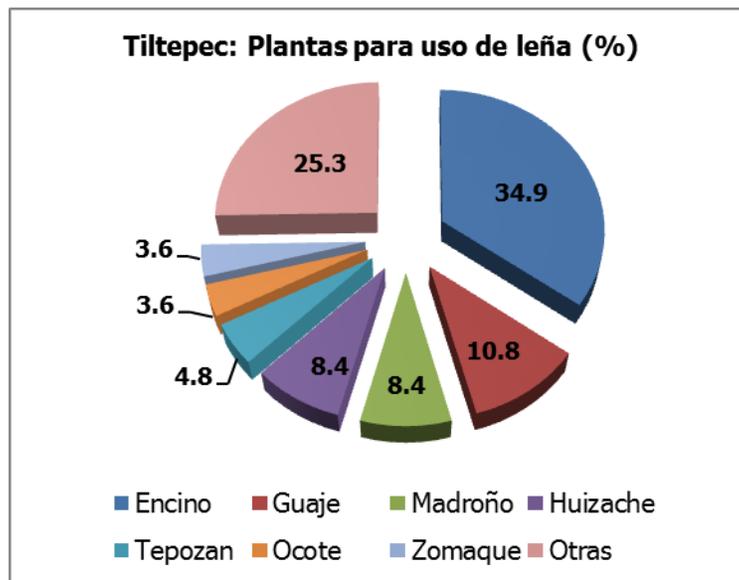


Figura 50. Principales especies para uso de leña.

Otras especies que emplean para leña son: ocote (*Pinus oaxacana* Mirov.), zumaque (*Rhus standleyi* Barkley), enebro (*Juniperus flacida* Schl.), ramón

(*Cercocarpus fothergilloides* Kunth), ramonal (*Ceanothus caeruleus* Lag.), tlalixtle (*Amelanchier denticulata*), aile o elite (*Alnus sp.*) y sauce (*Salix sp.*), entre otras.

En la localidad la leña generalmente se recolecta (94.4%) ya que cuentan con las áreas naturales para extraerla, solo el 5.6% de los encuestados señalaron que la compran a vendedores de la misma comunidad. El proveedor principal es el esposo 54.3%, seguido por los hijos 22.9% y las esposas 22.2%. Los hombres suelen invertir de más tiempo (entre 4 a 8 hr) y recorren mayores distancias (entre 5 a 7 Km), además que transportan cargas de 30 a 60 kg, esto es porque combinan actividades agrícolas y ganaderas con la recolección de leña. En cambio, las amas de casa suelen obtenerla en los alrededores de la localidad, recolectando ramas delgadas y lo necesario para el consumo del día.

La frecuencia en el abastecimiento está en función al tipo y cantidad de leña que se recolecta, el 9.1% se abastece dos veces por semana, 36.4% cada semana, 27.3% cada quince días, 12% cada veinte días y el 15.2% mensual o cada 2 meses. El consumo de leña a lo largo del año es variable, por ejemplo, en festividades patronales y semana santa el consumo aumenta por la llegada de familiares que radican en otros estados, al igual que en los meses de octubre a diciembre por la elaboración de pan y la época de frío; y por el contrario, en época de lluvias el consumo disminuye debido a que la leña se humedece.

En cuanto a los costos (Figura 51), el 36.6% considera que le cuesta más de 2.50 \$ kg⁻¹ de leña, 26.6% de 2.00 a 2.50 \$ kg⁻¹, 23.3% de 1.50 a 2.00 \$ kg⁻¹ y el 13.3% menor a \$1.50 \$ kg⁻¹; los costos son relativamente bajos ya que las localidades cuentan con zonas de extracción como los bosques de pino-encino, matorral y selva baja caducifolia.

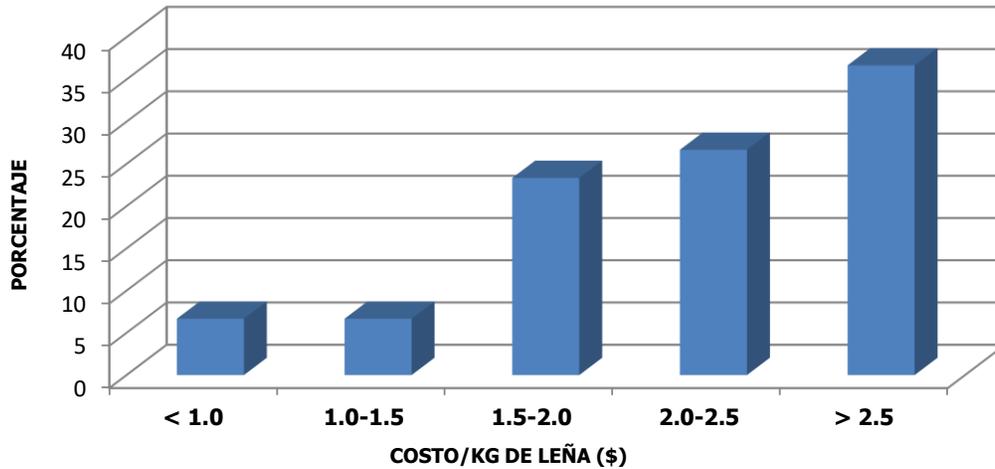


Figura 51. Costos por kilogramo de leña.

El costo anual del consumo de leña reporta un mínimo de 394.80 \$ familia⁻¹, un máximo de \$6,843.20 \$ familia⁻¹ y un promedio de \$2,384.61 \$ familia⁻¹ con un coeficiente de variación del 78.6%. Esta variación representa el valor subjetivo que le otorga cada habitante al uso y tipo de leña para satisfacer sus necesidades. De acuerdo a la Figura 52, el 21% de las familias encuestadas reporta un costo anual menor a \$500, 27% entre \$500 a \$1,000, el 18% entre \$1000 y \$1,500, el 9% entre \$1,500 a \$2,500, el 15% entre \$2,500 y \$3,500 y el 12% mayor a \$3,500.

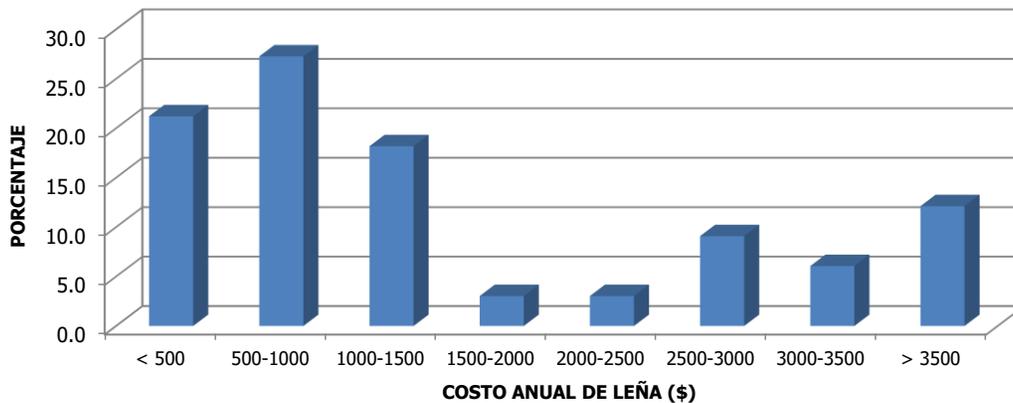


Figura 52. Costo anual de leña por familia para Santa María Tiltepec.

Se estimó un consumo promedio per cápita de 1.4 kg día⁻¹ y un consumo anual de 124 m³, valores similares a los reportados por Contreras *et al.* (2003) de 1.5 a 2 kg persona⁻¹ día⁻¹ para la zona de Yanhuitlán, Oaxaca.

Los resultados de los muestreos de leña muestran que los contenidos de humedad varían entre 10% y 40% dependiendo de las condiciones climáticas de cada sitio, la gravedad específica tiene un rango entre 750 a 940 kg m⁻³ y el volumen disponible de leña oscila entre 1 y 5.5 m³ ha⁻¹ (Cuadro 58).

Cuadro 58. Contenido de humedad, densidad y volumen de leña.

Sitio	Contenido de humedad (%H ^s)	Gravedad específica (kg m ⁻³)	Peso bruto (kg ha ⁻¹)	Pérdida por humedad (kg ha ⁻¹)	Peso neto (kg ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Tipo de vegetación
1	0.341	932.07	2,000	681.47	1,318.53	1.41	Pino
2	0.395	906.32	3,200	1,263.65	1,936.35	2.14	Matorral
3	0.179	828.92	1,100	196.9	903.1	1.09	Encino
4	0.099	862.6	1,600	158.4	1,441.60	1.67	Matorral
5	0.108	900.77	2,800	303.19	2,496.81	2.77	Matorral
6	0.152	934.72	3,800	575.7	3,224.30	3.45	Pino
7	0.153	925.37	6,000	918	5,082.00	5.49	Pino
8	0.164	838.1	4,875	797.06	4,077.94	4.87	Pino
9	0.179	925.64	2,200	393.8	1,806.20	1.95	Encino
10	0.148	750.56	2,200	325.6	1,874.40	2.5	Pino
11	0.368	806	2,000	736	1,264.00	1.57	Matorral
12	0.199	934.67	1,900	378.1	1,521.90	1.63	Matorral
13	0.179	925.64	3,850	689.15	3,160.85	3.41	Encino
14	0.179	925.64	1,470	263.13	1,206.87	1.3	Encino

Fuente: Elaboración propia.

Los tipos de vegetación que predominan como fuentes de abastecimiento de leña son: bosque de encino-pino 25%, bosque de pino-encino 20% y matorral xerófilo 8% (Figura 53 y Cuadro 59).

El ecosistema de bosque de pino-encino produce 4.08 m³ ha⁻¹ de leña, seguido por el bosque de encino-pino con 2.22 m³ ha⁻¹ y finalmente el matorral xerófilo con 1.60 m³ ha⁻¹. Se determinó un volumen total de 3,189.5 m³. Es importante señalar que los ecosistemas de bosque de pino, encino y los matorrales son los

que proveen de los servicios de provisión de leña, que es básico para el bienestar de la población rural como reporta Díaz y Balvanera (2013).

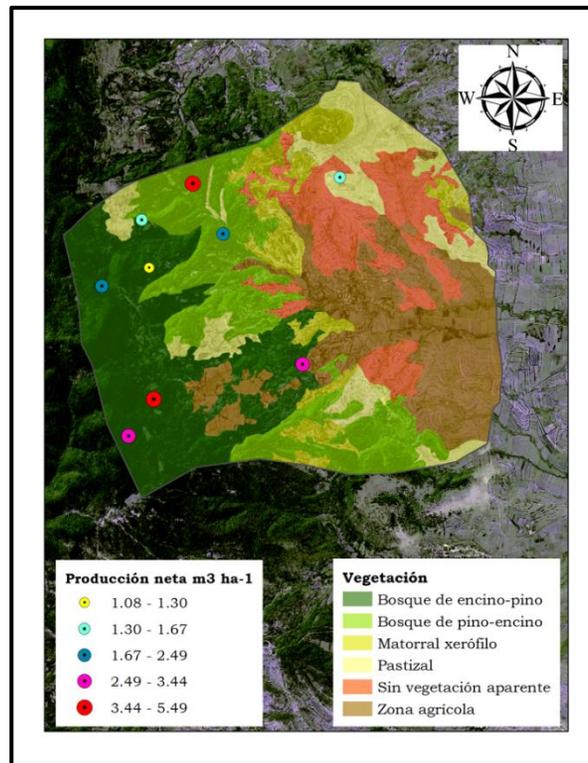


Figura 53. Uso del suelo y vegetación Santa María Tiltepec, Oaxaca.

Cuadro 59. Producción de leña Santa María Tiltepec.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	Producción neta ($m^3 ha^{-1}$)	Volumen total (m^3)
Bosque de encino-pino	534.8	2.22	1,188.90
Bosque de pino-encino	420.8	4.08	1,715.30
Matorral xerófilo	178.5	1.6	285.3
Pastizal	245.2	-	-
Sin vegetación aparente	274.7	-	-
Zona agrícola	458.4	-	-
Total	2,112.30		3,189.50

Fuente: Elaboración propia.

8.2.3. Producción de forraje

Se definieron 9 sitios de muestreo en función al tipo de cobertura vegetal, dominando especies herbáceas como: gramíneas y leguminosas. Dentro de las gramíneas se identificaron las siguientes especies: *Hilaria cenchroides* Kunth, *Bouteloua triaena* (Trin. ex Spreng.) Scribn., *Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr., y *Bouteloua hirsuta* Lag., Cruz (1992) clasifica estas especies de moderadamente a muy consumidas por el ganado (Figura 54).

Algunas especies de leguminosas presentes en los sitios fueron: *Crotalaria pumila* Ortega (cascabelito o sonajita), *Desmodium subsessile* Schldl. (garrapata), *Medicago polymorpha* L. (carretilla)

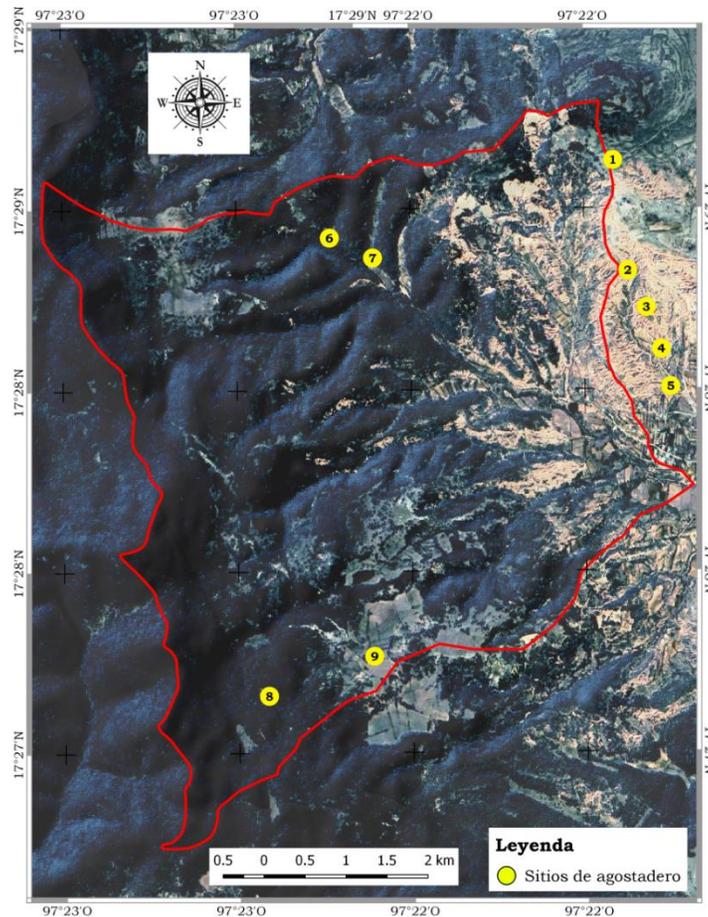


Figura 54. Sitios de agostadero para la microcuenca de Tiltepec.

Los muestreos realizados en campo permitieron obtener la producción de biomasa, la capacidad de carga animal (CCA) y el coeficiente de agostadero (CA) para cada sitio (Cuadro 60). Se determinó un CA en el rango de 4 a 28.4 ha UA⁻¹ y un promedio de 13.9 ha UA⁻¹. Contreras *et al.* (2003) infiere que se requieren 3.1 ha por animal de pastoreo (24.8 ha UA⁻¹) para el municipio de Santo Domingo Yanhuitlán; y, Cruz y Aguirre (1992) determinaron un CA real de 2.81 a 3.84 ha UA⁻¹ en base a la superficie bajo pastoreo y las unidades animal existentes.

Cuadro 60. Coeficientes de agostadero para la microcuenca de Tiltepec.

Sitio	Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Σ (MUAE*FU)*	RUA**	CCA (UA ha ⁻¹)	CA (ha UA ⁻¹)
1	1,028.2	616.9	4,927.5	0.13	8.0
2	821.7	493.0		0.10	10.0
3	340.0	204.0		0.04	24.2
4	910.2	546.1		0.11	9.0
5	288.8	173.3		0.04	28.4
6	1,217.6	730.6		0.15	6.7
7	714.4	428.7		0.09	11.5
8	2,033.2	1,219.9		0.25	4.0
9	355.5	213.3		0.04	23.1
Promedio	856.6	514.0	4,927.5	0.104	13.9

* Sumatoria de Masa por unidad de área por cada especie por Factor de uso (FU), el cual se tomó del 60%.

**Rendimiento unidad animal al año, teniendo en cuenta que consume el 3% de su peso.

Los sitios 2, 4 y 5 reportan una producción de *Dalea spp.* (engorda cabra) de 164.5, 306.9 y 23.8 kg ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, no se cuantificó debido a que este género es consumido principalmente por las cabras y la composición del hato ganadero que pastorean los habitantes de Tiltepec son principalmente ovinos.

La Figura 55, muestran cada uno de los sitios de agostaderos que se muestrearon en el área de influencia de la microcuenca de Tiltepec.

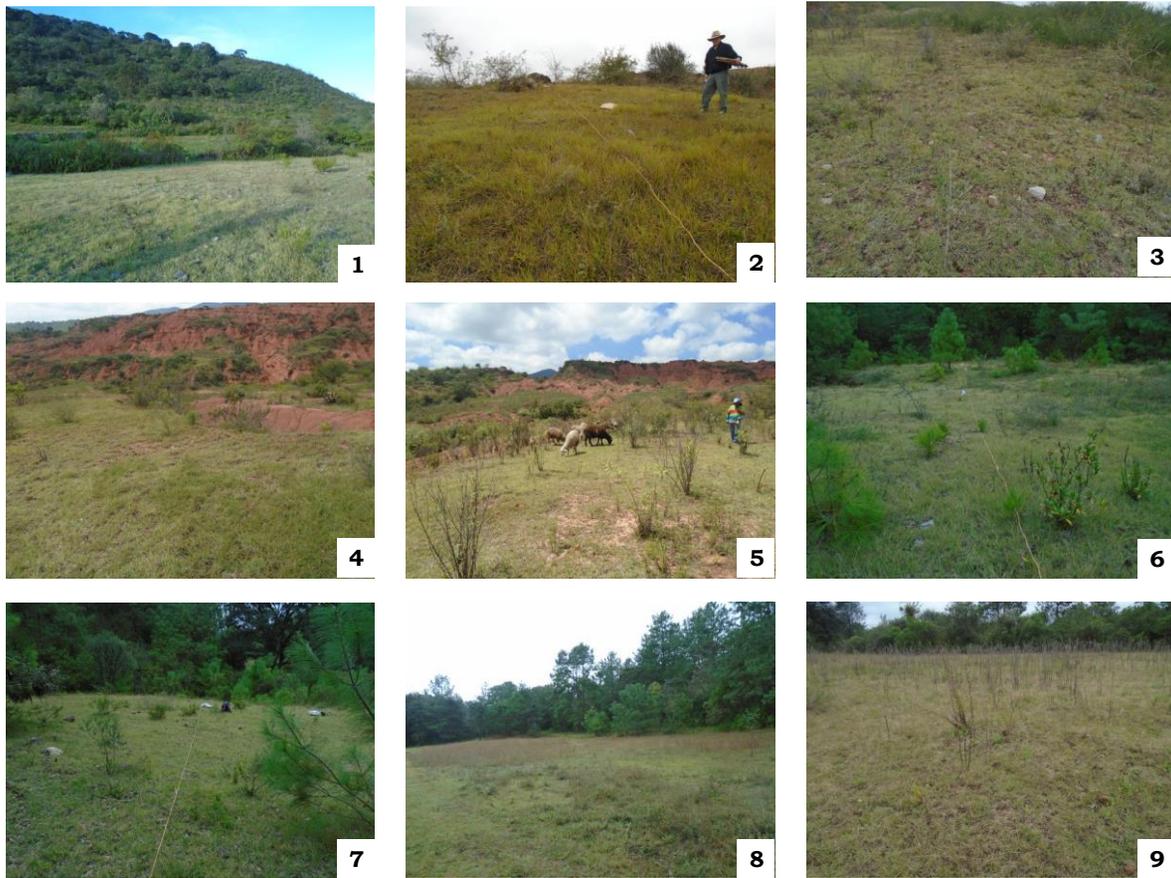


Figura 55. Sitios de agostadero para la microcuenca de Tiltepec.

Por cobertura vegetal, los sitios de agostadero se clasifican como condición regular (INE 1994). Los sitios con mayor cobertura vegetal verde son el 3, 8 y 9 con una cobertura que va de 45 a 48%. Por el contrario, los sitios con mayor porcentaje de suelo desnudo son el 4, 5 y 8 con 28 a 41% de la superficie desprovista de vegetación, siendo áreas susceptibles a erosionarse (Cuadro 61).

Cuadro 61. Cobertura del suelo para los sitios de agostadero.

Sitio	Porcentaje de:				
	Cobertura vegetal		Materia Orgánica	Piedra	Suelo desnudo
	Verde	Seco			
1	31.9	37.1	7.9	14.0	9.1
2	27.7	26.6	6.9	23.7	15.0
3	48.2	12.4	16.1	1.5	21.8
4	38.7	11.6	15.9	4.9	28.9
5	25.7	14.9	16.9	1.2	41.2
6	33.9	32.0	27.7	1.1	5.3
7	30.6	16.6	43.5	0.0	9.3
8	46.8	14.4	4.3	3.9	30.5
9	45.7	14.9	12.2	13.6	13.7
Promedio	36.6	20.1	16.8	7.1	19.4

Con la información recabada en las entrevistas realizadas a los habitantes de la localidad de Tiltepec, se determinó la composición del hato ganadero y las equivalencias a unidades animal (UA) en base a lo propuesto por el DOF (2000) e INIFAP (2011). Se calcularon 40 UA para el ganado bovino, 20 UA de asnos y 111.7 UA de ovejas, con un total de 171.7 UA. Sin embargo, solo el ganado menor (ovinos) es de pastoreo (Cuadro 62 y Cuadro 63).

Para el ganado mayor se registraron 19 productores con un total de 44 cabezas de ganado vacuno y 20 cabezas de asnos. Y en promedio 5.2 UA por productor (Cuadro 62).

Cuadro 62. Composición del hato: ganado mayor.

	Composición del hato: ganado mayor					
	Vacas	Becerro	Semental	Cabezas de ganado	UA	Asnos (UA)
Total	31	12	3	44	40.0	20
Promedio	3.1	1.2	0.3	4.4	4.0	1.2
Mínimo	1	1	1	1	1.3	1
Máximo	12	5	1	17	15.0	2

Para el ganado menor se contabilizaron 25 productores con un total de 567 cabezas de ganado que equivalen a 111.7 UA y un promedio de 4.5 UA por productor (Cuadro 63).

Cuadro 63. Composición del hato: ganado menor.

Composición del hato: ganado menor						
Productor	Vientres	Hembras de reemplazo	Cordero	Sementales	Cabezas de ganado	UA
Total	403	33	68	63	567	111.7
Promedio	16.1	1.3	2.7	2.5	22.7	4.5
Mínimo	1	2	2	1	2	0.5
Máximo	36	15	10	10	50	9.8

En 1992, la población de ovinos y caprinos en Tiltepec fue de 445 y 491 cabezas, respectivamente. Con un incremento del 95% en la población de ovinos y 16% en caprinos, según los productores porque los borregos no dañan tanto la vegetación como las cabras (Cruz y Aguirre, 1992). Actualmente, la producción caprina está restringida en la localidad de Tiltepec permitiéndose solo la producción y pastoreo de ovinos.

8.2.4. Servicios de provisión de agua y regulación de la erosión.

8.2.4.1. Producción de sedimentos con el modelo MUSLE: microcuenca de Tiltepec

La producción de sedimentos fue estimada con el modelo MUSLE para el escenario actual y para antes (1984) utilizando los datos de precipitación diarios para la estación de Yanhuitlan, y los parámetros ponderados K, LS, C, P y CN para ambos períodos (Cuadro 64).

Cuadro 64. Parámetros utilizados para correr el modelo MUSLE en la microcuenca de Tiltepec.

Microcuenca:	Microcuenca de Tiltepec	
	Escenario	
Parámetros de entrada:	Actual	Antes
Área de la cuenca (ha):	968.21	968.21
Factor K ponderado:	0.029	0.029
Factor LS ponderado:	6.932	6.932
Factor C ponderado:	0.113	0.198
Factor P :	0.987	1.000
CN _{II} inicial ponderado:	74.2	79.6
L (longitud de cauce principal, metros):	4,103.61	4,103.61
H (Desnivel del cauce principal, metros):	337.00	337.00
Parámetros de entrada opcionales:		
Pendiente media (s) (%)	8.168	8.168
Longitud de pendiente (m):	150.0	150.0
m (coef. por rango de pendiente, adim.):	0.5	0.5

Los parámetros utilizados en el modelo MUSLE muestran que el factor de protección de la vegetación contra la erosión (factor C), el factor de prácticas de conservación de suelos (factor P) y el valor de curvas numéricas disminuyen con el tiempo por las acciones manejo del suelo y vegetación realizadas por la población, por lo que se espera una regulación en los servicios ecosistémicos de producción de escurrimientos y de reducción de la degradación.

Para la corrida del modelo MUSLE la precipitación total fue de 782 mm para ambos periodos⁷ y se encontró que los escurrimientos y producción de sedimentos se presentaron en los meses de mayo a septiembre (Cuadro 65).

⁷ La precipitación para ambos periodos fue la misma con el supuesto de que la variabilidad temporal no afectará los servicios ecosistémicos estimados.

Cuadro 65. Esgurrimientos y producción de sedimentos estimados con el modelo MUSLE para dos escenarios.

Mes	Antes				Actual		
	Precipitación (mm)	Q (mm)	q _p (m ³ s ⁻¹)	DE (t ha ⁻¹)	Q (mm)	q _p (m ³ s ⁻¹)	DE (t ha ⁻¹)
Enero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Marzo	28.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abril	39.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mayo	127.20	1.28	0.00	1.55	0.13	0.00	0.07
Junio	117.40	20.17	42.90	28.62	12.17	29.41	9.28
Julio	85.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agosto	82.30	0.61	1.80	0.62	0.02	0.08	0.01
Septiembre	235.40	45.62	149.23	73.48	32.51	122.96	29.33
Octubre	44.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Noviembre	21.80	0.11	0.57	0.10	0.00	0.00	0.00
Diciembre	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	782.3	67.8	149.2	104.4	44.8	123.0	38.7

Q escurrimiento (mm); q_p escurrimiento máximo (m³ s⁻¹); DE degradación específica (t ha⁻¹)

Los indicadores de cambio muestran que los escurrimientos disminuyeron en 33% y los escurrimientos máximos instantáneos en un 17% lo que indica que los servicios ecosistémicos de regulación del agua han tenido impacto para aumentar la recarga de acuíferos y disminuir el flujo superficial que incide en la erosión (Cuadro 66).

Cuadro 66. Indicadores en los servicios ecosistémicos de regulación de la producción de agua y erosión.

Condición	Precipitación (mm)	Q (mm)	q _p (m ³ s ⁻¹)	CE	Degradación específica (t ha ⁻¹)
Antes	782.3	67.8	149.2	0.09	104.4
Después	782.3	44.8	123.0	0.06	38.7
% cambio	-	33.88	17.60	33.88	62.95

CE coeficiente de escurrimiento adimensional

La degradación específica estimada con el modelo MUSLE indica una reducción de casi el 63% producto de las acciones de reforestación, recuperación de las masas forestales y la construcción de obras de infraestructura rural. La tasa de

degradación de los suelos estimada es similar a la degradación específica obtenida por Lira (2016) que reporta retención de sedimentos a 83 a 13 t ha⁻¹ y que concuerda con la información reportada por la WWF (2015).

Los escurrimientos y la producción de sedimentos (degradación específica) se presentan en los meses de junio y septiembre ya que todo depende la precipitación diaria, en este caso los eventos de mayor magnitud se presentaron en dichos meses (Figura 56).

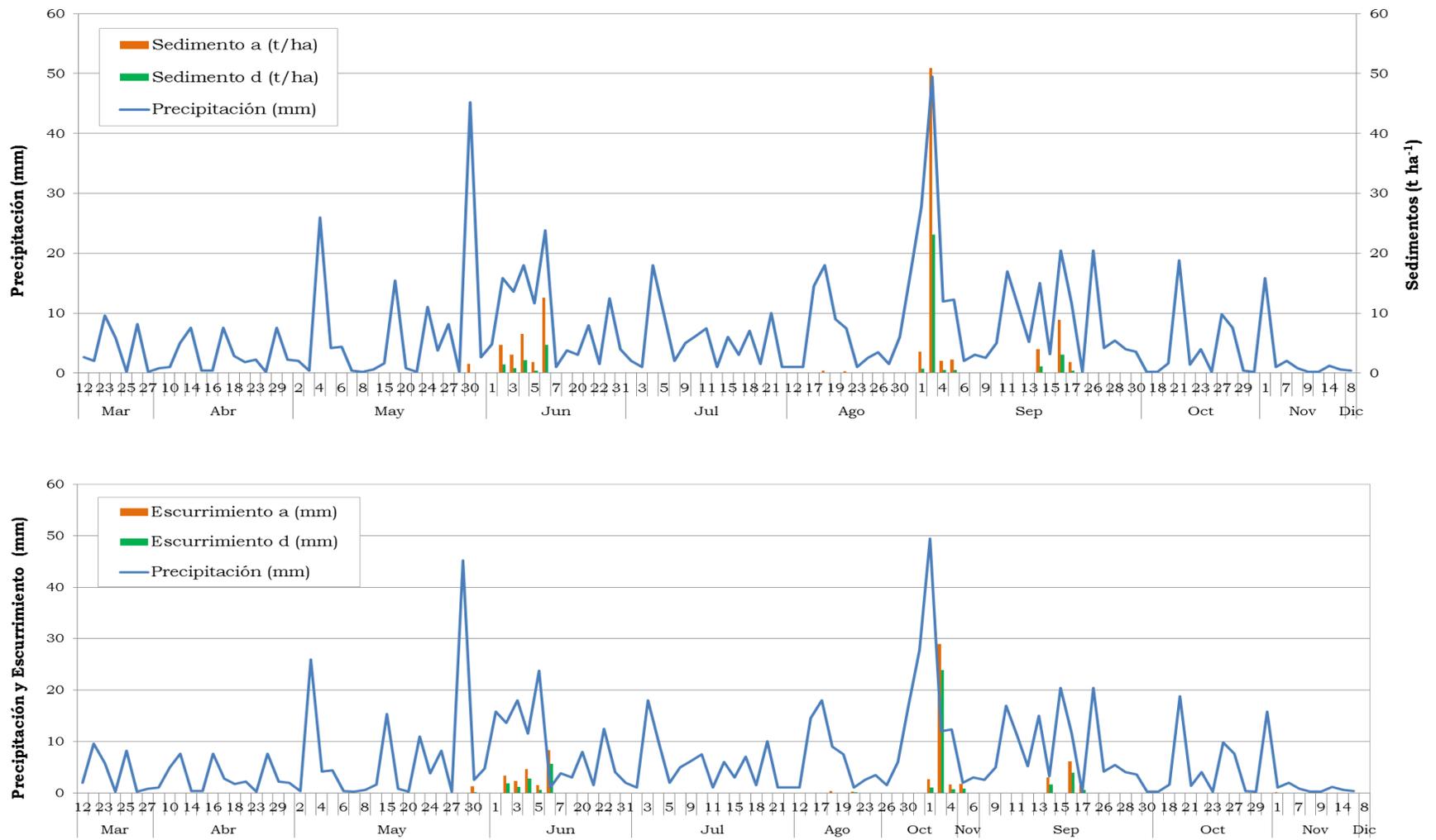


Figura 56. Precipitación, escurrimiento y sedimentos en la microcuenca de Tiltepec.

9. CONCLUSIONES

La cuenca de Tiltepec, a pesar de la presión sobre el uso de los recursos naturales a la que está sujeta, con el paso del tiempo han modificado parte de sus condiciones naturales, aún conserva algunas funciones de provisión de sus ecosistemas que soportan las actividades económicas de los pobladores.

La oferta de agua es suficiente para satisfacer la demanda de la población aun en las épocas de estiaje y para la población estimada para el 2030.

Los cambios en los hábitos de uso de combustibles, han reducido la presión sobre los bosques, sin embargo, la leña sigue siendo una fuente importante de combustible y el manejo que realiza la población en sus bosques, reforestaciones y aprovechamiento solo del material seco, les ha permitido contar con un suministro suficiente de este recurso.

Los agostaderos tienen potencial para recuperación de zonas degradadas y proporcionar áreas aptas para la producción ganadera, con el establecimiento de especies altamente palatables para el ganado.

Las obras y prácticas de conservación del suelo y agua, las reforestaciones y la reglamentación del uso de los agostaderos, han permitido mejorar los servicios de regulación de la cuenca y cambiar las condiciones del entorno; estas acciones han permitido que se reduzca la lámina escurrida y la producción de sedimentos.

10. BIBLIOGRAFÍA

Almeida, L., M. Nava, A. Ramos, M. Espinosa, M. de J. Ordoñez y J. Jujnovsky. 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta ecológica*. Núm. Esp: 53–64.

Álvarez Jr., M. 1961. Provincias Fisiográficas de la República Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. México.

Bagstad, K. J., D. J. Semmens, S. Waage and R. Winthrop. 2013a. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*. (5):27–39. doi: 10.1016/j.ecoser.2013.07.004.

Bagstad, K. J., D. J. Semmens, and R. Winthrop. 2013b. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona. *Ecosystem Services*. (5):40–50. doi: 10.1016/j.ecoser.2013.07.007.

Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*. (21):136–147. doi: 10.1016/j.tree.2012.06.003.

Balvanera, P., M. Uriarte, L. Almeida, A. Altesor, F. DeClerck, T. Gardner, J. Hall, A. Lara, P. Laterra, M. Peña, D. M. Silva, L. P. Romero, A. L. Vogl, L. F. Arreola, A. P. Caro, F. Gallego, M. Jain, C. Little, R. Oliveira, J. M. Paruelo, J. E. Peinado, L. Poorter, N. Ascarrunz, F. Correa, M. B. Cunha, A. P. Hernández and M. Vallejos. 2012. Ecosystem services research in Latin America : The state of the art. *Ecosystem Services*. 2:56-70 doi: 10.1016/j.ecoser.2012.09.006.

Balvanera, P., A. Castillo, E. Lazos, K. Caballero, S. Quijas, A. Flores, C. Galicia, L. Martínez, A. Saldaña, M. Sánchez, M. Maass, P. Ávila, Y. Martínez, L. M. Galindo y J. Sarukhán. 2010. Marcos conceptuales interdisciplinarios para el estudio de los servicios ecosistémicos en América Latina. *En:*

Valoración de los servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Lateral, P., E. G. Jobbagy y J. M. Paruelo (Editores) INTA. Buenos Aires, Argentina. Pp. 39–67.

Balvanera, P. y H. Cotler. 2007. Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica*. Núm. Esp: 8–15.

Balvanera, P. y H. Cotler. 2011. Los servicios ecosistémicos. *Biodiversitas*, (94):7–11.

Balvanera, P., H. Cotler, O. Aburto, A. Aguilar, M. Aguilera, M. Aluja, A. Andrade, I. Arroyo, L. Ashworth, M. Astier, P. Avila, D. Bitrán, T. Camargo, J. Campo, B. Cárdenas, A. Casas, F. Díaz, J. Etchevers, A. Guillard, E. González, A. Guevara, E. Lazos, C. López, R. López, J. Martínez, O. Masera, M. Mazari, A. Nadal, D. Pérez, R. Pérez, M. Quezada, J. Ramos, A. Robles, H. Rodríguez, J. Rull, G. Suzán, C. Vergara, S. Xolalpa, L. Zambrano y A. Zarco. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En: *Capital natural de México*. Vol. II: estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO (Editor). México. Pp. 185–245.

Boyd, J. and S. Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*. (63):616–626. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.01.002.

Calvet, L., E. Gómez and V. Reyes. 2012. Beyond food production: ecosystem services provided by home gardens. A case study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Northeastern Spain. *Ecological Economics*. (74):153–160. doi: 10.1016/j.ecolecon.2011.12.011.

Canadell, J., R. B. Jackson, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney, O. E. Sala and E. D. Schulze. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*. (108):583–595. doi: 10.1007/BF00329030.

Castillo, A., C. Godínez, N. Schroeder, C. Galicia, A. Pujadas y L. Martínez. 2009. El bosque tropical seco en riesgo: conflictos entre uso agropecuario, desarrollo turístico y provisión de servicios ecosistémicos en la costa de Jalisco, México. *Interciencia*. 34(12):844–850. doi: 0378-1844/09/12/844-07 \$ 3.00/0.

CONABIO. 2006 Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 71.

CONABIO. 2016 Ecosistemas de México, Biodiversidad Mexicana. <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex.html>. Consultado el 15 de noviembre de 2016.

CONAGUA. 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. SEMARNAT (Editor). México. pp. 79

CONAPO. 2010. Estimaciones del CONAPO con base en el Censo de Población y Vivienda 2010. Estimaciones de CONEVAL con base en el Censo de Población y Vivienda 2010. México.

CONAPO. 2015. Oaxaca: Indicadores demográficos, 2010-2030. Estimaciones y proyecciones de la población por entidad federativa. México. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos. Consultado el 15 de enero de 2016.

Contreras, J. R., V. Volke, J. L. Oropeza, C. Rodríguez, T. Martínez, y Á. Martínez. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana*. 21(3):427–435.

Contreras, J. R., V. Volke, J. L. Oropeza, C. Rodríguez, T. Martínez, y Á. Martínez. 2003. Disponibilidad y uso de leña en el municipio de Yanhuitlán. Oaxaca, *Terra Latinoamericana*. 21(3), pp. 437–445.

Cortes, T. H. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 168.

COTECOCA. 1982. Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana. Estado de Oaxaca. Tomos I y II. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). México, D.F.

CONAZA. 1994. Manejo y rehabilitación de agostaderos de las zonas áridas y semiáridas de México (Región norte). México. Pp.116.

Cruz, E. 1992. Los agostaderos comunales de Tiltepec. Un caso típico del deterioro ambiental de la Mixteca Alta Oaxaqueña. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 198.

Cruz, E. and R. Aguirre. 1992. The common rangelands of Tiltepec, a typical case of environmental deterioration. in Northwest Oaxaca, México. In: Perrier G. K. and C. W. Gay (Editors). Current natural resources development activities in developing nations. The International Affairs Committee Society for Range Management. Department of Range Science. College of Natural Resources. Utah State University. Utah. USA. Pp. 1-11.

Cuanalo, de la C. H., E. Ojeda, C. A. Ortiz, y O. A. Santos. 1989. Provincias, regiones y subregiones terrestres. Colegio de Posgraduados. Centro de Edafología. México. Pp. 624.

Daily, G. C. 1997. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press. Washington, DC.

Dhakai, A., M. Ooba, and K. Hayashi. 2014. Assessing impacts of forest conversion on terrestrial vertebrates combining forestry cost with HSI and

InVEST: case of Toyota city, Japan. *International Journal of Biodiversity Science. Ecosystem Services & Management.* 10(3):198-215. doi: 10.1080/21513732.2014.920420.

Díaz, H., M. M. Kothmann, W. T. Hamilton and W. E. Grant. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands. *Agricultural Systems.* 76(2):655-680. doi: 10.1016/S0308-521X(01)00115-9.

Díaz, R. P. y P. Balvanera. 2013. Identificación de interacciones entre servicios ecosistémicos y entre actores en la cuenca Alta del río Mixteco. Morelia, México. UNAM.

DOF. 1981. Resumen de coeficientes de Agostadero correspondiente al Estado de Oaxaca a nivel regional. México. Pp. 4.

DOF. 1992. Ley Agraria. México. Pp. 50.

DOF. 2000. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Social (SAGARPA). Tabla de equivalencias de ganado mayor y menor. México.

Dominati, E., M. Patterson and A. Mackay. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics.* 69(9):1858-1868. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002.

Eslamian, S. 2014. *Handbook of Engineering Hydrology: Modeling, Climate Change, and Variability.* CRC. Press. Florida, USA. Pp. 615.

FAO 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO. Roma. Pp. 86.

FAO 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Allen R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith (Eds). Riego y Drenaje 56. Roma. Pp. 298.

FAO 2009. Guía para la descripción de suelos. Cuarta Ed. Roma. Pp. 99.

Fernández, H., J. V. Oliver, M. Valiente, S. Verdú y N. Albert. 2014. Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*. 20(3):97–111.

Figueroa, B., H. G. Cortes, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y F. J. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica. Editado por SARH. México. Pp. 150.

Galán, C., P. Balvanera y F. Castellarini. 2012. Políticas Públicas hacia la sustentabilidad: Integrando la visión ecosistémica. CONABIO. México. Pp. 108.

Ghilardi, A., G. Guerrero and O. Masera. 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass and Bioenergy*. 31:475–491. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.02.003.

GIRA. 2014. Reporte actualizado de oferta y demanda de leña en el área de influencia del Proyecto Mixteca por municipios. Serrano M. y Martínez R. (Eds). México. Pp. 21.

Goldstein, J. H., G. Caldarone, T. K. Duarte, D. Ennaanay, N. Hannahs, G. Mendoza, S. Polasky, S. Wolny y G. C. Daily. 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Pp. 10. doi: 10.1073/pnas.1201040109.

Gómez, E., R. de Groot, P. L. Lomas and C. Montes. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to

markets and payment schemes. *Ecological Economics*. 69(6):1209–1218. doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.007.

De Groot, R. S., M. A. Wilson, and R. M. J. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives. 41:393–408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.

Guerrero, R., E. Jiménez y H. Santiago. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta Oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Ciencia y Mar*. XIV(40):61–68.

Guo, Z., X. Xiao and D. Li. 2000 An assessment of ecosystem services: Water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications*. 10(3):925–936. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0925:AAOESW]2.0.CO;2.

Guzmán, R., J. A. Zavala, G. Castaño y J. León. 2014. Comparación de la mirmecofauna en un gradiente de reforestación en bosques templados del centro occidente de México. *Madera y Bosques*. 20(1), pp. 71–83.

Haines R. and M. Potschin. 2011. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): 2011 Update. Paper prepared for discussion at the expert meeting on ecosystem accounts organised by the UNSD, the EEA and the World Bank, London, December 2011. European Environment Agency. Nottingham, UK.

Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperatura. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96–99. doi: 10.13031/2013.26773.

Huss, D. L. 1993. Papel del ganado doméstico en el control de la desertificación. PNUMA-FAO (Editor). Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x5320s/x5320s00.htm>.

Huss, D. L., A. E. Bernardon, D. L. Anderson y J. M. Brun. 1996. Principios de manejo de praderas naturales. INTA. FAO (Editores). Buenos Aires, Argentina.

INEGI. 2006. Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). México.

INEGI. 2009. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Aguascalientes. México.

INEGI. 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010. San Pedro Topiltepec, Oaxaca. México. Pp. 9.

INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER). México.

INEGI. 2015. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) con resolución espacial de 15 m. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico. www.inegi.gob.mx

INIFAP. 2011. Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo. Manual de capacitación. Folleto Técnico No. 4. Primera edición. México. Disponible en: http://utep.inifap.gob.mx/pdf_s/MANUAL_AJUSTE_DE_CARGA.pdf.

INIFAP. 2016. Estación Mixteca, Santo Domingo Yanhuitlán. México.

Kirkby, M. J. and R. P. Morgan. 1980. Soil erosion. John Wiley. New York, USA. Pp. 312.

Kunst, C., R. Ledesma, E. Monti, J. Casillo, y J. Godoy. 2007. Gramíneas indicadoras de condición en sitios de pastizal del sudoeste de Santiago del Estero. *Ria* 36(1):33–61.

Lara, A. y R. Urrutía. 2010 Servicios ecosistémicos de los bosques nativos en Chile: Estado del arte y desafíos. En: Valoración de los servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Laterra, P., E. G. Jobbagy y J. M. Paruelo (Editores) INTA. Buenos Aires, Argentina. Pp. 69–83.

Leh, M. D. K., M. D. Matlock, E. C. Cummings and L. L. Nalley. 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. (165):6–18. doi: 10.1016/j.agee.2012.12.001.

Lind, M. (2008). Arqueología de la Mixteca. *Desacatos* 27:13–32.

Lira, C. V. G. 2016. Sistemas de bioingeniería para el control y aprovechamiento de zonas de cárcavas, en la Mixteca Oaxaqueña. Tesis. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.

Masera, O., T. Arias, A. Ghilardi, G. Guerrero y P. Patiño. 2010. Estudio sobre la evolución nacional del consumo de leña y carbón vegetal en México 1990-2024. UNAM. México. Pp. 45.

MEA. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. Washington, DC.

Medina, G., R. Gutiérrez, F. G. Echavarría, M. D. Amador, y J. A. Ruíz. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica Pecuaria en México*, 47(2):135–144.

Merritt, W. S., R. A. Letcher and A. J. Jakeman. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*. 18(8–9):761–799. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.

Meynard, C., A. Lara, M. Pino, D. Soto, L. Nahuelhual, D. Nuñez, C. Echeverría, C. Jara, C. Oyarzún, M. Jiménez, y F. Morey. 2007. La integración de la ciencia, la economía y la sociedad: servicios ecosistémicos en la ecoregión de los bosques lluviosos valdivianos en el cono sur de Sudamérica. *Gaceta ecológica*. Número especial. 29–38.

Mockus, V. 1964. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. In: *National Engineering Handbook*. Part 630 Hydrology. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC. Pp. 24.

Morgan, R. P. C. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Mundi-Prensa. Pp. 343.

Nahuelhual, L., P. Donoso, A. Lara, D. Nuñez, C. Oyarzún, and E. Neira. 2007. Valuing ecosystem services of Chilean temperate rainforests. *Environment, Development and Sustainability*. 9(4): 481–499. doi: 10.1007/s10668-006-9033-8.

Nelson, E., G. Mendoza, J. Regetz, S. Polasky, H. Tallis, D. R. Cameron, K. MA. Chan, G. C. Daily, J. Goldstein, P. M. Kareiva, E. Lonsdorf, R. Naidoo, T. H. Ricketts, and M. R. Shaw. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 7(1):4–11. doi: 10.1890/080023.

NOAA 2012. *An Open-Source Version of the Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool*. NOAA. South Carolina, SC.

NRCS 1986. Urban hydrology for small watersheds. USDA. Washington, DC. Pp. 79.

NRCS 2016. Highly Erodible Land Defs. Caribbean Area Soils, USDA. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/pr/soils/?cid=nrcs141p2_037282. Consultado el 8 de diciembre de 2016.

Núñez, D., L. Nahuelhual, and C. Oyarzún. 2006. Forest and water: the value of native temperate forests in supplying water for human consumption. *Ecological Economics*. 58:606–616. doi: doi:10.1016/j.ecolecon.2005.08.010.

Oyarzún C. E., L. Nahuelhual, y D. Núñez. 2005. Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(3)-21(1):88–97 2004-2005.

Pellant M., P. Shaver, D. A. Pyke and J. Herrick. 2005. Interpreting indicators of rangeland health. Technical Reference 1734-6. United States Department of the Interior. Bureau of Land Management. Denver, Colorado. Pp. 122.

Perevochtchikova, M. y A. M. Ochoa. 2012. Avances y limitaciones del programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México 2003-2009. *Rev. Mex. Cien. For*, 3(10):89–112.

Polasky, S., E. Nelson, D. Pennington and K. A. Johnson. 2011. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*. 48(2), pp. 219–242. doi: 10.1007/s10640-010-9407-0.

Quétier, F., E. Tapella, G. Conti, D. Cáceres y S. Díaz. 2007. Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta ecológica*. Núm. Especial. 17–27.

Quiroz, J. y R. Orellana. 2010. Uso y manejo de leña combustible en viviendas de seis localidades de Yucatán, México. *Madera y Bosques*. 16(2):47–67.

RAN. 2016. Padrón e Historial de Núcleos Agrarios (PHINA). V3.0. México. Disponible en: <http://phina.ran.gob.mx/phina2/> Consultado: el 10 de octubre de 2016.

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. Mccool and D. C. Yoder. coordinators. 1997. *Predicting Soil Erosion By Water : a Guide To Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture (USDA). *Agriculture Handbook No. 703*, Pp. 404.

SAGARPA 2009. Comité Técnico Consultivo de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). Disponible en: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet77fe.html. Consultado: el 12 de octubre de 2016.

Santos, A., E. Estrada y G. Rivas. 2012. Uso de la leña y conservación del bosque en el volcán Huitepec, Chiapas, México. *Liminar. Estudios Sociales y Humanísticos*, 10(1):138–158.

Saxton, K. E. 2007. Soil Water Characteristics Program. Soil-Plant-Air-Water (SPAW). Washington, DC. USDA. Disponible en: <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/SPAW/SPAWDownload.html>.

SCS. 1961. Land-capability classification, USDA. *Agriculture Handbook No. 210*. Washington, DC. Pp. 21

Sharp, R., H. T. Tallis, T. Ricketts, A. D. Guerry, S. A. Wood, R. Chaplin-Kramer, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstol, D. Pennington, G. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, K. Arkema, E. Lonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C. K. Kim, G. Guannel, M.

Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt, R. Griffin, K. Glowinski, N. Chaumont, A. Perelman, M. Lacayo, L. Mandle, P. Hamel, A. L. Vogl, L. Rogers and W. Bierbower. 2015. InVEST 3.20 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund.

SIAP. 2015a. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp. Consultado: el 21 de septiembre de 2016.

SIAP. 2015b. Cierre de la producción pecuaria por municipio. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/anpecuario_siapx_gobmx/indexmpio.jsp Consultado: el 21 de septiembre de 2016.

SIAP. 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp Consultado: el 10 de enero de 2017.

SMN. 2017. Normales climatológicas del Estado de Oaxaca. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=oax>. Consultado: el 18 de enero de 2017.

Spores, R. 1967. The Mixtec Kings and Their People. Norman: University of Oklahoma Press. Pp. 265.

Spores, R. 1969. Settlement, farming technology, and environment in Nochixtlan Valley. *Science*. 166(3905):557-569.

Sullivan, S. 2009. Green capitalism, and the cultural poverty of constructing nature as service-provider. *Radical Anthropology*. 3(1756-090X):18-27.

UICN. 2009. La crisis de la vida silvestre es peor que la crisis económica. Disponible en: http://www.iucn.org/news_homepage/?3460/3/La-crisis-de-la-

vida-silvestre-es-peor-que-la-crisis-economica--dice-la-UICN. Consultado: el 6 de abril de 2016.

Villa, A., F. Paz, M. J. Pérez, C. Rojas, M. Rodríguez, S. Ortiz, M. Casiano y H. Díaz. 2014. Estimación de la capacidad de carga animal en agostaderos usando un índice de vegetación de pendientes normalizadas. *Agrociencia*, 48(6):599–614.

Williams, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. U.S. Department of Agriculture (USDA) Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington, DC. Pp. 244–252.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook No. 537.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma.

WWF. 2010. Uso del suelo y vegetación de la Región Mixteca. México.

WWF. 2015. El enfoque de los servicios ecosistémicos y herramientas para evaluarlos en la Mixteca oaxaqueña. Documento de trabajo. México.

Zhang, Y., J. DeGroot, C. Wolter, and R. Sugumaran. 2009. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk., *Land Degradation & Development Integration*, 37:1–21.

Zhiyun, O., J. Yu, Z. Tongqian, and Z. Hua. 2011. Ecosystem Regulating Services and their Valuation of Hainan Island, China. *Journal of Resources and Ecology*. 2(2):132–140. doi: 10.3969/j.issn.1674-764x.2011.02.005.