



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

**“BALANCE HIDROLÓGICO Y VALORACIÓN ECONÓMICA
DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA MICROCUENCA
DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAX.”**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**

P R E S E N T A :

LUIS MIGUEL OROSCO PAREDES



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Edo. de México, Junio de 2006

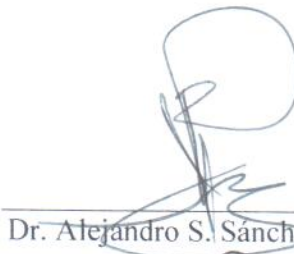


**“BALANCE HIDROLÓGICO Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA
PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO
ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAX.”**

Tesis realizada por **Luis Miguel Orosco Paredes** bajo la dirección del **Dr. Alejandro S. Sánchez Vélez** y el Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:


Dr. Alejandro S. Sánchez Vélez

ASESOR:


Dr. Adolfo Palma Brujano

ASESOR:


Dr. Diódoro Granados Sánchez

Junio de 2006.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme llegar a esta etapa de la vida y ver realizar cada una de mis metas, él que siempre ha sido generoso conmigo, a pesar de las difíciles pruebas que se han puesto en mi camino, nunca me ha dejado solo.

A la Universidad Autónoma Chapingo y la División de Ciencias Forestales por brindarme todas las herramientas necesarias para realizar mis estudios de Postgrado.

Al CONACYT, por la valiosa ayuda económica permitiéndome cursar la Maestría.

A mi Maestro Dr. Alejandro S. Sánchez Vélez por su dedicación y paciencia en la realización de este trabajo.

Al Dr. Adolfo Palma Trujano, por sus valiosos y atinados comentarios en la elaboración de la presente tesis, pero también por su amistad.

Al Dr. Diódoro Granados Sánchez, por su valiosa participación y sugerencias en la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Miguel Mejía Acevedo, por el incondicional apoyo, en la parte cartográfica y atinadas sugerencias.

Al Dr. Isidro Villegas Pérez por su valiosa ayuda, comentarios y propuestas en la parte edafológica de éste trabajo.

Al Maestro Ing. Francisco Ponce Maldonado por su colaboración incesante en el tema de Infiltración.

A la Ing. Janett por su apoyo para la obtención de datos de Evapotranspiración.

A la Consultoría de Servicios Técnicos Forestales, Tlaxco, dirigida por el Ing. Eliverio González, por la información proporcionada y la ayuda prestada.

Al Ing. Enrique Fernández Pedraza, por su amistad y buenos consejos en mi desempeño profesional.

Al Sr. Patricio Rivera, encargado de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tlaxco, por su cooperación y disponibilidad en la información del agua potable.

A la Sra. Lilia Flores Sifuentes encargada de la Biblioteca y Sr. Melesio Rosas Espinosa encargado del Laboratorio de Fotogrametría por el préstamo de materiales bibliográficos y cartográficos.

A Sra. Rocio Candelas y Lolita, por su valiosa disposición en apoyo con material de papelería.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a una etapa más de mi vida y poderla compartir con mis seres queridos.

A mis Padres:

Sra. Rosa Paredes Ortega, mi pilar y principal apoyo moral, y quien siempre ha estado presente para animarme y apoyarme en los momentos más difíciles. Te Amo Mamá.

Sr. Isaías Orozco Caballero, quien con incansable ejemplo me ha enseñado a ser un hombre de bien, trabajador, honesto y humilde. Te Amo Papá.

A mis hermanos:

Laura Azucena, Elia Ivonne, Isaías y Juan Antonio, que siempre han sido la inspiración de todos mis logros, los Amo.

A mis sobrinos:

Lizett, Marialy, Ivan, Julian y Julissa que representan el mañana y que tienen una tarea difícil al enfrentar los nuevos retos de un mundo impredecible.

A mi Abuelo:

Sr. Elpidio Orozco Galeote, por ser un gran ejemplo a seguir y enseñarme esas pequeñas cosas de la vida que sólo el paso del tiempo nos deja como experiencias.

A Denny mi linda chaparrita:

Tú que has compartido conmigo vivencias inolvidables y que llegaste para ser parte del equilibrio en mi vida, quien ha sido testigo de mis alegrías y tristezas, por ser quien me alienta y apoya en esos momentos tan difíciles, además por entender muchas veces mi ausencia. GRACIAS POR ESTAR CONMIGO. TE AMO.

A la familia Pineda Ávila:

Quienes me han permitido convivir con ellos y sólo he recibido buenas atenciones y hospitalidad de su parte, comparto con ustedes este logro.

A mis maestros:

Dr. Alejandro S. Sánchez Vélez, Dra. Rosa Ma. García Núñez y Dr. Adolfo Palma Trujano, quienes además de ser mis guías en este largo proceso del aprendizaje, me han enseñado el camino y valor de la amistad.

A mis Amigos y amigas:

José Rudier, Miguel Mejía, Mizael Daniel Hernández, Oscar Bello, Soiber Adalberto, Daniel Pérez, Guillermo Solís, Miguel Urrutia, Juan Cruz e Isidro Villegas.

Lucero González, Jeannette Acosta, Lorena Ángel, Ariana Acosta y Jazmín Hernández.

Porque fueron quienes de diferentes maneras siempre me apoyaron y alentaron.

Dios siempre los Bendiga...

ATTE.

Luis M. Orozco Paredes

DATOS BIOGRÁFICOS.

El autor de la presente tesis nació el 22 de Junio de 1979 en el municipio de Tlaxco, Estado de Tlaxcala y es originario de la población Unión Ejidal Tierra y Libertad perteneciente al municipio de Tlaxco. Realizó estudios básicos en la misma población, de 1985-1994. Estudios de nivel medio superior en el Colegio de Bachilleres del Estado de Tlaxcala (COBAT), Plantel 07 Buenavista en la población de San Andrés Buenavista de 1994 a 1997.

Estudios de Nivel Superior en la Universidad Autónoma Chapingo, cursando Propedéutico 1997-1998, y posteriormente la Carrera de Ingeniero Forestal de 1998 a 2002. Trabajó como colaborador en la Consultoría de Servicios Técnicos Forestales, Tlaxco en el año 2003. Estudios a Nivel Postgrado (Maestría en Ciencias), en la Universidad Autónoma Chapingo en el periodo 2004-2006.

“BALANCE HIDROLÓGICO Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAXCALA”

HYDROLOGICAL BALANCE AND ECONOMIC APPRAISAL OF WATER YIELD IN THE ZAHUAPAN RIVER WATERSHED, TLAXCO, TLAXCALA

Orosco-Paredes Luis Miguel¹

Sánchez-Vélez Alejandro²

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio durante los años 2004-2006 en la microcuenca del Río de Zahuapan en el Estado de Tlaxcala, México, para entender la distribución de la lluvia en términos de la interceptación, infiltración, almacenamiento de la tierra, escurrimiento, transpiración de las plantas y evaporación. El objetivo fue conocer los procesos de producción de agua de los diferentes estratos y coberturas de la vegetación, y estimar el valor económico de estos servicios hidrológicos en comparación del aprovechamiento maderero convencional.

Respecto al 100% de la precipitación, el balance hídrico anual de la microcuenca presentó interceptación del 12.2%, infiltración 7.5%, evapotranspiración real 44.1%, escurrimiento superficial 31.1%, recarga subterránea 3.3% y agua retenida en el suelo 1.8%.

Después de obtener el volumen de agua de los diferentes estratos de bosque por hectárea, se estableció una asignación de valor económico de esos servicios hidrológicos de acuerdo al costo de oportunidad y costos de sustitución, de acuerdo a la literatura convencional. La comparación entre el manejo del bosque sólo para la extracción de madera, es menos rentable y poco sustentable, en combinación con los métodos de protección del bosque para la producción de agua junto con el aprovechamiento maderable limitado.

Palabras Clave: Interceptación del dosel, infiltración, evapotranspiración, servicios ambientales, costos de sustitución.

ABSTRACT

A field study was performed during the years 2004-2006 in the Zahuapan River watershed in Tlaxcala state, Mexico in order to understand the rainfall distribution in terms of interception, infiltration, soil storage, runoff, plant transpiration and evaporation. The objective was to obtain information about the process of water production from the different forest stands and vegetation covers, and then estimate the economic value of this hydrological service in comparison to conventional timber production.

With respect to 100% precipitation, the annual hydrological balance of the watershed presented the following results: 12.2% interception, 7.5% infiltration, 44.1% real evapotranspiration, 31.1% surface runoff, 3.3% underground water supply, and 1.8% water retained underground because of the effect of physical properties.

After obtaining the volume of water that the different forest stands can yield per hectare, an economic value was assigned to these hydrological services in relation to opportunity and substitution costs according to conventional literature. Forest management for timber extraction alone is less profitable and less sustainable than practices that combine methods of forest protection for water production with a limited extraction of wood products.

Key words: Interception loss, infiltration, evapotranspiration, environmental services, substitution cost.

¹Tesista

²Director de tesis

¹Thesis author

²Thesis director

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS.....	5
4. HIPÓTESIS.....	5
5. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
5.1. CAMBIO CLIMÁTICO Y SU INFLUENCIA EN LOS FENÓMENOS HIDRO-METEOROLÓGICOS....	6
5.2. PROBLEMÁTICA DEL AGUA A ESCALA LOCAL Y GLOBAL.....	14
5.2.1. Sobrepoblación mundial y escasez de agua	18
5.2.2. Crecimiento de la población en México y la demanda de agua	19
5.3. EL MANEJO DEL BOSQUE Y SU INFLUENCIA EN LA CAPTACIÓN DE AGUA	20
5.3.1. Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM).....	21
5.3.2. Método de Desarrollo Silvícola (MDS).....	22
5.3.2.1. Tratamientos Silvícolas	23
5.3.3. Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI).....	23
5.4. EFECTOS DEL MANEJO DEL BOSQUE EN EL CICLO HIDROLÓGICO	24
5.4.1. Los Bosques; productores de agua	28
5.5. BALANCE HÍDRICO	30
5.6. PROCESOS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO.....	30
5.6.1. Precipitación	30
5.6.1.1. Tipos de Precipitación	31
5.6.1.2. Intensidad de lluvia	33
5.6.2. Intercepción del agua de lluvia por el bosque.....	34
5.6.2.1. Pérdida del agua por intercepción	35
5.6.2.2. Componentes de la intercepción	35
5.6.2.3. Intercepción del dosel.....	36

5.6.2.4. Intercepción del suelo forestal (litter).....	39
5.6.3. Evapotranspiración.....	39
5.6.4. Factores que influyen en la Evapotranspiración.....	41
5.6.5. Medida y cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) y Evapotranspiración Real (ETR)	42
5.6.5.1. Métodos para el Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP).....	43
5.6.5.2. Método para el calculo de la Evapotranspiración Real (ETR).....	44
5.6.7. Influencia de la vegetación en la evapotranspiración	45
5.6.8. Escurrimiento Superficial	46
5.6.8.1. Métodos para estimar los escurrimientos.....	47
5.6.9. Infiltración	47
5.6.9.1. Medición de la infiltración.....	49
5.6.10. Propiedades físicas del suelo y su influencia en la infiltración	50
5.6.10.1. Textura.....	50
5.6.10.2. Estructura.....	53
5.6.10.2.1. Descripción de las estructuras.....	53
5.6.10.3. Densidad Aparente	55
5.6.10.4. Contenido de Humedad	57
5.6.10.5. Volumen Poroso.....	58
5.6.10.5.1. Cálculo del volumen poroso	59
5.6.10.5.2. Factores que influyen en el volumen poroso.....	60
5.6.10.6. Superficie Específica	60
5.6.10.7. Consistencia.	61
5.6.10.8. Color.....	62
5.6.10.9. Profundidad.....	62
5.6.10.10. Pendiente del terreno	63
5.6.10.11. Contenido de Materia Orgánica	63
5.6.10.12. Humus.....	63
5.6.10.13. Hojarasca	63
5.6.10.14. Permeabilidad.....	63

5.6.11. Ley de Darcy y Modelo de Green-Ampt	64
5.6.11.1. Movimiento del agua en el suelo.....	66
5.6.11.2. Movimiento del agua en la zona no saturada	68
5.6.11.3. Movimiento del agua en la franja capilar	68
5.6.11.4. Movimiento del agua en la zona saturada.....	69
5.6.12. Aguas Subterráneas	69
5.6.12.1. Importancia de las aguas subterráneas.....	69
5.6.12.2. Distribución de las aguas subterráneas	70
5.6.13. Formaciones geológicas y su relación con el agua.....	70
5.6.13.1. Tipo de acuíferos y su comportamiento.....	73
5.7. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RECURSO HÍDRICO.....	76
5.8. METODOLOGÍA DE VALORACIÓN ECONÓMICA	79
5.8.1. Valoración de la Oferta Hídrica	79
5.8.2. Valor de la Productividad Hídrica del Bosque.....	79
5.8.3. Valor de Protección y Mantenimiento.....	80
5.8.4. Valor del Agua según su Uso (Insumo de la Producción) - Valor Monetario del Agua en la Producción Agrícola	80
5.8.5. El Recurso Hídrico como un Flujo Permanente de Ingreso.....	82
5.8.6. Valoración de la Demanda Hídrica – Método de Valoración Contingente (MVC) ..	82
5.9. PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES	83
5.9.1. Experiencias en México.....	83
5.9.2. Servicios ambientales de los ecosistemas	85
5.10. POLÍTICAS PÚBLICAS Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL	86
5.11. MERCADOS DE AGUA Y ESTABLECIMIENTO DE TARIFAS.....	89
6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	92
6.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	92
6.1.1. Clima	92
6.1.2. Geología.....	94
6.1.3. Suelos	94
6.1.4. Hidrología.....	94

6.1.5. Aspectos Socioeconómicos.....	94
6.1.6. Aspectos Ecológicos.....	97
6.1.6.1. Tipos de Vegetación.....	97
6.1.6.2. Fauna	97
6.1.6.3. Uso del Suelo	98
6.1.7. Problemática de la zona.....	98
7. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	100
7.1. CARTOGRAFÍA Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	100
7.2. MEDICIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS DE LA MICROCUENCA.....	100
7.3. BALANCE HÍDRICO	101
7.3.1. Precipitación	101
7.3.2. Intercepción de la Precipitación	102
7.3.3. Infiltración	102
7.3.4. Evapotranspiración Real.....	107
7.3.5. Escurrimiento superficial.....	107
7.3.6. Recarga Subterránea.....	108
7.4. VALORACIÓN ECONÓMICA-ECOLÓGICA DE SERVICIOS HIDROGRÁFICOS.....	109
7.4.1. Cuantificación y cálculo del recurso hídrico.....	110
7.4.1.1. Cuantificación y cálculo de la oferta hídrica	110
7.4.1.2. Cuantificación y cálculo de la demanda hídrica.....	111
7.5. POLÍTICAS PÚBLICAS Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL.....	111
7.6. INTEGRACIÓN DE MERCADOS DE AGUA Y ESTABLECIMIENTO DE TARIFAS.....	112
8. RESULTADOS.....	113
8.1. CARACTERIZACIÓN CARTOGRÁFICA Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	113
8.2. MEDICIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS DE LA MICROCUENCA.....	113
8.3. BALANCE HÍDRICO	114
8.3.1. Precipitación	115
8.3.2. Intercepción de la precipitación	117
8.3.5. Infiltración	119

8.3.3. Evapotranspiración Real (ETR)	126
8.3.4. Escurrimiento superficial	133
8.3.6. Recarga subterránea	140
8.4. VALORACIÓN ECONÓMICA-ECOLÓGICA DE SERVICIOS HIDROGRÁFICOS	143
8.4.1. Cuantificación y cálculo del recurso hídrico.....	146
8.4.1.1. Cuantificación y cálculo de la oferta hídrica	147
8.4.1.2. Cuantificación y cálculo de la demanda hídrica.....	149
8.5. POLÍTICAS PÚBLICAS	151
8.6. INTEGRACIÓN DE MERCADOS DE AGUA Y ESTABLECIMIENTO DE TARIFAS.....	155
9. CONCLUSIONES	158
10. BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	169
ANEXOS	
ANEXOS CARTOGRÁFICOS	

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	Página
Cuadro 1. Evolución del huracán Stan.	7
Cuadro 2. Cifras oficiales de los daños causados por “Stan” en México:	10
Cuadro 3. Decremento de disponibilidad del recurso hídrico en México y su relación con el crecimiento de la población (proyección al 2025).	20
Cuadro 4. Métodos de manejo forestal y su influencia en el Balance Hídrico	27
Cuadro 5. Clasificación de suelos.	51
Cuadro 6. Descripción de los tipos de estructuras, su localización e influencia.....	54
Cuadro 7. Texturas del suelo y datos de punto de marchitez permanente, capacidad de campo y capacidad de agua aprovechable.....	58
Cuadro 8. Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua.....	73
Cuadro 9. Relación de los principales estados que registraron mayores superficies	84
Cuadro 10. Áreas Promisorias para el Establecimiento de Mercados de Servicios Ambientales.....	85
Cuadro 11. Datos climatológicos promedio de la estación Tlaxco, Tlax.....	93
Cuadro 12. Parámetros de la microcuenca	114
Cuadro 13. Precipitación media anual en la microcuenca del río Zahuapan.	115
Cuadro 14. Precipitación por rodal en m ³	116
Cuadro 15. Intercepción por rodal en m ³	118
Cuadro 16. Resumen de valores de los parámetros empleados para el cálculo de la infiltración	124
Cuadro 17. Estimación del volumen infiltrado en m ³ por tipo de uso del suelo.....	125
Cuadro 18. Infiltración por rodal en m ³	125
Cuadro 19. Valores de K _a (factor de corrección), de acuerdo a la latitud y el mes del año.	127
Cuadro 20. Estimación de la ETP mensual en la microcuenca de acuerdo	128

Cuadro 21. Coeficientes globales por tipo de vegetación	130
Cuadro 22. Estimación de la ETR para cada tipo de uso del suelo de acuerdo al método de Blanney-Criddle	131
Cuadro 23. Estimación de la ETR ponderada por rodal.....	132
Cuadro 24. Grupos hidrológicos de suelo propuestos por SCS-USDA, 1972.	134
Cuadro 25. Valores de curvas numéricas (CN), para estimar la Escorrentía (SCS-USDA, 1972).....	135
Cuadro 26. Determinación de los coeficientes parciales de escurrimiento por tipo de vegetación.....	137
Cuadro 27. Escurrimiento superficial en m ³ por tipo de uso del suelo.	138
Cuadro 28. Escurrimiento medio en m ³ por rodal.....	139
Cuadro 29. Volumen de agua extraído para cada pozo y el total anual en m ³ /año.	142
Cuadro 30 Balance hídrico anual de la microcuenca del Río Zahuapan.....	142
Cuadro 31. Estimación del ingreso (\$) anual (ha/año), de acuerdo al ICA.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
Figura 1. Fotografía aérea inclinada mostrando las inundaciones en el Estado de Chiapas por el huracan Stan”.....	8
Figura 2. Imágenes del poder devastador del huracán “Stan” en Chiapas.....	8
Figura 3. Carretera bloqueada y línea de transmisión eléctrica dañada en el Estado de Chiapas.....	9
Figura 4. Puente en Chiapas dañado por deslave de las fuertes corrientes de agua.....	9
Figura 5. Calles y vehículos sepultados por grandes cantidades de lodo.....	10
Figura 6. Inundaciones causadas por el huracán “Wilma” en Cancún, Q. Roo.....	11
Figura 7. Centros comerciales, viviendas, hoteles y restaurantes dañados.....	12
Figura 8. Señales de tránsito y anuncios espectaculares derribados por los vientos.....	12
Figura 9. Líneas de transmisión eléctrica dañadas por el huracán.....	13
Figura 10. Triángulo de Texturas propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1964)	52
Figura 11. Esquema de las variables que intervienen en el Modelo de Green-Ampt.	65
Figura 12. Movimiento del agua en las diferentes capas del suelo	68
Figura 13. Tipos de Textura presentes en los acuíferos	72
Figura 14. Esquema de un acuífero libre y confinado	74
Figura 15. Esquema de un acuífero semiconfinado	75
Figura 16. Representación del comportamiento del agua en un pozo.....	76
Figura 17. Ubicación geográfica de la microcuenca del Río Zahuapan.....	92
Figura 18. Climodiagrama de parámetros climatológicos de la estación meteorológica Tlaxco.....	93
Figura 19. Crecimiento Poblacional en los últimos 15 años en el municipio y localidad de Tlaxco, Tlax.....	95

Figura 20. Comportamiento Poblacional por sexo en los últimos 15 años en la localidad de Tlaxco, Tlax.....	95
Figura 21. Población económicamente activa e inactiva	96
Figura 22. Balance hídrico de la microcuenca del río Zahuapan, Tlaxco, Tlax.....	147
Figura 23. Proyección del ritmo de crecimiento de la población al año 2020.	149
Figura 24. Tendencia del crecimiento poblacional y disponibilidad del recurso hídrico.....	150

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolló en la microcuenca del Río Zahuapan, Tlaxco, Tlaxcala, unidad generadora de servicios ambientales hidrológicos, de los cuales la localidad de Tlaxco se abastece, particularmente agua potable, base fundamental de sus actividades socioeconómicas.

México es un país con abundantes recursos naturales, desgraciadamente al no ser adecuadamente manejados se ha contribuido al deterioro y agotamiento acelerado de los mismos. De todos sus recursos naturales el agua es uno de los más impactados e importante, cuya disponibilidad se ve cada vez más reducida, vislumbrándose una situación conflictiva en su distribución en el mediano plazo.

Problemas de orden social, económico, estructural y político han acelerado las presiones sobre los recursos, afectando gravemente los suelos, el agua, clima y biodiversidad, incidiendo en la calidad de los servicios ambientales que tales recursos nos proveen, tales como: disponibilidad de agua, control de inundaciones, mantenimiento de la vida útil de los embalses, y de recursos genéticos. Por lo tanto es necesario buscar soluciones de carácter integral determinando las causas de cada uno de los factores que intervienen en el proceso de deterioro.

El manejo integral de cuencas considera el agua como un recurso de origen forestal ya que las masas boscosas juegan un papel estratégico en la calidad y cantidad de agua, ya que las regiones montañosas arboladas al captar la lluvia a través de su follaje, troncos y ramas, amortiguan la fuerza de caída de las gotas para evitar la erosión del suelo y la formación de avenidas que suele producir la ausencia de cobertura vegetal, generando inundaciones devastadoras. Además, si el agua que precipita es abundante, penetra en ese “colchón” formado por la materia orgánica, hojarasca y humus infiltrándola lentamente, para formar corrientes subterráneas o arroyos superficiales perennes que satisfacen los requerimientos de agua en especies vegetales y animales (Sánchez, 1987).

Actualmente se habla de la cuenca como la unidad básica para la planeación, manejo y conservación de los recursos naturales, aprovechando la relación e interacción que se da entre los diferentes elementos que la constituyen, dándole el carácter de unidad vital.

Siendo la cuenca o microcuenca la unidad proveedora de Servicios Ambientales como son el agua, captura de carbono, belleza escénica y mantenimiento de la biodiversidad, de los cuales el ser humano es el principal usuario y demandante, pero que a su vez, por tener el carácter de recursos con un valor económico indirecto o sin mercado, se han considerado “intangibles” al no representar su apropiación ningún costo para los usuarios. Tal situación había también considerado en muchos casos a los bosques como de libre acceso y sus servicios comunes.

2. ANTECEDENTES

La microcuenca del Río Zahuapan ha representado una forma de subsistencia (ingresos económicos) para aquellos propietarios de terrenos dentro de la misma, aprovechando los recursos naturales que se generan, gran parte de la superficie es de uso forestal, seguido de la agricultura. Dentro de la microcuenca se encuentran diferentes tipos de vegetación y cuenta con diversidad de fauna, indicando que la zona es potencial para el aprovechamiento de los recursos naturales y de ésta manera brindar productos maderables, leña, fauna para la cacería, plantas medicinales, agua, recreación, etc.

La mayor parte de la superficie forestal de la microcuenca ha estado bajo manejo técnico por lo menos los últimos 15 años, anteriormente por la consultoría forestal “Malintzi” y actualmente por los “Servicios Técnicos Forestales Tlaxco”, aplicando métodos de manejo que contemplan el objetivo de la máxima productividad maderable, tales como el Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM), Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI).

Debido al incontenible *crecimiento demográfico*¹, el continuo avance de la frontera agrícola, la intensa actividad de extracción de madera y la poca conciencia ambiental, la microcuenca del Río Zahuapan, presenta un cuadro de deterioro que urge revertir diseñando estrategias técnicas, esquemas económicos y organizativos que promuevan la participación de todos los sectores sociales y modificar los efectos ocasionados por la sobre explotación de sus recursos particularmente el agua.

Aunado a la problemática socioeconómica antes mencionada, también intervienen factores naturales como la susceptibilidad del suelo a la erosión (erodabilidad), y fenómenos meteorológicos (intensidad de las lluvias, vientos, radiación solar, etc.), que aunque no son provocados por el hombre directamente, inciden en el proceso de deterioro con el transcurso de los años, ya que toda la microcuenca en algún momento

¹ Es el número de personas en que aumenta o disminuye una población de una entidad, en un año dado, por cada cien (100) personas de la población de base.
En: <http://www.pnud.org.ve/IDH99/defperfil.htm>

estuvo cubierta de vegetación boscosa, con un flujo hídrico constante todo el año en el Río Zahuapan y donde se tuvo, un microclima mucho más fresco que el actual, etc.

Todo esto ha empezado a despertar el interés de las instituciones, sociedad y estudiosos que buscan conocer a fondo la relación entre los diferentes elementos que han participado en el proceso de deterioro del lugar, para diseñar alternativas y soluciones que ayuden a revertir los impactos que ahora se presentan, ofreciendo nuevas oportunidades y estímulos a los dueños y poseedores de los recursos para la conservación y manejo sustentable de su patrimonio forestal.

3. OBJETIVOS

La presente investigación contempla los siguientes objetivos:

- a) Contribuir en el conocimiento de los efectos de los componentes del balance hidrológico en la captación y producción de agua.
- b) Adoptar la metodología más adecuada para la valoración económica de la producción de agua como servicio ambiental que proporciona el bosque.
- c) Con base en el balance hidrológico, evaluar la disponibilidad y demanda de agua actual y al año 2020 de acuerdo al crecimiento de la población de la localidad de Tlaxco.

4. HIPÓTESIS

- a) Los componentes del balance hidrológico tienen influencia directa con el potencial de captación y producción de agua en un bosque.
- b) Los servicios ambientales hidrológicos (control de inundaciones, provisión de agua, recarga de acuíferos, etc.) representan un valor económico superior al del aprovechamiento maderero convencional.
- c) El aumento de la población implica mayor demanda de agua, pero la disponibilidad de la misma se reduce debido a la ausencia de estrategias que hagan más eficiente el uso del vital líquido.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se presenta la importancia del balance hídrico como herramienta básica en la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales de un determinado lugar o región, y su estrecha relación con el ciclo hidrológico, manejo y aprovechamiento del bosque derivado del crecimiento de la población, que ha despertado el interés de realizar estudios que vinculen aquellos aspectos directos o indirectos como: el cambio climático y los fenómenos hidro-meteorológicos, crecimiento demográfico y escasez del recurso hídrico, las prácticas de manejo usadas en el aprovechamiento maderable, la generación de servicios ambientales y su valoración económica, análisis de la normatividad y políticas públicas en materia ambiental; con el fin de establecer las estrategias más adecuadas que beneficien a los sectores sociales.

5.1. Cambio Climático y su influencia en los fenómenos hidro-meteorológicos

En las últimas décadas las actividades humanas han estado contribuyendo al aumento de la temperatura atmosférica, especialmente por la tala inmoderada y por el uso de combustibles fósiles que contribuyen a la acumulación de gases de efecto invernadero, especialmente bióxido de carbono (CO_2), dando origen al Cambio Climático Global, y que a nivel local o regional modifica el balance hidrológico provocando el crecimiento y desvío del cauce de los ríos, inundando las partes bajas de las cuencas, donde por lo general se encuentran asentamientos poblacionales, causando decesos humanos y cuantiosas pérdidas en infraestructura (CINU, 2000).

Los fenómenos meteorológicos son parte de la naturaleza y todavía está fuera del alcance del hombre poder controlarlos, únicamente han sido estudiados para saber su comportamiento, fuerza, magnitud y poder destructivo; sin embargo, en los últimos años debido al Cambio Climático el comportamiento de éstos se ha modificado siendo más impredecibles y destructivos.

Los cada vez más frecuentes e intensos huracanes son quizá los fenómenos meteorológicos más poderosos del planeta, causando daños a todo lo que encuentran a su paso y el hombre no está exento de experimentar la descomunal fuerza de éstos

fenómenos de la naturaleza. En México la presencia de huracanes es cada vez más frecuente en cada estación de lluvias, algunos de mayor intensidad y otros no tanto, tal fue el caso del año 2005, cuando dos meteoros en el mes de octubre provocaron daños cuantiosos. El paso del huracán “Stan” por el sureste de México causó daños en las entidades de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla y Veracruz, con una duración de 5 días desde su origen en el Océano Atlántico hasta su disipación en la región montañosa de Oaxaca (Cuadro 1), dejando bandas nubosas que dieron lugar a lluvias intensas que afectaron con inundaciones, deslaves y daños a la infraestructura (CNA, 2005).

Cuadro 1. Evolución del huracán Stan.

Depresión tropical	Octubre 01 (09 GMT)
Tormenta tropical	Octubre 02 (06 GMT)
Huracán	Octubre 04 (09 GMT)
Tormenta tropical	Octubre 04 (18 GMT)
Depresión tropical	Octubre 05 (03 GMT)
Disipación	Octubre 05 (09 GMT)

Fuente: CNA (2005)

Los mayores registros de lluvia máxima en 24 horas fueron de: 307 mm en Novillero, Chis., 305.3 mm en Cuetzalan, Pue., 273 mm en Jacatepec, Oax., 247 mm en Veracruz, Ver., de 143 mm en Peto, Yuc., y 137.5 mm en Cancún, Q.R. (CNA, 2005). Lo cual da una idea de la capacidad destructiva de estos meteoros.

Lo anterior muestra que fueron lluvias de alta intensidad y duración provocando inundaciones por la crecida de los ríos, generando deslaves (Fig 1.).



Figura 1. Fotografía aérea inclinada mostrando las inundaciones en el Estado de Chiapas por el huracán “Stan”.

Como indica la Figura 2, este fenómeno meteorológico “Stan”², provocó la muerte de muchas personas y la pérdida del patrimonio de miles de familias de bajos recursos, daños de los servicios básicos de energía, agua potable y vías de comunicación (El Universal, 07/10/05).

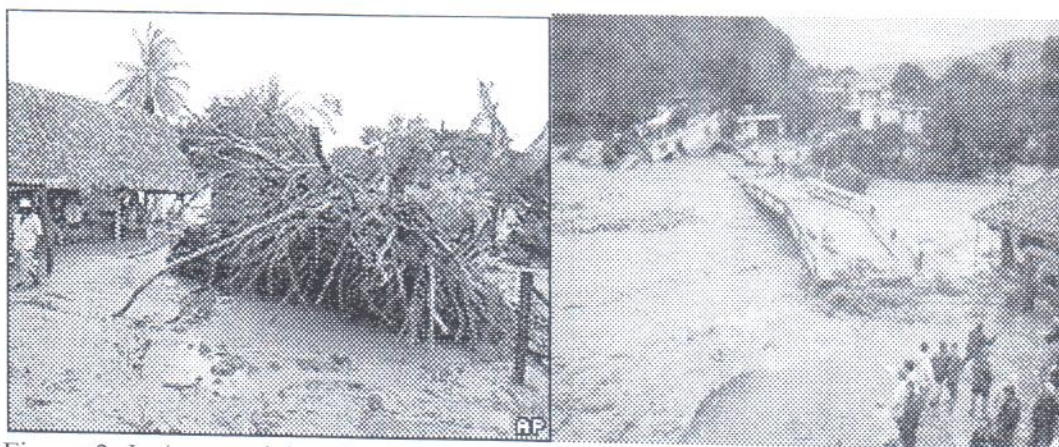


Figura 2. Imágenes del poder devastador del huracán “Stan” en Chiapas.

² Las fotografías que hacen referencia a los desastres provocados por el huracán “Stan” fueron obtenidas de:

http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/latin_america

<http://www.prensalibre.com/pl/especiales/ME/calamidad/galeria.html>

Las líneas de energía eléctrica fueron derribadas por causa del arrastre de grandes cantidades de materiales sólidos, los cuales arrasaron con todo a su paso.(Fig. 3).



Figura 3. Carretera bloqueada y línea de transmisión eléctrica dañada en el Estado de Chiapas.

Las vías de comunicación fueron de las infraestructuras que más daños sufrieron debido a los grandes volúmenes de agua que a su paso arrasaron con todo (Fig. 4).



Figura 4. Puente en Chiapas dañado por deslave de las fuertes corrientes de agua

Calles y vehículos sepultados por grandes cantidades de lodo, causa del arrastre de sedimentos de las partes altas de la zona, motivo de la deforestación y avance de la frontera agrícola, que deja al desnudo la superficie de la tierra (Fig. 5)



Figura 5. Calles y vehículos sepultados por grandes cantidades de lodo.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), estimó que el huracán “Stan” dañó alrededor de 34,500 has de bosque y agricultura en la sierra de Chiapas, las cuales serán restauradas, por lo que plantea un plan emergente para la recuperación de suelos de las zonas dañadas, el Cuadro 2 muestra las cifras de los daños causados por Stan (El Universal, 2005).

Cuadro 2. Cifras oficiales de los daños causados por “Stan” en México:

1,954,000 personas afectadas	2,956 comunidades afectadas
1,233 refugios temporales	12 declaradas en estado de emergencia
15 pérdidas humanas	54 ríos desbordados
14 personas desaparecidas	12,000 líneas telefónicas dañadas
173,000 viviendas afectadas	251 escuelas dañadas
2,254 viviendas como pérdida total, Tapachula, Chiapas.	121 puentes vehiculares y peatonales dañados
444 municipios en estado de emergencia	364 caminos afectados

Fuente: El Universal y Síntesis, octubre 7 y octubre 9 de 2005.

El gobierno mexicano gastó alrededor de unos 321 millones de dólares que fueron destinados a las entidades federativas que sufrieron daños por el huracán “Stan”, pero si a esta cifra le sumamos la ayuda de 100 mil dólares en víveres que ofreció E.U., también cerca de 600 toneladas (víveres) por parte del pueblo mexicano, y otras instancias internacionales, la cantidad de dinero es considerable (News Yahoo, 2005).

En el mes de octubre se presentó un nuevo meteoro “Wilma³” el cual se originó en el centro del Mar Caribe el día 15 del mismo mes desplazándose hacia el Estado de Quintana Roo tocando tierra el día 21 y terminando su paso por suelo mexicano el día 23 de octubre registrando intensidades de lluvia de 1,082 mm en 12 horas en la estación de Isla Mujeres, Q. R., de las 19 hr a las 07 hr, 1,576 mm en Isla Mujeres, Q. R., en 24 hr de las 07 hr del día 21 a las 07 hr del día 22, provocando inundaciones en Cancún, Cozumel, Playa del Carmen y Yucatán (Fig. 6), (CNA, 2005).



Figura 6. Inundaciones causadas por el huracán “Wilma” en Cancún, Q. Roo.

El Paso del huracán “Wilma” causó daños en hoteles, restaurantes, caminos, carreteras, viviendas y playas (Fig. 7), dejando alrededor de 1 millón de damnificados en aquellas zonas del caribe mexicano, según un comunicado que emitió el Presidente de la República (La Prensa, 2005).

³ Las fotografías que hacen referencia a los desastres provocados por el huracán “Wilma” fueron obtenidas de: <http://www.elmundo.es/albumes/2005/10/19/wilma/>



Figura 7. Centros comerciales, viviendas, hoteles y restaurantes dañados.

Numerosas señales de tránsito y anuncios espectaculares derribados en las principales avenidas de la ciudad de Cancún por los fuertes vientos producidos por “Wilma” (Fig. 8).

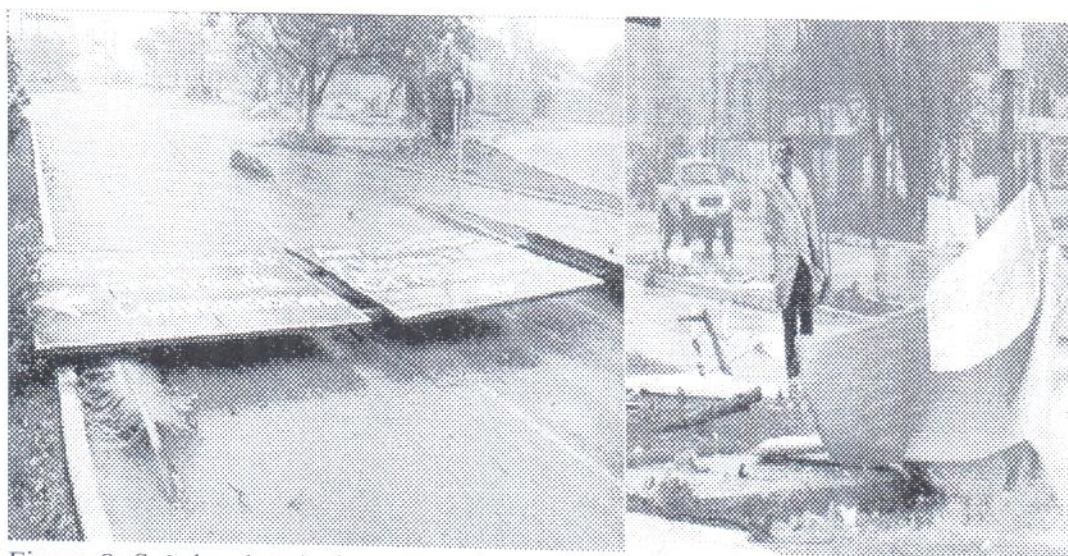


Figura 8. Señales de tránsito y anuncios espectaculares derribados por los vientos.

Las líneas de transmisión eléctrica, fueron derribadas producto de los intensos vientos del huracán “Wilma”, originando cuantiosas pérdidas monetarias.



Figura 9. Líneas de transmisión eléctrica dañadas por el huracán.

La Secretaría de Turismo evaluó que con el paso del huracán Wilma se dejará de percibir alrededor de 1600 millones de dólares derivados del turismo extranjero, arrojando pérdidas entre 12 a 15 millones de dólares diarios en éste centro turístico, en el que no hubo ni un tramo de carretera, avenida, área de playa y manglar que no fuera arrasado por el devastador poder del huracán (Milenio, 2005).

Pero por si eso hubiera sido poco, el Secretario de Medioambiente y Recursos Naturales declaró que 11 de las 19 Áreas Naturales Protegidas fueron afectadas por el paso de Wilma en las que destacan Yum Balám, Banco Chinchorro, Río Lagartos, Arrecifes de Cozumel, Arrecifes de Puerto Morelos e Isla Convoy, Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, todas en Quintana Roo y Yucatán; bastando sólo alrededor de 70 horas para causar dicha catástrofe (La Prensa, 2005)

De acuerdo al resumen presentado por el sector de infraestructura y Comunicaciones del Estado de Quintana Roo el 22 de Noviembre de 2005, los daños ascienden a 451 millones 604 mil pesos, de los cuales corresponde aportar en partes iguales al Gobierno Federal y Estatal, es decir 225.8 millones a cada uno; en el sector Educativo los daños se cuantificaron en 9 millones 433 mil pesos, que también aportarán en partes iguales los Gobierno Federal y Estatal.

Mientras que en infraestructura de Salud los daños se estimaron en 33 millones 932 mil pesos, de los cuales el FONDEN aportará 26 millones 686 mil pesos y el estado 7 millones 246 mil pesos. En infraestructura Hidráulica se cotizaron las pérdidas por 15 millones 945 mil pesos, en donde el FONDEN aportará 6 millones 378 mil pesos y el gobierno del estado 9 millones 567 mil pesos.

En infraestructura Urbana los daños ascienden a 436 millones 944 mil pesos, de estos el Gobierno Federal aportaría 298 millones 548 mil pesos y el Gobierno del Estado 138 millones 396 mil pesos. En el sector Vivienda se presentaron pérdidas por 95 millones 202 mil pesos, de éstos el Gobierno Federal aportará 66 millones 641 mil pesos y el estado 28 millones 561 mil pesos.

Mientras que en el área Forestal los daños suman 134 millones de pesos, recursos que serán aportados por el Gobierno Federal en su totalidad; mientras que en Zonas Costeras los daños suman los 38 millones 196 mil pesos, con aportación de 26 millones 856 mil pesos por parte Federal y 11 millones 340 mil pesos por el Estatal.

El último sector incluido fueron las áreas naturales protegidas, rubro en el cual los daños se estimaron en 48 millones 146 mil pesos, de los cuales 41 millones 591 mil pesos los pone el Gobierno Federal y el resto el Gobierno Estatal. Todo lo anterior, pone de relieve la trascendencia económica del cambio climático global que los científicos anticiparon y que ahora la sociedad está comprometida a mitigar esencialmente a través del mantenimiento y recuperación de la cobertura vegetal que amortigua las fuertes precipitaciones, secuestra carbono y nos provee de otros beneficios ambientales.

5.2. Problemática del agua a escala local y global

La disponibilidad de agua para cualquier lugar, en un gran porcentaje está en función del manejo de la cobertura vegetal, la cual ayuda a regular cada uno de los componentes del balance hídrico, minimizando las pérdidas por intercepción y escurrimiento superficial, y favoreciendo la recarga subterránea e infiltración.

México es un país que dispone de invaluable recursos naturales, obteniendo el agua que consume de algunos de ellos tales como ríos, arroyos, lagos y acuíferos del subsuelo, éstos últimos se recargan de forma natural en épocas de lluvias de manera muy lenta.

Aunque este recurso está disponible, no indica que sea inagotable, pues es un insumo prioritario en casi todas las actividades de producción como es la agricultura y ganadería (76%), la industria y generación de energía hidroeléctrica (10%), uso público y consumo doméstico (14%); por ello no debemos minimizar su existencia (CNA, 2005).

La agricultura y ganadería es el sector que más agua demanda, lo cual representa pérdidas y poca eficiencia considerables debido a la mala planeación de sistemas de riego y de la deficiente infraestructura hidráulica.

En las pequeñas poblaciones y ciudades, un problema frecuente es el mal estado del sistema de abastecimiento de agua potable, lo que se refleja en fugas por tuberías viejas, mala planeación de la infraestructura, y poco interés de las autoridades en el mantenimiento de la misma, así como en la ineficiente planeación de políticas públicas para hacer un uso más eficiente del vital líquido. Pero no sólo lo anterior indica la problemática del agua, pues en el país a la fecha existe gente que no cuenta con éste recurso a la mano, sino que tienen que acarrearla de algunos kilómetros de distancia.

A nivel mundial, la continua escasez del agua es un asunto de seria preocupación, un problema que se presenta y que en la actualidad es un tema que ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de muchos de los habitantes del planeta. Lo cual ha llevado a realizar un evento internacional de relevante importancia sobre el tema del recurso hídrico, un “Foro Mundial del Agua”⁴, un espacio abierto a cualquier individuo u organización interesado en contribuir para lograr un mejor manejo del agua. A la fecha se han realizado cuatro Foros: Marrakech, Marruecos (1997), La Haya, Holanda (2000), ciudades de Kioto, Shiga y Osaka, Japón (2003), y México (2006).

⁴ Información obtenida de la página web del “IV Foro Mundial del Agua” en: (<http://www.worldwaterforum4.org.mx/home/home.asp?lan=spa>)

México, en marzo del presente año (2006), fue sede del “IV Foro Mundial del Agua” organizado por el Consejo Mundial del Agua, el cual es una red de Gobiernos y organizaciones interesadas en mejorar el manejo de los recursos hídricos, y el Gobierno Federal Mexicano a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Bajo el lema “Acciones Locales para un Reto Global” el evento buscó dar un espacio para la participación de los actores locales donde aporten sus experiencias y conocimientos, donde hay una clara necesidad de facilitar y fortalecer los esfuerzos locales para enfrentar los grandes retos globales del agua en el nuevo milenio.

En el “IV Foro Mundial del Agua” se definieron cinco temas o Ejes Temáticos que reflejan los principales retos en la agenda internacional del agua, siendo los siguientes.

- ✓ Agua para el crecimiento y desarrollo.
- ✓ Instrumentación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH).
- ✓ Agua y saneamiento para todos.
- ✓ Agua para la alimentación y el medio ambiente.
- ✓ Manejo de Riesgos.

Estos temas fueron analizados desde cinco Perspectivas Transversales, las cuales representan los principales factores que suelen incidir en la puesta en marcha de las acciones locales:

- ✓ Nuevos modelos para financiar iniciativas locales.
- ✓ Desarrollo institucional y procesos políticos.
- ✓ Desarrollo de capacidades y aprendizaje social.
- ✓ Aplicación de la ciencia, la tecnología y el conocimiento.
- ✓ Establecimiento de metas, monitores y evaluación de la instrumentación.

Todo lo anterior fue parte de lo abordado en el Foro, concluyendo que el acceso al agua en cantidad y calidad, es un derecho humano y que nadie debe estar excluido de gozar del vital líquido, pretendiendo alcanzar nuevas iniciativas, técnicas de desarrollo y uso

eficiente del agua, a través de nuevas acciones que mitiguen los impactos negativos sobre las fuentes abastecedoras de agua (lagos, ríos, manantiales, acuíferos, etc.).

Actualmente los ríos, lagos, manantiales y cuencas, están en acelerada vía de extinción, hay cambios a nivel microclimático y de suelo, inundaciones, sequías y desertificación. Pero las actividades humanas son las más drásticas, ejerciendo una deforestación alarmante a pesar de los programas oficiales de la CONAFOR como el PROCOREF (Programa de Conservación y Reforestación), dando paso al cambio de uso del suelo, con el avance de la frontera agrícola, el crecimiento inminente de la mancha urbana compactando los suelos, mermando de esta manera la recarga de los mantos freáticos.

Ante una situación de escasez del agua, la amenaza se cierne sobre tres aspectos fundamentales del bienestar humano: la producción de alimentos, la salud, la estabilidad política y social, por los enfrentamientos que se prevén por la posesión de este recurso.

Por tanto, el manejo juicioso de este recurso es central para la estrategia de desarrollo sustentable, entendiendo éste como una gestión integral que busque el equilibrio entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental a través de un mecanismo regulador que es la participación social efectiva (Ramírez, 2005).

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua a escala global con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse, sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provoca pérdidas monumentales, le siguen el sector industrial que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que requieren el 10%. Para el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34% a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego y al 8% los destinados para otros usos (PNUMA, 2000).

Ante estas circunstancias muchas regiones del mundo han alcanzado el límite de aprovechamiento del agua, los que como en México, los ha llevado a sobre explotar los

recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, creando un fuerte impacto en el ambiente.

5.2.1. Sobre población mundial y escasez de agua

A nivel mundial las zonas más afectadas por la escasez del agua son las regiones áridas pues la disponibilidad de ésta, tanto superficial como subterránea es casi nula, lo que obliga a los gobiernos de éstas regiones a desarrollar métodos costosos como desalinizar el agua de mar y la reintegración de aguas residuales para poder ser consumibles por la población, lo que conlleva a planear un uso eficiente del agua para que el horizonte antes mencionado sea muy lejano (Heinke y Glynn, 1996).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en 1990, 20 países sufrían escasez de agua, en 1996, sumaban 26, representando 230 millones de personas. El número de países con problemas de agua puede elevarse a 41 en el año 2020 (Tierramérica, 2005).

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estima que al año 2027, aproximadamente un tercio de los habitantes del mundo sufrirá escasez de agua muy seriamente.

Las razones para ello son evidentes: la mayor demanda sobre los recursos de agua dulce provocada por las crecientes poblaciones humanas; el empeoramiento de la calidad de los recursos acuíferos existentes debido a la contaminación y las necesidades creadas por la dinámica expansión industrial y agrícola (Tierramérica, 2005)

Con el crecimiento de la población del mundo y el aumento del uso de agua por persona, la demanda de agua dulce se está elevando enormemente. Pero los suministros de agua dulce son limitados y se cierne sobre ellos la amenaza de la contaminación. Para evitar una crisis, muchos países deben conservar agua, reducir la contaminación, regular el suministro y la demanda y contener el crecimiento de la población (Infoforhealth, 2005).

Hoy día, 31 países, habitados por menos del 8% de la población mundial, se ven frente a déficit crónicos de agua dulce. Pero para el año 2025 se prevé que 48 países enfrentarán

este déficit, que afectará a más de 2.8 millones de habitantes, lo que representa el 35% de la población mundial. Entre los principales países que se verán afectados por la escasez de agua en los próximos 25 años están Etiopía, India, Kenya, Nigeria y Perú. Partes de otros países grandes, como China, ya encaran problemas hidricos crónicos (Infoforhealth, 2005).

5.2.2. Crecimiento de la población en México y la demanda de agua

Para octubre del 2005 México tenía una población de 103.1 millones de habitantes, creciendo a una tasa del 1.7% según el II Censo de Población y Vivienda del mismo año, realizado por el INEGI, de los cuales casi 20 millones se concentran en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2006).

El país recibe una lámina promedio de 772 milímetros de lluvia por año; de éstos el 73% se evapora y el resto escurre por ríos, arroyos o recarga de acuíferos. La disponibilidad *per capita* promedio de agua es de unos 5,000 m³/año, cifra que supera por mucho la norma internacional de la OMS de escasez de 1,000 m³, lo cual no ubica a México entre los países de acceso abundante, pero tampoco entre los menos favorecidos (Cantú y Garduño, 2003; Albertani, 2004).

Sin embargo, los grandes demandantes del agua se encuentran ubicados en el norte y centro del país, donde el recurso es escaso, pero se concentra el 77% de la población y se genera el 84% del Producto Interno Bruto (PIB). En estas regiones se desarrollan importantes actividades económicas como la industria, el comercio y la exportación de bienes y servicios. Por su parte, en el sureste en donde existe agua en abundancia, vive sólo el 23 por ciento de la población nacional y se genera apenas el 16 por ciento del PIB. A la variabilidad espacial de la disponibilidad se suma la temporal ya que, el 67 por ciento de la precipitación ocurre durante los meses de junio a septiembre (Cantú y Garduño, 2003).

El problema principal tiene que ver con la irregularidad del régimen de lluvias por un lado, y con acceso al agua y su calidad por el otro, ya que las lluvias se concentran en tan sólo cuatro meses del año y su distribución territorial es extremadamente dispareja,

pues más de dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas, principalmente en el norte y el centro, donde sólo ocurre el 28 por ciento del escurrimiento, mientras que el 72 por ciento restante se origina en el sureste del país (Cantú y Garduño, 2003).

La Comisión Nacional del Agua (2005), menciona que en 1970 la disponibilidad de agua por habitante era de 9,815 m³/habitante/año, el cual se redujo en el 2000 a 4,706 m³/habitante/año (Cuadro 3), por el crecimiento de la población y todos los factores que afectan el régimen de lluvias, pronosticando una reducción marcada para los años venideros.

Cuadro 3. Decremento de disponibilidad del recurso hídrico en México y su relación con el crecimiento de la población (proyección al 2025).

Año	Población Total (millones de Habitantes)	Recurso Hidráulico (m ³ /habitante/año)	Recurso Hídrico Requerido (m ³ /año)
1990	81, 249, 645	5,194	4.76447918 X 10 ¹¹
2000	97, 483, 412	4,706	4.58951903 X 10 ¹¹
2010*	107, 548, 983	4,250	4.57083170 X 10 ¹¹
2020*	118, 654, 401	3,936	4.67023724 X 10 ¹¹
2025*	124, 653, 000	3,822	4.76423760 X 10 ¹¹

* Estimados por el autor con la fórmula del interés compuesto

Fuentes: INEGI (2000) y CNA (2005).

5.3. El manejo del bosque y su influencia en la captación de agua

El bosque es un actor principal en la captación de agua y reduce la erosión del suelo, ya que actúa como un regulador al interceptarla, evitando que toda el agua que precipita se convierta en escurrimiento superficial y limita el impacto de las gotas al hacer contacto con el suelo, y ayuda al proceso de infiltración. Todo lo anterior depende íntimamente de las prácticas y métodos silvícolas que se aplican al intervenir la densidad del bosque con fines maderables.

Varias son las técnicas o métodos de manejo del bosque, los cuales hasta la actualidad se han aplicado con un enfoque meramente maderero, tratando que la regeneración del bosque sea la más óptima para el siguiente aprovechamiento, sin criterios hidrológicos concretos.

La mala aplicación de las técnicas o métodos de aprovechamiento como: los tratamientos silvícolas a matarrasa, la apertura de caminos y brechas de saca originan problemas ecológicos y ambientales, pues al aplicar intensidades de corta intensivas en las áreas boscosas quedan desprovistas de vegetación, causando erosión del suelo, pérdida de especies de flora y fauna, extinción de ríos, y disminuye de forma significativa la recarga de mantos acuíferos y aumenta las pérdidas de agua por escurrimiento superficial.

A continuación se hace una breve descripción de los tratamientos silvícolas que se han aplicado para los bosques de México, así como sus impactos en el ciclo hidrológico:

5.3.1. Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM)

El MMOM surge en 1944 como respuesta a las políticas de la Secretaría de Agricultura, que sugerían la utilización del método del interés compuesto para representar el crecimiento de las masas forestales. Asimismo, introducía la recuperación de existencias al cabo de un ciclo de corta determinado (Semarnap, 1998).

La silvicultura asociada a éste método se definió como una etapa temporal de conversión durante la cual se llevara a las masas arboladas hacia estructuras de alta productividad mediante la remoción del arbolado *senil*, *decrépito*, *dañado* o *mal conformado*, la *homogeneización* de la densidad residual y el cuidado de la regeneración, utilizando un tratamiento silvícola con **Cortas de Selección** (Semarnap, 1998).

El método fue modificado en 1984 llamándole Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), siendo el principal cambio el considerar al rodal la unidad básica de la ordenación y cultivo del bosque.

En el MMOBI, es común la utilización del método de *regulación por volumen*, el cual tiene la desventaja de ocasionar, en cierta medida, que el bosque esté administrado en base a la cantidad de productos que se extraen de él; mientras que los métodos de regulación por área, enfatizan las consideraciones sobre la masa que queda en pie y que

representa los productos que se han de extraer en el futuro. Por ello resulta conveniente, al menos durante el proceso de regulación del bosque, incorporar el área como principal elemento regulador (Semarnap, 1998).

La selección del arbolado a extraer se hace en toda la estructura vertical del bosque, cortando árboles de distintas edades y alturas, ya que en teoría el MMOBI conduce al desarrollo de una masa completa que contiene árboles de todas las clases de edad, desde brinzales hasta aquellos más viejos que tienen la edad de un turno o el diámetro mínimo de corta establecido (Semarnap, 1998).

En las cortas se da prioridad (teóricamente), a los árboles viejos, deformes, plagados o con cualquier otra característica no deseable; esto con el fin de ir dejando el arbolado de mejores condiciones que permita aumentar la calidad del bosque.

Este método de manejo puede considerarse de baja intensidad, ya que sólo regula la masa boscosa a través de la selección de individuos, produce un bajo impacto si se siguen estrictamente sus principios, puede aplicarse casi en cualquier condición del terreno, no importa la exposición, pendiente, tipo de suelo ó estrato boscoso.

5.3.2. Método de Desarrollo Silvícola (MDS)

El MDS está enmarcado dentro de ciertos principios técnicos, pero su determinación es flexible y los sistemas silvícolas pueden cambiarse si así se cree conveniente, siempre que no se pierda la idea de la planificación del aprovechamiento a corto, mediano y largo plazo tratando de captar al máximo el potencial productivo del recurso maderable (Álvarez, 1982).

Las metas del concepto que prevé el MDS, es buscar la ordenación del bosque a través del concepto de Bosque Normal⁵; y aplicar los tratamientos silvícolas fijados por el

⁵ Bosque que ha mantenido y alcanzado una estructura que satisface con los objetivos de manejo. Este es el concepto clásico actual contrario a un bosque que puede ser comparado, particularmente contemplando el volumen de crecimiento, en edades o distribución de tamaño de clases de diámetro e incremento (Leuschner, 1990).

método de regeneración de Árboles Padres. Bajo estos principios los conceptos que juegan un papel importante para los fines de ordenación forestal son: el turno, el ciclo de corta y los tratamientos silvícolas por aplicar (Álvarez, 1982).

5.3.2.1. Tratamientos Silvícolas

Los tratamientos silvícolas que considera el MDS, según las distintas etapas de desarrollo de cada rodal o subrodal, son:

- ✓ Corta de Regeneración (Árboles Padre).
- ✓ Corta de Liberación.
- ✓ Preaclareo.
- ✓ Aclareos.

El MDS presenta dos tratamientos intensivos como es la corta de regeneración (árboles padre) y corta de liberación, donde el segundo tratamiento es continuación del primero. Al aplicar la corta de regeneración, se elimina el 90% de la vegetación arbórea, dejando sólo aquellos individuos de mejores características genéticas. Y la segunda se aplica cuando la regeneración está establecida, se eliminan los árboles padre con el propósito de no generar competencia con el arbolado joven. No es recomendable aplicar éste tratamiento en pendientes mayores al 15%.

Los preaclareos y aclareos son cortas menos intensivas, ya que su principal objetivo es reducir la competencia entre individuos, eliminando aquellos que quedan suprimidos o que presentan algún defecto (árboles viejos o muertos, deformación, plagas o enfermedades), para alcanzar el máximo rendimiento de la masa boscosa al momento del aprovechamiento maderero.

5.3.3. Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI)

Surge por la necesidad de un sistema de planeación de Manejo Integral Forestal en 1986 a raíz de la expedición de la Ley forestal que se publica en ese mismo año. Conceptualmente el Manejo Integral Forestal debe entenderse como “La administración de los recursos forestales tendiente a obtener el rendimiento óptimo y persistente de algunos bienes y servicios, minimizando el deterioro de estos y de sus recursos asociados” (Subsecretaría Forestal, 1989).

El SICODESI considera los tratamientos silvícolas de los dos anteriores, según las distintas etapas de desarrollo de cada rodal o subrodal, y los objetivos a alcanzar, por lo que contempla:

- ✓ Cortas de Selección
- ✓ Corta de Regeneración (Árboles Padre).
- ✓ Corta de Liberación.
- ✓ Preaclareo.
- ✓ Aclareos.

El SICODESI está constituido de dos niveles de planeación la estratégica y la operativa. La primera evalúa las interacciones entre el sector forestal, los propietarios y otras actividades económicas, tiene como objetivo la planeación de los aprovechamientos forestales a largo plazo bajo el concepto de rendimiento persistente, tomando en consideración los requerimientos del equilibrio ecológico y de las actividades económicas y sociales que existe en el predio, con el fin de obtener los mayores beneficios posibles de los bosques (Subsecretaría Forestal, 1989).

La segunda es más flexible y puede aplicarse en superficies igual o menores a las 1000 has. Pueden desarrollarse actividades a corto plazo, puede tenerse un control más eficiente de la cantidad de recursos a obtener sean maderables o no maderables; mantiene una interrelación productor-actividades forestales-ecosistema (Subsecretaría Forestal, 1989).

El sistema está diseñado para ser utilizado en bosques donde predominan las coníferas, una característica importante del sistema es que se establecen las bases para que los planes vayan mejorando cuando se repita el proceso de planeación.

5.4. Efectos del manejo del bosque en el ciclo hidrológico

Actualmente bajo el concepto de hidrología forestal, existe una diversa línea de investigaciones relacionadas con la influencia de la vegetación en el ciclo hidrológico y específicamente sobre el proceso del balance hídrico.

La presencia de vegetación incide directamente en cada uno de los componentes del balance hídrico (precipitación, intercepción, evaporación, transpiración, escurrimiento superficial, recarga e infiltración subterránea), generando efectos positivos y manteniendo un equilibrio en el ecosistema.

El manejo del bosque ó manejo forestal, debe considerar técnicas que minimicen los impactos a los componentes del ecosistema y en particular al ciclo hidrológico.

El Método Mexicano de Ordenación de Montes maneja cortas de selección las cuales van dirigidas a eliminar aquellos individuos que presentan características no deseables y manteniendo el bosque con una buena densidad de arbolado, generando pocos claros en el dosel y provocando efectos positivos cuando precipita el agua de lluvia, ya que una buena cantidad de ésta queda retenida en las hojas, ramas y tronco (fuste) de los árboles, minimizando el efecto erosivo de las gotas de lluvia y arrastre de sedimentos.

Cuando el estrato vegetal funciona como amortiguador existen menos pérdidas por escurrimiento superficial, pues el agua retenida en el dosel suele llegar al suelo forestal a través del goteo y flujo por el fuste de forma paulatina, evitando saturar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y permitiendo así la infiltración para recarga subterránea. Otro factor importante es la reducción de la evaporación pues la vegetación actúa como un regulador del microclima, con menos luminosidad, lo cual reduce el calor, con velocidad del viento baja y mayor humedad.

Caso contrario a lo anterior se presenta en el Método de Desarrollo Silvícola, el cual presenta dos tratamientos silvícolas: corta de regeneración y corta de liberación, que alteran las masas boscosas. Aquí se elimina el 90% del estrato vegetal, esperando su regeneración a un lapso de 5 o 7 años para su nuevo establecimiento; la precipitación en el efecto de intercepción es nulo por la ausencia de estrato vegetal, el área intervenida queda expuesta al impacto erosivo de las gotas de lluvia, por lo que en una tormenta intensa y de corta duración la mayoría del agua precipitada se convierte en escurrimiento superficial, generando la eliminación de la materia orgánica y un notable aumento en el

arrastre de sedimento provocando la erosión del suelo y en ocasiones problemas de inundaciones. Cuando la mayoría del agua se pierde por escurrimiento superficial, la recarga subterránea es mínima o nula, alterando las fuentes abastecedoras del vital líquido.

La eliminación de la vegetación da como resultado que los rayos solares incidan directamente en el suelo provocando la rápida descomposición de la materia orgánica y aumentando la temperatura del lugar, generando altas pérdidas por evaporación.

El Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola presenta características similares al MDS aunque también contempla las cortas de selección que aplica MMOM (Cuadro 4), por lo que las causas y efectos que provoca son similares al de los métodos ya expuestos.

Dentro de las medidas de mitigación de impactos que contemplan los métodos de tratamientos silvícolas, podemos señalar que están dirigidas con un enfoque ecológico (flora, fauna, suelo y agua), de ahí el concepto de restricciones ecológicas que aplican los programas de manejo. Actualmente debemos implementar medidas de mitigación que vayan dirigidas al componente ecológico de mayor jerarquía como es el caso del agua, al cual están íntimamente relacionados los otros componentes ecológicos (flora, fauna y suelo), a través de restricciones *ecohidrológicas*, como respetar franjas de protección cerca de cualquier cuerpo de agua (ríos, manantiales, lagos, etc.), pues protegiendo al primero los demás se ven beneficiados de manera directa o indirecta. Esto es, si mantenemos la vegetación regulamos el balance hídrico, menor impacto de biodiversidad, protección de suelos contra la erosión, aumento en la recarga subterránea, regulación del microclima, reducir el problema de inundaciones, etc.

Cuadro 4. Métodos de manejo forestal y su influencia en el Balance Hídrico

Método	Tratamientos Silvícola	Restricciones	Impactos	Incidencia en el Balance hídrico
MMOM	Cortas de Selección	-Remoción de arbolado decrépito, dañado, plagado o mal conformado	-Reducción de cobertura. -Compactación del suelo. al momento de la corta. -Apertura de nuevos caminos para la extracción de madera.	-Reducción en la intercepción. -Incrementa escurrimiento superficial. -Regula infiltración. -Reducción de evapotranspiración
MDS	-Corta Regeneración -Corta de liberación	-Sólo Bosques sobrenaduros -Pendiente no mayor al 15%.	-Eliminación de la cobertura vegetal en un 90%. -Suelo descubierto y expuesto a incidencia solar e impacto de las gotas de lluvia. -Compactación del suelo al momento de la corta. -Apertura de nuevos caminos para la extracción de madera.	-Intercepción limitada de la precipitación -Si la textura del suelo es fina la mayor parte de la precipitación se vuelve escurrimiento superficial. -Infiltración importante al principio de la corta y limitada posteriormente -Mayor evaporación y reducción considerable en la evapotranspiración
	-Preaclareo -Aclareos	-Sólo Bosques sobrepoblados (competencia) -Pendiente moderada	-Reducción de cobertura. -Apertura de pequeños claros en el dosel. -Compactación del suelo al momento de la corta. -Apertura de nuevos caminos para extraer la madera.	-Reducción en la intercepción -Aumento en escurrimiento superficial -Regula infiltración -Menor evaporación y mayor evapotranspiración porque se mantiene la masa residual
SICODESI	Contempla todos los anteriores	-Se aplica desde superficies pequeñas hasta aquellas de más de 2000 has. -Todas las anteriores dependiendo del tratamiento silvícola aplicado.	Todos los mencionados anteriormente, dependiendo del tipo de tratamiento silvícola usado.	Todos los anteriores dependiendo del tipo de tratamiento silvícola que se aplique.

Fuente: Elaboración Propia

5.4.1. Los Bosques; productores de agua

Diversas son las opiniones de los especialistas en el tema, ya que algunos atribuyen que la existencia de la vegetación induce la precipitación, mientras que otros lo relacionan a cuestiones meteorológicas y orográficas, tales como: la relación entre corrientes de aire, estado atmosférico y barreras montañosas.

Chang (2003), describe este cuestionamiento sobre si los bosques incrementan o inducen la precipitación a través de la experiencia y estudios de varios autores de los cuales hace una recopilación.

La relación de los ^Sbosques con la precipitación puede ser explicada por algunas razones meteorológicas: el aire caliente pasando sobre un bosque baja su temperatura por debajo del punto de rocío por enfriamiento y la humedad se condensa generando la precipitación (Brown, 1877, citado por Chang, 2003). La efectividad de la altura de las montañas, especialmente cuando en las partes más altas de las colinas se genera el fenómeno de Barlovento, resulta un incremento de precipitación orográfica del 3% (Kittredge, 1948, citado por Chang, 2003). La aspereza del dosel del bosque puede suavizar el movimiento de las masas de aire iniciando una turbulencia vertical lo que causa una condensación adiabática por enfriamiento (Rankhmanov, 1963, citado por Chang, 2003). La ocurrencia de precipitación requiere vapor de agua en la atmósfera, los bosques transpiran una alta cantidad de agua, además de aquella que se agrega por otras superficies lo que provocará la condensación y precipitación en las áreas boscosas.

La idea de plantar árboles que modificaran la humedad del ambiente local debido a una intensa sequía, dio lugar a que más de 200,000 árboles y arbustos se plantarían a lo largo de 29,800 km abarcando del norte de Dakota al norte de Texas entre 1935 y 1942, en donde los bosques incrementaron la abundancia y frecuencia local de la precipitación en más del 25% en algunos casos (Zon, 1927, citado por Chang, 2003).

En la cuenca Copper al Este de Tennessee, un estudio de 4 años mostró que la lluvia en el bosque (1,459 mm/año) fue 19% más que en un área descubierta y 9% más que en un

área de pastizal (Hursh, 1948, citado por Chang, 2003). Sin embargo, el promedio de la velocidad del viento durante los cuatro años fue de 33 cm/seg, 167 cm/seg y 226 cm/seg para el bosque, pastizales y áreas desnudas respectivamente.

En caso contrario a la idea de que los bosques incrementan la precipitación, tenemos a quienes argumentan que se debe principalmente a la circulación general de la atmósfera y características topográficas que afectan la distribución de la precipitación en la tierra. En las regiones ecuatoriales, el calentamiento solar excesivo sobre los océanos provoca que el aire se vuelva inestable y rápidamente se eleve.

El calentamiento y humedad del aire se expanden reduciendo la presión atmosférica, y la expansión causa el enfriamiento, provocando la condensación. Por consiguiente, estas regiones son caracterizadas por bajas presiones, actividad local de frecuentes tormentas y las lluvias más abundantes sobre la tierra. Caso contrario con las regiones polares que son diferenciadas por alta presión, el aire es seco, frío, pesado y estable. Aquí las precipitaciones son mínimas y las tierras son estériles (Chang, 2003).

La atmósfera esta en constante movimiento, la fuente de humedad contribuye a la precipitación que viene de los océanos a cientos y miles de kilómetros de distancia. En la cuenca del río Mississippi, solo alrededor del 10% de la precipitación se origina de la vaporización de la cuenca; el resto proviene de los océanos (Chang, 2003).

Una revisión de 94 cuencas experimentales alrededor del mundo demostraron que una reducción del 10% de la cobertura en coníferas y eucalipto, ^S bosques de latifoliadas y arbustos, reduce significativamente el escurrimiento superficial, arrastre de sedimentos, y la presencia de avenidas, mientras que por otro lado regula la captación de agua (Bosch y Hewlett, 1982, citados por Chang, 2003).

Indiscutiblemente, la interrogante de si los bosques producen agua es muy amplia, ya que estrictamente no se puede restringir sólo a la vegetación, sino que se debe tomar en cuenta todos los factores que contribuyen a que ocurra el fenómeno de la precipitación,

tales como: meteorológicos, orográficos, ecológicos (tipo de vegetación, incendios, etc.) y antropogénicos como la presión social, aplicación de tratamientos silvícolas, etc.

5.5. Balance Hidrico

El balance hídrico se establece para una microcuenca y un periodo dado, por comparación entre las entradas y salidas de agua en esa microcuenca y para ese periodo. Las entradas de agua se efectúan gracias a las precipitaciones, las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término de evapotranspiración, además de la intercepción tanto del dosel como de la capa de hojarasca del suelo que devuelven agua a la atmósfera en forma de vapor.

Pero no podemos estar hablando propiamente de un balance de aguas si sólo lo limitamos a un cálculo de precipitación menos la evapotranspiración e intercepción, ya que el concepto balance hídrico es mucho más amplio, pues al momento de la precipitación existen otros factores que intervienen en la retención del agua, tal es el caso de la cubierta vegetal (dosel) donde cierta cantidad de agua precipitada queda retenida en la copa de los árboles, hojas, ramas y tallo (fuste) de éstos, en arbustos y pastos; otro porcentaje que atraviesa el dosel vegetal queda retenido en la capa de hojarasca que se forma en los suelos forestales; también debemos incluir aquella que se vuelve escurrimiento superficial debido a que el suelo alcanza su punto de saturación y no permite que el agua se infiltre.

5.6. Procesos que intervienen en el Balance Hidrico

Las zonas cubiertas de vegetación funcionan como reguladores de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, y más específicamente del balance hídrico. A continuación se presenta cada uno de ellos y de que manera intervienen.

5.6.1. Precipitación

La precipitación en forma de lluvia o nieve, es la mayor entrada de agua a un sistema hidrológico de una Cuenca. Su ocurrencia, distribución, cantidad, intensidad y duración

afectan el escurrimiento superficial, humedad del suelo, pérdida de nutrientes y distribución de especies. La precipitación en la forma de aguanieve, escarcha, rocío y granizo, debido a su baja ocurrencia y poca cantidad, es menos importante en la hidrología (Chang, 2003).

5.6.1.1. Tipos de Precipitación

Según la intensidad, duración, frecuencia de la lluvia, etc., se tendrá mayor o menor intercepción de la precipitación por el dosel vegetal. Chang (2003) menciona que la precipitación es categorizada en tres tipos, de acuerdo con mecanismos de enfriamiento conforme asciende en la atmósfera y dando paso a la formación de la precipitación.

Precipitación orográfica. Cuando una masa de aire se levanta mecánicamente por las barreras montañosas, la presión atmosférica se reduce conforme se eleva, causando enfriamiento y condensación por expansión. Esto causa un aumento en la precipitación. Así, la precipitación aumenta a mayores elevaciones en el lado de barlovento de las áreas montañosas. El gradiente de precipitación aumenta, en rangos de 12 a 165 mm/100m en el rango costero de Washington de 5 mm/100m en el Oeste de Colorado.

Este tipo de precipitación por sus características tiene mayor presencia en las zonas de barlovento, pues generalmente provienen de los océanos y al chocar con los macizos montañosos e ir ascendiendo provoca lluvias intensas, pero de corta duración; éste tipo de lluvias suelen saturar en un corto tiempo el dosel vegetal, generando el goteo hacia el suelo, donde un porcentaje queda retenido en la capa de hojarasca e inclusive permitiendo la infiltración y otro porcentaje se vuelve escurrimiento superficial.

Precipitación convectiva. El calentamiento desigual entre diferentes superficies, tales como un campo arado contra un bosque ó la tierra contra el agua, ó el aumento en el contenido de vapor de agua en el aire debido a la evapotranspiración en las tardes calientes del verano, puede hacer al aire inestable. El aire calentado sobre la superficie se expande, es más ligero, e inicia el ascenso hacia la atmósfera. Esto causa movimientos verticales ascendentes, enfriamiento, condensación y precipitación. Las tormentas convectivas son intensas yendo de ligeras a aguaceros (100 mm/hr ó más).

Un buen ejemplo del calentamiento desigual de superficies es la precipitación en áreas de grandes lagos. La cantidad de precipitación y frecuencia de tormenta eléctrica y la actividad de granizadas sobre los grandes lagos y sus áreas de vientos bajos tienden a disminuir en el verano y aumentan en el invierno.

Produce lluvias que regularmente tienden a ser intensas, acompañadas de fuertes vientos y tempestades eléctricas, pero de corta duración. En las zonas boscosas suelen saturar rápidamente el dosel vegetal y la capacidad de almacenamiento del suelo, provocando que la mayoría del agua se vuelva escurrimiento superficial, y en ocasiones generando problemas de inundaciones. Actualmente debido a la exacerbación en las emisiones de gases de invernadero el cambio climático global a inducido más severamente precipitaciones convectivas que además de ser más frecuentes, alcanzan mayor duración e intensidad.

Precipitación ciclónica. Puede cubrir un área grande por largo tiempo. Puede ser frontal o no frontal. Los frentes son límites que separan masas de aire teniendo significativamente diferentes propiedades físicas en humedad, temperatura, presión y movimiento. Si las masas de aire caliente son empujadas hacia arriba por una masa de aire frío, este es un frente frío. Si el aire frío se retira, empujando sobre el aire caliente, esto produce un frente cálido. Cuando el límite no se mueve, el frente se vuelve estacionario. Los frentes usualmente traen “mal clima”.

Los frentes fríos usualmente se mueven más rápido, las superficies frontales son más remojadas, su movimiento ascendente es más rápido, y las tasas de precipitación son mucho mayores que la de los frentes cálidos.

Las precipitaciones ciclónicas generalmente son de baja intensidad y de prolongada duración, generando una mejor distribución de la precipitación, pues al ser de baja intensidad el dosel vegetal suele retener por más tiempo el agua, generando un goteo de forma paulatina, evitando que el suelo alcance su punto de saturación, reduciendo el escurrimiento superficial y permitiendo más la infiltración para recarga subterránea.

5.6.1.2. Intensidad de lluvia

La intensidad de lluvia es simplemente la cantidad de agua acumulada en un periodo y diferentes intervalos de tiempo, expresada en mm/hr., y que de acuerdo al tipo y densidad de vegetación presente, ésta puede ser interceptada o alcanzar el suelo y convertirse en escurrimiento superficial, minimizando la infiltración (Hewlett, 1982). La intensidad de lluvia se calcula a partir de los datos registrados en el pluviógrafo, el cual mide la altura de precipitación en un periodo de tiempo. Las partes básicas del análisis de lluvia registrada en un punto durante una tormenta son la obtención de la curva masa, el cálculo del hietograma y el de la intensidad máxima asociada a diferentes duraciones (CFE, 1981).

Curva masa. Es la representación de la altura de precipitación acumulada a través del tiempo, desde el inicio de la tormenta hasta su terminación; se obtiene directamente del registro del pluviógrafo y es utilizada en la construcción de presas y en la predicción de probables eventos de inundaciones (CFE, 1981). Cualquier tangente a la curva masa representa la intensidad de la lluvia (i) para ese instante, que se define como:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

- i : intensidad de la lluvia, en mm/h
- ΔP : incremento de lluvia en el intervalo Δt , en mm
- Δt : incremento de tiempo, en h

Para diferentes intervalos de tiempo (duración), existirá un valor de intensidad máxima que se calcula mediante el procedimiento siguiente:

1. Se selecciona una duración de interés, d_i .
2. Con los valores de la curva masa se calculan las diferencias de precipitación, ΔP_i , correspondientes a todas las parejas de puntos separados entre sí, un tiempo d_i .

3. Se selecciona la diferencia máxima, $\Delta P_{i \max}$, y se divide entre el intervalo de tiempo a fin de encontrar la intensidad máxima correspondiente a dicho intervalo.
4. Se repite el proceso para otras duraciones.

Hietograma. Es una representación mediante barras verticales de las variación de la altura de precipitación con respecto a intervalos de tiempo constante (CFE, 1981).

Utilizando la curva masa se obtiene el hietograma a través del siguiente procedimiento:

1. Se divide la curva masa en intervalos de tiempo constante, Δt .
2. Se obtiene la altura de precipitación hasta el final de cada intervalo de tiempo.
3. Se calculan diferencias de precipitación entre cada intervalo.
4. Se grafican los valores obtenidos en el punto anterior.

En ocasiones se puede también expresar el hietograma en términos de la intensidad de lluvia en lugar de su altura; para ello se divide cada uno de los valores obtenidos en el paso 4 entre el intervalo de tiempo Δt (CFE, 1981).

Intensidad máxima de lluvia. Es el valor máximo de lluvia en un periodo de tiempo que se registra por tormenta. A partir de los valores máximos de altura de precipitación se obtienen las curvas de intensidad de lluvia-duración, para tormentas intensas (CFE, 1981).

5.6.2. Intercepción del agua de lluvia por el bosque

El dosel boscoso en su parte aérea, sirve como una barrera contra la precipitación, lo que impide alcanzar la superficie de la tierra. Una parte de la precipitación es interceptada inevitablemente por el dosel, los flujos a lo largo del tallo o fuste hacia la superficie de la tierra, el goteo de hojas, ramas o aquella que atraviesa los claros del dosel alcanzando el suelo, o la cantidad de la precipitación que es interceptada por el suelo del bosque. Estos procesos causan una reducción en la cantidad de la precipitación y una redistribución de la misma hacia el suelo (Chang, 2003).

Lee (1980) describe que la cantidad de reducción (intercepción por el dosel) es determinado por la cantidad y la frecuencia de precipitación, y por la capacidad de almacenamiento del dosel y la tasa de secado; observó que varía ampliamente, no sólo entre regiones climatológicas y tipos de bosques, con densidad y edad, sino también con relativa posición de los fustes o tallos de los árboles en una particular posición. El agua que es interceptada por las coronas de los árboles es también hidrológicamente importante, pues esto causa un mojado no uniforme sobre el suelo forestal, inhibe la transpiración y reduce la presencia de humedad sobre el suelo, se evapora más rápidamente que la transpiración que puede ocurrir en el mismo microclima y se agrega significativamente a la pérdida de vaporización total.

5.6.2.1. Pérdida del agua por intercepción

La precipitación interceptada por el dosel y el suelo del bosque, determinada como intercepción por el bosque, se pierde hacia el aire por la evaporación. Esto es un término negativo en la disponibilidad hidrológica (Chang, 2003).

Para estratos de pino blanco de 10, 35 y 60 años de edad en el Oeste del Norte de Carolina, E.U., Helvey (1967) demostró que la pérdida total de la intercepción aumentó con la madurez del bosque y pudo ser estimado empíricamente para la precipitación total para una estación dada (P_t) y número de tormentas (N) en esa estación:

$$I_B = 1.27N + 0.08 P_t \text{ (para un estrato de 10 años)}$$

$$I_B = 1.27N + 0.12 P_t \text{ (para un estrato de 35 años)}$$

$$I_B = 1.52N + 0.18 P_t \text{ (para un estrato de 60 años)}$$

5.6.2.2. Componentes de la intercepción

Cuantitativamente, la intercepción total del bosque (I_B), es la suma de la intercepción del dosel (I_D) y la intercepción del suelo del bosque (I_S), tenemos:

$$I_B = I_D + I_S \quad (2)$$

La precipitación que alcanza el suelo mineral es llamada precipitación efectiva (P_E). Esta es la diferencia entre la precipitación total (P_t) (aquella que cae en los claros o alrededor del dosel) y la intercepción total del bosque:

$$P_E = P_t - I_B$$

La cantidad de precipitación que alcanza el suelo forestal o la suma de la precipitación directa (P_{TH}) y la que fluye a través de los tallos o fuste (I_f) es determinada como precipitación neta (P_N):

$$P_N = P_{TH} + I_f \quad (3)$$

En este caso la intercepción del dosel puede ser estimada por la diferencia entre la precipitación total (P_t) y la precipitación neta (P_N):

$$I_D = P_t - P_N = P_t - (P_{TH} + I_f) \quad (4)$$

La intercepción de la lluvia por los bosques es un importante evento en el ciclo hidrológico, debido a sus efectos sobre la lluvia, distribución de la humedad del suelo, acumulación de nieve y derretimiento de la misma, movimiento del viento, disipación de calor y el impacto de las gotas en la erosión de los suelos.

5.6.2.3. Intercepción del dosel

Aproximadamente del 10 al 20% de la precipitación anual se pierde por la intercepción del dosel, dependiendo del poder de evaporación del aire, características de la tormenta y la vegetación (Chang, 2003). La intercepción del dosel es frecuentemente expresada en términos empíricos de la forma:

$$I_D = a + b P_t \quad (5)$$

Donde a y b son coeficientes de regresión. Sin embargo, a puede ser considerada como almacenamiento del dosel, la cual es la cantidad de agua retenida en el dosel cuando la lluvia y la precipitación directa han cesado, y b es equivalente al promedio de la tasa de evaporación del agua interceptada durante la lluvia.

Durante el inicio de una tormenta, el almacenamiento del agua en el dosel incrementa con el tiempo y gradualmente los niveles están fuera de la máxima capacidad de almacenamiento del dosel conforme la duración de la tormenta se prolonga o aumenta la intensidad de la misma.

La capacidad de almacenamiento del dosel es la cantidad de agua que es sostenida o retenida sobre las partes aéreas del estrato forestal; esto está expresado en mm, como una medida promedio en términos equivalentes de agua líquida. La magnitud de la capacidad de almacenamiento del dosel depende de la superficie aérea de las hojas y corteza, la aspereza de tronco y ramas, orientación, arreglo y superficie mojada; la fuerza del viento y gravedad que sirve para desalojar las partículas de la precipitación (Lee, 1980).

La cantidad de hojas de varias especies y entre varios estratos de bosques, es comúnmente expresado en términos de área foliar, la proporción de área del total de la superficie de la vegetación de las áreas cubiertas se expresa en m^2 de área foliar / m^2 área cubierta de bosque.

Cantú y González (2002), realizaron un estudio para determinar la cantidad de agua interceptada en bosques de pino-encino a 50 km al suroeste de Linares, Nuevo León, México, en el campo experimental de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a una altura de 1600 msnm y precipitación media anual de 639 mm; estableciendo tres parcelas experimentales de 20m x 20m, con estrato dominante de Pino, Encino y Pino – Encino para cada una de las parcelas, con edades promedio de 80 a 100 años.

Las pérdidas por interceptación en el periodo en el que se realizó la investigación fueron de 19.2, 13.6 y 23% para pino, encino y pino-encino, respectivamente. Lo que significó valores de 187, 132 y 224 mm de precipitación interceptada de un total de 974 mm. El escurrimiento fustal no se observó en eventos menores de 4 mm en el bosque de encino, mientras que para los bosques de pino-encino y pino requirieron eventos de mínimo (umbral) 5 y 6.5 mm de precipitación, respectivamente, lo cual representó el 0.03, 0.50 y 0.60% del total de la precipitación, siendo poco significativo.

Chang (2003) reporta datos en porcentajes de área foliar descritos por varios autores, para especies de árboles, arbustos y pastos. Los rangos de área foliar de 0.5% a 4.5% para caña de azúcar en Florida (Shih, 1989), 5.3% para estratos de 10 años de edad para pino blanco (Swank y Schreuder, 1974), 10.2% para abeto Noruego en Wisconsin (Gower y Son, 1992), y de 40% a 50% para un estrato de 90% de cobertura en abeto Noruego y 10% de área foliar en abeto Douglas en el centro de las montañas Rocky (Kaufmann et. al, 1982). Una extensiva revisión de literatura americana mostró los rangos de capacidad de almacenamiento de agua retenida en el dosel de 0.3 a 6.6 mm para coníferas, 0.03 a 2.0 mm para maderas duras, 0.3 a 2.0 mm para arbustos y 1.0 a 1.5 mm para pastos (Zinke, 1967).

Rowe (1983), realizó un estudio durante 4 años para determinar la intercepción de la precipitación por un bosque de haya (*Nothofagus*) en Nelson, Nueva Zelanda. En ese periodo la precipitación directa promedio representó el 69% (1,035 mm) de un promedio total de 1,490 mm en los cuatro años. El porcentaje de precipitación colectada como precipitación directa en este estudio (69%) fue similar al 73% medido para estratos de hojas perennes en Reefton, Nueva Zelanda (Rowe, 1979) y el 67-71% reportado por Ovington (1954) para *Nothofagus obliqua* en el Reino Unido.

La precipitación directa mensual mostró un patrón estacional, con una alta proporción de precipitación que alcanzó el suelo en el invierno (abril-septiembre), en comparación con el verano donde no se alcanzó el suelo (octubre-marzo). En invierno el promedio máximo de precipitación directa fue alrededor del 75% y en el verano un promedio mínimo de 63%.

En el mismo estudio la pérdida por intercepción fue tratada como el complemento de la precipitación directa, menos una estimación para el escurrimiento por tallos o troncos calculado del 2% del total de la precipitación. El promedio anual de pérdida por intercepción para el periodo de estudio fue estimado en 430 mm, lo que representó el 29% de la precipitación recibida. Rowe (1983) menciona que en un año con precipitación normal, el promedio de la pérdida de intercepción debe ser ligeramente alta

alrededor de 440 mm. Durante el estudio las medidas de pérdidas por intercepción fueron de 380 mm en años relativamente secos a 535 mm en años lluviosos.

5.6.2.4. Intercepción del suelo forestal (litter)

La intercepción del suelo forestal es mucho menor que la intercepción por el dosel. La cantidad de intercepción es ampliamente dependiente del espesor del suelo forestal, capacidad de retención de agua, frecuencia de mojado y tasa de evaporación. Algunos estudios han demostrado que en sólo pocos milímetros de profundidad puede almacenarse el agua y captar arriba de 11 mm durante una tormenta (Chang, 2003).

Las pérdidas por intercepción de la materia orgánica no exceden 50 mm/año, y generalmente varía entre 1 y 5% de la precipitación anual. Aunque el suelo forestal reduce la cantidad de precipitación que alcanza el suelo mineral, también afecta la velocidad del flujo superficial, protege gran parte de la superficie de la tierra del impacto directo de las gotas, así como de la energía del viento la cual reduce la evaporación del suelo; por ello, áreas con suelo forestal serán menos propensas a la erosión del suelo, en comparación con suelos desnudos (Lee, 1980).

Cantú y González (2002), en un experimento encontraron que la estimación del escurrimiento fustal promedio fue de 0.03, 0.50 y 0.60% para pino, encino y pino-encino respectivamente, siendo un porcentaje mínimo del total de la precipitación (974 mm). En general, dependiendo de la intensidad de lluvia, el escurrimiento fustal nunca se observó en eventos de lluvia menores de 4 mm en el bosque de encino. Los bosques de pino-encino y pino requirieron de 5 y 6.5 mm, respectivamente para que se presente el escurrimiento fustal

5.6.3. Evapotranspiración

Es el proceso en el que se suma las cantidades de agua evaporada, desde el suelo o cuerpos de agua (lagos, ríos, presas, etc.), y transpirada por las plantas; este fenómeno se compone de los términos de evaporación y transpiración que pueden presentarse por separado o en conjunto. Además, es uno de los componentes del balance hídrico que representa las mayores pérdidas de agua incorporándola de vuelta a la atmósfera por el

fenómeno de evapotranspiración real (Sánchez, 2001). A continuación se describen estos términos por separado, cuales son los factores que influyen para que ocurran y como pueden ser medidos o calculados.

La **evaporación** es el fenómeno físico en el que el agua pasa del estado líquido o sólido a vapor. Actualmente, la evaporación del agua interceptada por el dosel debe ser determinada por la energía disponible, gradiente de presión de vapor, resistencia aerodinámica de las hojas y características del aire. Cuando todo el dosel es mojado, la ecuación Monteith-Penman (Monteith y Unsworth, citados por Chang, 2003), puede ser usada para estimar la tasa de evaporación potencial del agua interceptada. Si los niveles de humedad del dosel son menores que el nivel de saturación, entonces el potencial de evaporación es proporcional al porcentaje de dosel mojado (Rutter y Morton, citados por Chang, 2003)

La evaporación se genera a partir de diferentes superficies de la tierra, como son el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua libre, etc., Sánchez (2001), menciona algunos:

- a) La superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación.
- b) Desde las superficies de cuerpos de agua libre como: ríos, lagos y embalses.
- c) Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial. Puede tratarse de agua recién infiltrada o en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie después de un largo recorrido en el subsuelo.

Evaporación Potencial (EP). Es la máxima pérdida de agua hacia la atmósfera de una superficie líquida o sólida saturada expuesta libremente a condiciones ambientales. En el caso de una superficie sólida saturada, debe haber abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento (Monsalve, 1998).

La **Transpiración** es la pérdida de agua de las plantas en forma de vapor. Sin embargo a diferencia de la evaporación desde una superficie acuosa, la transpiración es modificada por la estructura de la planta y el comportamiento de los estomas que operan con los

principios físicos que rigen a la evaporación (Kramer, 1974). Las plantas absorben agua del suelo a través de sus raíces, toman una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran. Como son difíciles de medir por separado y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran conjuntamente como Evapotranspiración (ET), (Sánchez, 2001).

La **Evapotranspiración Potencial (ETP)** es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es limitada la cantidad de agua suministrada (Ortiz, 1987).

Según Ortiz (1987), la **Evapotranspiración Real (ETR)** es la cantidad de agua perdida por el complejo planta – suelo en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes. Es evidente que $ETR \leq ETP$; en un lugar desértico, puesto que la ETP puede ser de 6mm/día y la ETR de 0, debido a que no existe agua en el medio para evapotranspirar. La ETR y ETP son iguales siempre que la humedad del suelo es óptima (capacidad de campo) y que exista un buen desarrollo vegetal. Esto sucede en un campo de cultivo bien regado o en un área con vegetación natural en un periodo de suficientes precipitaciones (Sánchez, 2001).

Para el Hidrólogo el interés de la ET se centra en la cuantificación de los recursos hídricos de una zona, es decir, lo que llueve menos lo que se evapotranspira e intercepta, será el volumen de agua disponible.

5.6.4. Factores que influyen en la Evapotranspiración

Sánchez (2001), menciona que la evaporación y transpiración dependen de las condiciones de la atmósfera, edáficas, tipo de vegetación, cuerpos de agua libre, etc., que a su vez se relaciona con los siguientes factores:

- ✓ Radiación solar
- ✓ Temperatura (en relación estrecha con la anterior, pero más sencilla de medir)

- ✓ Humedad: menos humedad cuando hay más evaporación por la radiación solar.
- ✓ Presión atmosférica y la altitud en relación con ella, a menor presión (y/o mayor altitud) más evaporación.

En cuerpos de agua libre, la evaporación depende de:

- ✓ El poder evaporante de la atmósfera (radiación solar)
- ✓ Salinidad del agua.
- ✓ La temperatura del agua.

En un suelo desnudo:

- ✓ El poder evaporante de la atmósfera.
- ✓ El tipo de suelo (textura, estructura, profundidad, etc.)
- ✓ Grado de humedad del suelo.

La transpiración está en función de:

- ✓ El poder evaporante de la atmósfera.
- ✓ El grado de humedad del suelo.
- ✓ El tipo de planta (especie).
- ✓ Variaciones estacionales: en un cultivo de acuerdo al desarrollo de las plantas, en zonas de bosque de hoja caduca la caída de la hoja paraliza la transpiración.
- ✓ Variaciones interanuales: En áreas de bosque la ET aumenta con el desarrollo de los árboles.

Todos estos factores intervienen en el complejo proceso de Evapotranspiración, el cual no es fácil determinar, debido a la interacción de unos con otros y a las características particulares que cada uno manifiesta, pues algunos dependen de procesos fisiológicos de plantas y animales, mientras que otros de cuestiones físico-químicas y meteorológicas.

5.6.5. Medida y cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) y Evapotranspiración Real (ETR)

Al realizar medidas podemos asimilar la evaporación que se produce desde una lámina de agua libre al poder evaporante de la atmósfera. El equipo básico de medida es el tanque de evaporación o evaporómetro, el cual es un recipiente de tamaño estándar, con

un tornillo micrométrico para medir el nivel del agua con precisión. Lógicamente, al lado siempre debe existir un pluviómetro por ejemplo, si en el tanque ha bajado el nivel 2 mm y en el mismo periodo han llovido 3mm, la evaporación ha sido de 5mm.

Para el cálculo de la ETP García (1979), citado por Ortiz (1987), menciona que a partir de los datos de Evaporación (Ev), obtenidos del tanque evaporómetro, se estima de la siguiente manera:

$$ETP = 0.8 (Ev) \quad (6)$$

El cálculo de la ETR se determina a partir del método de Blanney-Criddle, utilizando coeficientes globales de desarrollo de los cultivos y el factor de temperatura y luminosidad, los cuales deben emplearse en las fórmulas establecidas para la determinación de ETR.

5.6.5.1. Métodos para el Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Actualmente numerosas fórmulas nos permiten evaluar la ETP con aproximación para muchos estudios hidrológicos. Normalmente con estas fórmulas se calcula la ETP mes con mes con datos medios de una serie de años. Después, con la ETP mensual y las precipitaciones mensuales, se realiza un balance cada mes del agua en el suelo con lo que se obtiene la ETR, el déficit = ETP – ETR y los excedentes (agua que no puede ser retenida en el suelo y escapa a la escorrentía superficial o subterránea), para cada mes del año. A continuación se describen las fórmulas para el cálculo de la ETP anual, iniciando con la de **Turc** que es una fórmula establecida empíricamente comparando las precipitaciones y la escorrentía total (Custodio, 1983).

$$ETP = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (7)$$

Donde: ETP = evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en mm/año.

L = Parámetro heliotérmico expresado así: $300 + 25t + 0.05 t^2$

t = temperatura media anual en °C

La fórmula de Thornthwaite desarrollada en 1944, calcula la ETP mensual como una función de las temperaturas medias mensuales (Aparicio, 2005), desarrolla la siguiente ecuación:

$$ETP = 1.6 K_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a \quad (8)$$

donde:

ETP = ETP en el mes j , en mm.

T_j = Temperatura media en el mes j , en °C.

a, I = Constantes

K_a = Factor de corrección de la duración del día de acuerdo a la latitud (ver Cuadro 19).

Las constantes I (índice de eficiencia de temperatura) y a se calculan de la siguiente forma:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (9)$$

donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad j = \text{número de mes.} \quad (10)$$

$$a = (675 \times 10^{-9} I^3) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (179 \times 10^{-4} I) + 0.492 \quad (11)$$

5.6.5.2. Método para el calculo de la Evapotranspiración Real (ETR)

Una metodología para estimar la ETR es el propuesto por Blanney –Criddle, para emplear este método, se toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo y la duración del ciclo vegetativo, la temporada de siembra y el tipo de vegetación presente en la zona (Aparicio, 2005).

El ciclo vegetativo varía de cultivo a cultivo, y este se identifica como el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha. Se presenta la tabla 1 de anexos con los ciclos vegetativos de algunos cultivos comunes en México.

Para estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se emplea la fórmula:

$$E_t = K_g F \quad (12)$$

Donde:

E_t = evaporación durante el ciclo vegetativo (mm).

F = factor de temperatura y luminosidad.

K_g = coeficiente global de desarrollo (tabla 1 de anexos).

El coeficiente global de desarrollo K_g varía entre 0.5 y 1.2, los cuales se presentan en la tabla de coeficientes globales de desarrollo para diversos cultivos. El factor de temperatura y luminosidad F se calcula de la siguiente manera:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (13)$$

donde n = número de meses que dura el ciclo vegetativo

$$f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right) \quad (14)$$

P_i = porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año (tabla 2 de anexos)

T_i = temperatura media del mes i en °C.

5.6.7. Influencia de la vegetación en la evapotranspiración

La vegetación influye de manera directa con la evaporación, provocando varios efectos, por lo que difiere según el tipo de cubierta vegetal; al aumentar la edad y disminuir la espesura de la masa forestal, la evaporación tiende a aumentar, debido a que las corrientes de aire pasan a través del estrato vegetal reduciendo los contenidos de humedad en la superficie de las hojas. Pasa lo mismo si aplicamos tratamientos silvícolas intensivos como cortas de regeneración y cortas de liberación que pertenecen al MDS reduciendo significativamente la densidad, esto genera que los suelos queden expuestos a la radiación solar perdiendo agua por evaporación (Pizarro, 2001).

En cuanto a la transpiración, ésta es influenciada por la luz solar, la temperatura, el contenido de humedad y la composición del estrato vegetal. Si tenemos bosques jóvenes la evapotranspiración es mayor debido a la demanda de agua para los procesos fisiológicos de los árboles, en comparación con las masas adultas las cuales sólo la usan para requerimientos mínimos (Pizarro, 2001).

5.6.8. Esgurrimiento Superficial

En hidrología el concepto de escurrimiento se aplica a el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2005), de éste, sólo se llama escurrimiento superficial a la fracción de la precipitación que fluye sobre la superficie terrestre hacia los ríos, lagos u océanos (Becerra, 2005).

Los escurrimientos para su estudio se han clasificado en: superficial, subsuperficial y subterráneo. El primero es constituido por el flujo sobre el terreno y las corrientes en algún cauce; el segundo consta del agua precipitada que se infiltra y escorre pendiente abajo dentro del suelo, cerca de la superficie; y por último el escurrimiento subterráneo que es el agua que se infiltra hasta una profundidad inferior al nivel freático. Aunque relativamente arbitraria, esta clasificación es conceptualmente útil para estudiar el fenómeno de la escorrentía.

El escurrimiento superficial es la fracción de la lluvia que llega a la superficie terrestre y fluye en terrenos con pendiente, hacia los ríos, lagos u océano. Esta cantidad de lluvia varía en un rango amplio, dependiendo de diversas características de la lluvia y del terreno, pero en términos generales pueden establecerse dos situaciones diferentes: la primera cuando la intensidad de la precipitación es menor que la velocidad de infiltración del suelo, el escurrimiento superficial será prácticamente nulo, pues el agua que no sea interceptada por la cobertura vegetal se infiltrará en seguida, al menos hasta el punto donde la capacidad del suelo sea saturada, por lo que la precipitación subsecuente dará origen al escurrimiento. La segunda cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la velocidad de infiltración del suelo, este infiltrará sólo parte

del agua precipitada y el excedente quedará sobre el terreno como encharcamiento o fluirá como escorrentía.

5.6.8.1. Métodos para estimar los escurrimientos

Dado que la medición directa de la escorrentía requiere de una inversión considerable de tiempo y dinero, generalmente se utilizan estaciones hidrométricas estratégicamente ubicadas para coleccionar las estadísticas básicas de alguna región o país, o bien a nivel experimental, y/o en la calibración de modelos numéricos que permitan la estimación de la escorrentía en gabinete. Estos últimos generalmente se utilizan en la planeación y diseño de diversas estructuras para el control de la escorrentía y prácticas de conservación de suelo y agua (Becerra, 2005).

Entre los modelos empíricos desarrollados para este fin, se enlistan los siguientes:

- 1) Cálculo del volumen medio escurrido
- 2) Cálculo del escurrimiento máximo instantáneo a través de:
 - a) La fórmula racional
 - b) La fórmula racional modificada
 - c) Método de las curvas numéricas
 - d) Método de las huellas máximas

5.6.9. Infiltración

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo hasta sus capas inferiores, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también influyen en el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración (Aparicio, 2005 y Vélez *et al*, 2002).

Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hr. La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi

constante a medida que la precipitación se prolonga, y es entonces cuando inicia el escurrimiento (Maderey y Jiménez, 2005).

La **Percolación**, es otro fenómeno relacionado con el movimiento del agua en el suelo que fluye hacia niveles inferiores, especialmente en suelos saturados o casi saturados. Las aguas que percolan son la única fuente del agua de manantiales y pozos (Ortiz, 1990).

Ortiz (1990), Aparicio (2005), Maderey y Jiménez (2005) mencionan algunos factores que intervienen en la capacidad de infiltración:

A. Tipo de suelo (textura y estructura). Entre mayor sea la porosidad como en las arenas gruesas, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración del agua.

B. Grado de humedad del suelo. La infiltración varía en forma inversa a la humedad del suelo, es decir, un suelo húmedo presenta menor capacidad de infiltración que un suelo seco.

C. Presencia de sustancias coloidales. Casi todos los suelos contienen coloides. La hidratación de los coloides aumenta su tamaño y reduce el espacio para la infiltración del agua.

D. Acción de la precipitación sobre el suelo. El agua de lluvia al chocar con el suelo facilita la compactación de su superficie disminuyendo la capacidad de infiltración; por otra parte, el agua transporta materiales finos que tienden a disminuir la porosidad de la superficie del suelo, humedece la superficie, saturando los horizontes más próximos a la misma, lo que aumenta la resistencia a la penetración del agua y actúa sobre las partículas de sustancias coloidales que, como se dijo, reducen la dimensión de los espacios intergranulares. La intensidad de esta acción varía con la granulometría de los suelos, y la presencia de vegetación la atenúa o elimina.

E. *Cobertura vegetal*. Con la cubierta vegetal natural aumenta la capacidad de infiltración y en terreno cultivado depende del tratamiento que se le dé al suelo. La cubierta vegetal densa favorece la infiltración y dificulta el escurrimiento superficial del agua. Una vez que la lluvia cesa, la humedad del suelo es retirada a través de las raíces, aumentando la capacidad de infiltración para próximas precipitaciones. Altas proporciones de materia orgánica sin descomponer permite que una mayor cantidad de agua entre al suelo.

F. *Compactación del hombre y los animales*. El suelo virgen tiene una estructura favorable para la infiltración, alto contenido de materia orgánica y mayor tamaño de los poros. Si el uso de la tierra tiene buen manejo favorecerá el proceso de infiltración, en caso contrario, cuando la tierra está sometida a un uso intensivo por animales o sujeto al paso constante de vehículos, la superficie se compacta y se vuelve impermeable.

g) *Temperatura*. Las temperaturas bajas dificultan la infiltración.

Ortiz (1990), clasifica la magnitud de infiltración utilizando los siguientes criterios:

1. *Muy lenta*. Aquellos suelos con capacidad de infiltración menor de 0.25 cm/hr de lamina de agua, por ejemplo los suelos con altos contenidos de arcilla.
2. *Lenta*. Suelos con infiltración de 0.25 a 1.75 cm/hr. Se incluyen suelos con alto porcentaje de arcilla, bajo contenido de materia orgánica o suelos delgados.
3. *Media*. Infiltraciones de 1.75 a 2.5 cm/hr, por ejemplo los suelos migajones arenosos o migajones limosos.
4. *Rápida*. Infiltración mayor de 2.5 cm/hr de lamina de agua. En este grupo están las arenas y migajones limosos profundos y de buena agregación.

5.6.9.1. Medición de la infiltración

La determinación de la infiltración se puede hacer empleando lisímetros o parcelas de ensayo, de manera análoga a la medida de la evaporación y de la evapotranspiración desde el suelo.

Para medir la velocidad de infiltración, existen varios métodos, entre ellos:

- Cilindros infiltrómetros

- Surcos infiltrómetros
- Método de represa o poceta
- Método del cilindro

Independientemente de la utilidad práctica de cada uno de ellos, los infiltrómetros han sido los más utilizados, ya que requieren de menos equipos y materiales, y son más fáciles de instalar y operar (Gurovich, 1985).

5.6.10. Propiedades físicas del suelo y su influencia en la infiltración

En las últimas décadas los investigadores de los suelos forestales han reconocido la influencia que tienen las propiedades del suelo en el crecimiento y distribución de la vegetación. Las propiedades físicas del suelo se alteran con menor facilidad durante el manejo forestal, sin embargo la estructura y porosidad del suelo pueden alterarse en determinadas condiciones de manejo. A menudo se utilizan técnicas de labranza como el arado profundo, para fracturar las capas más resistentes a fin de mejorar las condiciones para el desarrollo de las raíces o bien el paso de la maquinaria de extracción de madera y construcción de caminos compacta el suelo forestal, sin embargo no es fácil cambiar características físicas como la textura, el color y las relacionadas con las características del perfil (Pritchett, 1986).

5.6.10.1. Textura

La textura del suelo es un indicador de la proporción relativa de arena (A), limo (L) y arcilla (R) que lo constituyen, y su nombre indica la clase textural a la que pertenece, de acuerdo con el sistema de clasificación y el triángulo de texturas (Fig. 10), propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Narro, 1994).

Maderey y Jiménez (2005), describen la clasificación de los diferentes tipos de suelo, así como el tamaño de sus partículas (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clasificación de suelos.

Tipo de Suelo	Tamaño de las partículas
Pedregosos	Mayor de 20 mm
Gravas	entre 2 y 20 mm
Arenas gruesas	entre 0.2 y 2 mm
Arenas finas	entre 0.02 y 0.2 mm
Limos	entre 0.002 y 0.02 mm
Arcillas	menor de 0.002 mm

Fuente: Maderey y Jiménez (2005).

Aunque es muy grande el número de combinaciones posibles de arena, limo y arcilla, el triángulo de texturas sólo contiene 12 clases texturales y los suelos de cada clase tienen aproximadamente la misma superficie específica (área de contacto) y otras características que le son comunes. En tres de las 12 clases de textura predomina un solo tipo de partículas A, L ó R (arena, limo ó arcilla). En otras dos clases texturales incluidas en el triángulo, puede dominar la arcilla combinada con arena (RA) ó con limo (RL), pero no puede dominar arena y limo, ya que la arcilla, por su alta superficie específica, manifiesta sus características aun encontrándose en pequeñas proporciones (Narro, 1994).

Las demás clases de suelos presentadas en el triángulo de texturas contienen proporciones considerables de arena, limo y arcilla que se manifiestan en las propiedades del suelo. Estas clases texturales incluyen en su denominación el término “migajon” (M), seguido del nombre de la fracción de partículas más dominantes. Sólo un pequeño número de suelos contienen cantidades de arena, limo y arcilla que permiten una manifestación similar de cada tipo de partículas, en las propiedades del suelo; a esta clase de suelos se le denomina *migajón* ó *franco* (Narro, 1994).

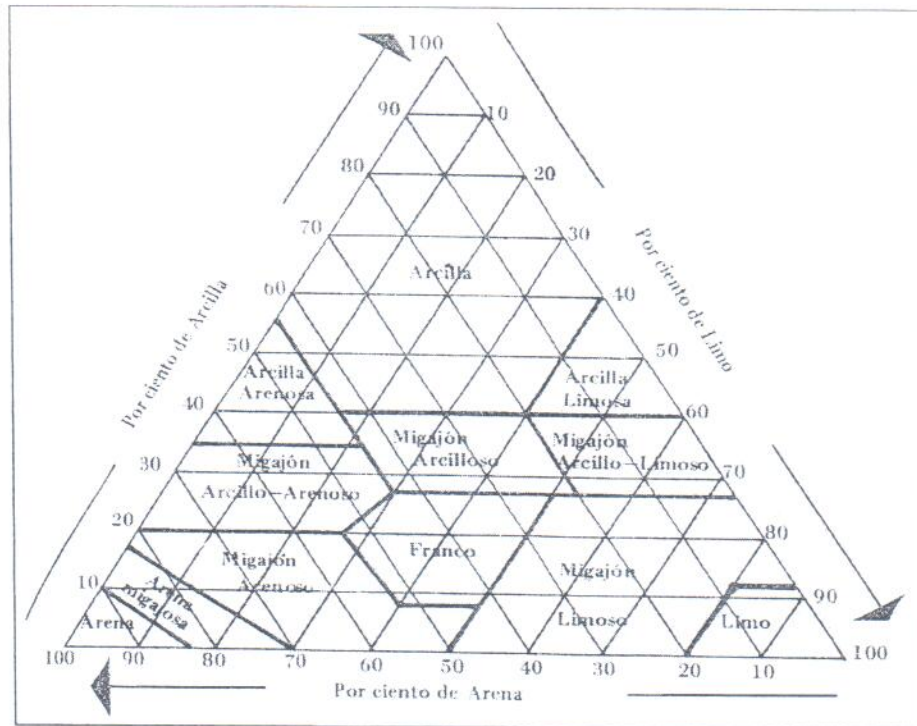


Figura 10. Triángulo de Texturas propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1964)

Los suelos se componen de partículas cuyos tamaños y formas varían ampliamente, y la distribución proporcional de las partículas minerales de diferentes tamaños determina de manera considerable muchas de las propiedades básicas de los suelos. La clase textural de un suelo puede calcularse en el campo con cierta exactitud después de un poco de práctica. A fin de adquirir habilidad, la sensación de humedad del suelo que se frota contra los dedos debe cotejarse con muestras conocidas de laboratorio. Un método más exacto para determinar las designaciones de clase textural es por medio del uso del triángulo de texturas (Pritchett, 1986).

En los suelos de textura fina predomina la arcilla, tienen mayor superficie activa en comparación con los suelos arenosos, poseen mayor capacidad de adsorción de nutrientes, usualmente son más fértiles (Ortiz, 1990).

Los suelos arenosos son más porosos y permiten una más rápida infiltración del agua. Sin embargo, los suelos arcillosos son de mayor capacidad de retención de agua debido a su mayor área superficial; tienen un mayor espacio poroso total que los suelos arenosos.

Esta diferencia se debe al mayor número de microporos que funcionan en la retención del agua. En los suelos arenosos hay más macroporos que funcionan en el movimiento del aire y del agua (Ortiz, 1990).

5.6.10.2. Estructura

Es el arreglo en que las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla) están ensambladas formando agregados (*peds*) (Narro, 1994). Pritchett (1986), la define como la disposición espacial de las partículas libres de suelo y características del suelo tales como la circulación del agua, la aireación, la densidad aparente y la porosidad están influenciadas de manera considerable por la disposición o agregación general de las fracciones iniciales del suelo.

Esta característica del suelo es importante, pues permite saber el grado de compactación, el cual es una limitante para la zona radicular de las plantas dificultando su crecimiento y expansión; reduce el contenido de oxígeno y el paso del agua que son de vital importancia para las plantas y algunos microorganismos presentes en el suelo.

5.6.10.2.1. Descripción de las estructuras

Pritchett (1986) hace una descripción de la estructura del suelo:

- 1) El tipo o forma.
- 2) Clase o tamaño.
- 3) Grado o la distinción de los materiales del suelo que contiene cada horizonte del perfil.

Ortiz (1990), describe los siguientes tipos de estructuras: 1) Granular, 2) migajonosa, 3) laminar, 4) bloques, 5) bloques subangulares, 6) prismática, y 7) Columnar. El Cuadro 6 presenta la descripción de las características particulares de cada uno de los tipos de estructuras, su localización en los horizontes y la influencia en el ciclo hidrológico.

Cuadro 6. Descripción de los tipos de estructuras, su localización e influencia en el proceso de infiltración.

ESTRUCTURA DEL SUELO	CARACTERÍSTICAS PARTICULARES	HORIZONTE EN EL QUE SE LOCALIZAN	INFLUENCIA EN EL PROCESO DE INFILTRACIÓN
Granular	No porosos, peds pequeños en forma de esferas y no forman agregados.	Horizonte A	Movimiento del agua de manera rápida , que fluye a través de los espacios entre las partículas granulares del suelo
Migajonosa	Poco porosos, peds pequeños con forma de esferas y no forman agregados.	Horizonte A	El agua fluye rápidamente por medio de los espacios porosos y entre las partículas.
Laminar	Forman agregados en forma de placas, suelen superponerse impidiendo la permeabilidad.	Horizonte A2 en suelos de bosques y estratos arcillosos	El movimiento del agua es lento , pues impiden la penetración del agua, por el acomodo de las partículas en forma de placas
Bloques	Peds en forma de bloque, con caras angulares bien definidas; suelen romperse en bloques más pequeños.	Horizonte B	El agua penetra de manera moderada , pues la forma irregular y acomodo de las partículas reducen la velocidad de infiltración.
Bloques subangulares	Muy similares a los bloques, pero presentan caras angulares redondeadas dando la forma del ped.	Horizonte B	La infiltración del agua es moderada , permitiendo el flujo a través de los espacios entre partículas de forma muy irregular.
Prismática	Peds en forma de columnas, con sus partes superiores aplanadas, suelen romperse en bloques más pequeños.	Horizonte B	Aunque la forma de la estructura es más regular, el movimiento del agua es moderado
Columnar	Peds parecidos a columnas con las partes superiores redondeadas u ovaladas por lo cual se caracterizan.	Horizonte B en suelos alcalinos (sódicos)	Permite un flujo moderado del agua a través de los espacios generados entre las estructuras columnares

Fuente: Ortiz (1990).

El tamaño ó clase de los agregados puede ser: a) muy fino, b) fino, c) mediano, d) grueso y e) muy grueso.

El grado de la estructura se determina por la estabilidad ó durabilidad relativa de los agregados y por la facilidad con que se disgregan. Varía según el contenido de humedad del suelo y por lo general se define sobre un suelo casi seco y se designa por los siguientes términos: 1) débil, 2) moderado y 3) fuerte, (Narro, 1994).

5.6.10.3. Densidad Aparente

La densidad aparente (D_a) definida por el peso sobre volumen, es la relación del peso al vacío de un volumen dado de suelo no alterado con el peso de un volumen igual de agua (Pritchett, 1986). Narro (1994), la describe como la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que éstos ocupan, es decir, se incluye el espacio poroso existente entre las partículas sólidas.

Un ejemplo de la densidad aparente son los reportados por Maderey y Jiménez (2005), para los siguientes suelos:

- Suelos arenosos 1.40 -1.60 g/cm³
- Suelos limosos 1.30 -1.40
- Suelos arcillosos 1.10-1.30

Con las cifras anteriores las designaciones de suelos pesados y ligeros, arcillosos o arenosos, respectivamente, no reflejan las variaciones de densidad aparente; por el contrario, los más pesados son los de menos densidad aparente y los más ligeros son los de mayor densidad aparente. Los conceptos de suelo pesado o ligero se aplican en el manejo agrícola de los suelos.

Existe una clara relación del valor de la densidad aparente con otras propiedades y características de los suelos; entre estas destacan la textura, el contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación-compresión, la conductividad térmica y la resistencia del suelo a la penetración. Un incremento en el valor de la densidad aparente

de los suelos se refleja en la disminución del espacio poroso y en el incremento de la conductividad térmica (Narro, 1994).

Los suelos que tienen alto contenido de materia orgánica tienen menores densidades aparentes que los suelos bajos en este componente. Los suelos que son sueltos y porosos son de baja densidad aparente, en tanto que aquellos que son compactados tienen valores altos (Pritchett, 1986).

El pisoteo excesivo por los animales de pastoreo, el uso de maquinaria pesada en los aprovechamientos, el uso recreativo intenso (capacidad de carga excedida), o perturbaciones cuando el suelo está húmedo, aumenta la densidad aparente, principalmente en los suelos de textura fina (Pritchett, 1986). Lo anterior provoca alteraciones en el efecto de infiltración del agua en el suelo, pues el espacio poroso se ve limitado y el agua se pierde por escurrimiento superficial al no poder agregarse debido al alto grado de compactación.

El dato de la densidad aparente puede ser utilizado, conociendo la clase textural del suelo, para describir problemas de compactación (reducción del espacio poroso) y tener una idea general de la condición del suelo (Narro, 1994).

Para el hidrólogo lo más ideal es tener suelos con poca cantidad de arcilla y con densidad aparente baja, pues aunque haya menos espacios porosos, el flujo del agua no será obstaculizado, permitiendo la recarga subterránea. Ortiz (1990) indica que para una densidad aparente de 0.80 g/cm^3 se tiene un espacio poroso de 69.81%, y para un valor de 1.00 g/cm^3 el espacio poroso es de 62.26%, pero si la densidad aparente aumenta por ejemplo a 2.00 g/cm^3 el espacio poroso será de 24.53%, lo que indica que el espacio poroso se reduce y limita la presencia de agua y aire.

5.6.10.4. Contenido de Humedad

Custodio (1983) la describe como las medidas de contenido de humedad en un suelo, expresado en proporción de peso de agua, respecto al peso total de la muestra seca o en proporción de volúmenes ocupados en el terreno por el agua y los sólidos. Aquí es de relevante importancia conocer dos conceptos: **capacidad de campo** y **punto de marchitez permanente**, tienen origen agronómico pero que son fundamentales en los estudios del contenido de humedad disponible en el suelo para las plantas.

Capacidad de Campo (Cc). Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica. En la zona de acción de las plantas representa el agua, que transcurrido un tiempo (generalmente unos tres días), después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, parte del agua que podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas.

Punto de Marchitez Permanente (PMP). Es el grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, de tal manera que la fuerza de las raíces para absorberla es menor que la de retención del agua por el terreno, por lo tanto las plantas no pueden extraerla. Su valor real dependerá del tipo de vegetación que exista sobre el suelo y sólo a partir de experiencias de marchitamiento de las plantas podrá obtenerse su valor en cada caso.

Ortiz (1990) a partir de datos publicados en: *Water, The Yearbook of Agriculture* (1955), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S.D.A), realiza un registro de valores aproximados (Cuadro 7), para punto de marchitez permanente, capacidad de campo y capacidad de agua aprovechable en varias texturas de suelo.

Cuadro 7. Texturas del suelo y datos de punto de marchitez permanente, capacidad de campo y capacidad de agua aprovechable.

Textura del suelo	PMP %	Cc%	Capacidad de agua aprovechable %
Arena media	1.7	6.8	5.1
Arena fina	2.3	8.5	6.2
Migajón arenoso	3.4	11.3	7.9
Migajón arenoso fino	4.5	14.7	10.2
Franco	6.8	18.1	11.3
Migajón limoso	7.9	19.8	11.9
Migajón arcilloso	10.2	21.5	11.3
Arcilla	14.7	22.6	7.9

Fuente: Ortiz (1990).

El contenido de agua del suelo se puede expresar en tres formas generales:

- Contenido volumétrico (θ), que es el volumen de agua contenido en una unidad de volumen de suelo.
- Contenido gravimétrico (ω), que es la masa de agua contenida en un suelo por cada gramo de masa de sólidos.
- Lámina de agua (δ), que es la cantidad de agua presente en un suelo expresado como centímetros (ó unidades equivalentes) de agua en un estrato dado de suelo.

El contenido volumétrico puede expresarse como el porcentaje de agua del suelo con respecto al total de éste. El contenido gravimétrico de humedad también puede expresarse en porcentaje y éste indica los gramos de agua contenidos por cada 100 g de masa de sólidos del suelo. Por ejemplo, un contenido gravimétrico de 20% indica que por cada 100 g de partículas sólidas existen 20 g de agua (Narro, 1994).

5.6.10.5.. Volumen Poroso

Es la parte del volumen del suelo que no está ocupado por las partículas sólidas, donde los poros del suelo contienen aire y agua, pero las proporciones relativas de cada uno cambian constantemente. En un suelo seco, los espacios correspondientes a los poros están ocupados principalmente por el aire, pero un suelo pantanoso ó inundado están llenos de agua. Los suelos de textura gruesa tienen poros grandes, pero su espacio poroso total es menor que el de los suelos de textura fina (salvo en los arcillosos

inundados, en donde pueden tener una porosidad incluso menor que la de las arenas). Como los suelos arcillosos tienen un espacio poroso mayor que las arenas, son por lo general más ligeros por unidad de volumen o sea, que tienen una densidad aparente más baja (Pritchett, 1986).

Porcentajes de porosidad según Maderey y Jiménez (2005):

- 40% en suelo medio
- 30% en suelos arenosos
- 40 a 50% en suelos arcillosos

El estrato rocoso y el suelo contienen innumerables huecos o aperturas en los que puede almacenarse el agua. Los huecos son con más frecuencia espacios que quedan entre las partículas sedimentarias, pero también son comunes las diaclasas, fallas, cavidades formadas por la disolución de la roca soluble, como la caliza. El suelo puede ser en ocasiones bastante poroso y los espacios abiertos pueden ocupar entre el 10 y el 50% del volumen total del suelo; la arcilla puede tener una porosidad de hasta 50%, mientras que algunas gravas pueden tener sólo un 20% de huecos. Cuando se mezclan sedimentos de distintos tamaños la porosidad se reduce pues las partículas más finas llenan los espacios entre las estructuras más grandes (Tarbuck y Lutgens, 1999).

La porosidad del suelo es importante para el movimiento del agua en el suelo, a través de un movimiento lento, permitiendo la recarga subterránea y evitando pérdidas de agua por escurrimiento superficial.

5.6.10.5.1. Cálculo del volumen poroso

Si se conoce la densidad aparente, el espacio de los poros del suelo mineral se puede calcular fácilmente dividiendo la densidad aparente entre la densidad de las partículas convirtiéndolas a porcentaje, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de espacio poroso} = 100 - \frac{\text{Densidad aparente}}{\text{Densidad de partículas}} \times 100 \quad (15)$$

Por ejemplo, tomando una densidad promedio de partículas minerales de 2.65g por 100 cm³ y suponiendo una densidad aparente de 1.2 se tienen los siguientes cálculos:

$$\text{Espacio poroso} = 100 - \frac{1.2}{2.65} \times 100 = 54.7\%$$

$$\text{Espacio poroso} = 54.7\%$$

El volumen poroso se distribuye adecuadamente en poros capilares y no capilares de pequeño diámetro, por lo general tiene una alta capacidad de retención de agua, infiltración lenta y probablemente cierta tendencia a encharcarse. Por otra parte, un suelo que tenga una gran proporción de poros no capilares de gran diámetro, por lo general tienen una buena aireación, una rápida infiltración así como una baja capacidad de retención de agua (Pritchett, 1986).

5.6.10.5.2. Factores que influyen en el volumen poroso

Los suelos arenosos superficiales tienen una escala de volumen poroso aproximadamente de 35 a 50% en tanto que los suelos de textura mediana y fina varían del 40 al 60% ó más. La cantidad y la naturaleza de la materia orgánica del suelo así como la actividad de la flora y fauna del suelo, influyen en el volumen poroso así como en la estructura del suelo. El espacio poroso se reduce por la compactación y generalmente varía con la profundidad. Algunos subsuelos compactos pueden tener menos del 25 al 30% de espacio poroso (Pritchett, 1986).

5.6.10.6. Superficie Específica

La superficie específica de un suelo es el área superficial total de las partículas contenidas en una cantidad unitaria de masa o de volumen. Resulta evidente que a mayor área superficial de una sustancia, mayor será su habilidad de participar en reacciones físicas y químicas.

Si comparamos las partículas de arcilla con las arenas o de limo, nos daremos cuenta de que, además de la diferencia de tamaño, existe un marcado contraste entre el área

superficial por unidad de masa (gramo) de estos grupos. Una esfera de 2 mm de diámetro (arena gruesa) tiene un área superficial de $3 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$; si el diámetro es de 0.02 mm (tamaño del limo) la superficie será $300 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. El área superficial de las partículas de arcilla (0.002 mm de diámetro) es de $3000 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. Sin embargo, la forma de estas partículas se asemeja más a la de un plato que a la esférica, y su área superficial es aproximadamente 10 veces mayor que el valor señalado (Narro, 1994).

Una expresión cuantitativa para calcular el área superficial de una muestra del suelo, a partir del supuesto de que las partículas tienen forma de plato o disco, es:

$$A_s = \frac{2 m_s}{D_s} * \frac{(r + t)}{rt} \quad (16)$$

Donde A_s es el área superficial (cm^2) que poseen las partículas sólidas contenidas en una muestra; m_s es la masa de sólidos (g), D_s es la densidad de las partículas sólidas (g/cm^3), r es el radio promedio de las partículas (cm), y t es el grosor promedio (cm) (Narro, 1994).

5.6.10.7. Consistencia.

Narro (1994), describe esta propiedad física del suelo, a la cual la define como la resistencia que este opone a la deformación o ruptura; es el grado de cohesión o adhesión de la masa del suelo. La consistencia depende fuertemente del contenido de humedad del suelo y de la cementación de las partículas sólidas, lo cual se relaciona con la textura, cantidad y naturaleza de los coloides orgánicos e inorgánicos, y con la estructura.

La consistencia describe la respuesta del suelo a fuerzas externas que le son aplicadas y que le pueden causar fracturas, flujo o compactación; tal respuesta dependerá de las condiciones del suelo citadas, así como de la magnitud y manera de aplicación de la fuerza actuante.

El grado de cementación de las partículas sólidas del suelo es considerado **débil**, cuando este puede romperse con las manos; **fuertemente cementado**, cuando se rompe

fácilmente con un martillo; o **endurecido**, cuando sólo se rompe con golpe fuerte de martillo.

5.6.10.8. Color

El color es la característica más obvia e importante de los suelos. Se utiliza para diferenciar los horizontes y en algunos países se utiliza de manera extensiva en la clasificación del suelo (Pritchett, 1986).

El color del suelo es una propiedad física relacionada con la longitud de onda del espectro visible que el suelo refleja al recibir los rayos de luz. La coloración del suelo generalmente es el resultado de sus componentes más abundantes como: humus, óxidos, sulfatos, carbonatos, sulfuros, roca caliza, silicatos, etc. Los colores del suelo pueden ser uniformes o variados (moteados, veteados, etc.). El color del suelo es muy importante, ya que la información obtenida al respecto se puede aplicar en su clasificación ó como criterio para realizar muestreos; también es de gran utilidad para conocer o tener idea de los principales componentes del suelo y para descubrir problemas de sodicidad, salinidad o aireación deficiente (Narro, 1994).

5.6.10.9. Profundidad

La profundidad de los suelos es explorada por el sistema radical de las plantas cultivadas, desempeña un papel muy importante en el manejo de los suelos y en la obtención de buenos rendimientos. Esta propiedad regula directa o indirectamente varias funciones de los suelos agrícolas en beneficio de las plantas (Narro, 1994).

La capacidad de los suelos para proporcionar un buen anclaje a las raíces y suministrar el agua y nutrimentos necesarios a las plantas no sólo depende de la calidad del suelo expresada por cantidad unitaria de éste; sino también de la cantidad de suelo dada por la profundidad, la cual puede marcar la diferencia entre un suelo productivo y otro que no lo sea. En suelos profundos la vegetación suele desarrollarse mejor, pues la estructura radical se desarrolla sin limitantes, permite a la planta extender las raíces hasta lugares en donde encuentre los requerimientos nutrimentales y de agua necesarios para sobrevivir (Narro, 1994).

5.6.10.10. Pendiente del terreno

Esta se relaciona con la forma del terreno, pues en zonas montañosas tendremos pendientes pronunciadas, en cambio en lomeríos y valles las pendientes suelen ser moderadas (Maderey y Jiménez, 2005).

5.6.10.11. Contenido de Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo proviene de las raíces, residuos de plantas y organismos vivos o muertos del suelo. La acumulación de la M.O. es favorecida en áreas de precipitación abundante o drenaje deficiente (Ortiz, 1990).

5.6.10.12. Humus

El humus de los suelos forestales comprende a todo material orgánico en descomposición en el suelo en los estratos F y H, pero no la capa L que es material no descompuesto.

5.6.10.13. Hojarasca

Esta compuesta por las hojas de árboles y arbustos, formando la capa superior del suelo, y la cual a través de procesos químicos de descomposición se agrega a la tierra en forma de Materia Orgánica.

5.6.10.14. Permeabilidad

Este parámetro permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación edáfica en función de la textura, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica (González, 2004). Dentro de éste concepto se definen otros dos:

1. **Permeabilidad efectiva** o **conductividad hidráulica**, representada por el coeficiente de permeabilidad, k , está ligada a las características texturales del medio por donde se desplaza el fluido.
2. La denominada **permeabilidad intrínseca**, K , que es sólo dependiente de las características internas del medio permeable.

La permeabilidad efectiva k , se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende tanto de las características del medio físico (acuífero), como del fluido que lo atraviesa (agua), se mide en mm/hr ó m/día (González, 2004).

5.6.11. Ley de Darcy y Modelo de Green-Ampt

Henry Darcy en 1856 mediante la tarea de diseñar la red de abastecimiento de agua de la ciudad francesa de Dijon y la aplicación de filtros de arena para la purificación del agua, desarrollo la fórmula en la cual establece un coeficiente de permeabilidad (Maderrey y Jiménez, 2005) y su fórmula es la siguiente:

$$Q = (K \cdot S \cdot H) / L = K \cdot S \cdot I \quad (17)$$

Donde:

Q: Caudal infiltrado ($m^3/año$)

K: Coeficiente de permeabilidad de Darcy o conductividad hidráulica (para medios porosos no saturados), expresado en dimensiones de velocidad (m/s).

S: Superficie de la sección transversal de flujo (m^2).

H / L: Gradiente hidráulico o gradiente de potencial del agua del suelo, también denominada I. Es la diferencia en el nivel de agua entre dos puntos (H), dividido por la distancia más corta entre esos dos puntos.

H: altura (mm, cm ó m).

L: distancia, recorrido que realiza el agua (m/hr).

Permeabilidades ó conductividades hidráulicas según Maderrey y Jiménez (2005):

- Suelos gruesos mayor de 100 mm/hr.
- Suelos ligeros 50 a 100 mm/hr.
- Suelos medios 10 a 50 mm/hr.
- Suelos pesados 5 a 10 mm/hr.
- Suelos muy pesados 1 a 5 mm/hr.

Green y Ampt (1911), desarrollaron la teoría física más aproximada, con una solución analítica exacta para explicar el fenómeno de la infiltración. Dicha teoría considera un frente de mojado que divide el suelo con contenido de humedad θ_i debajo del suelo saturado con contenido de humedad $\theta_s = \eta$. El frente de mojado ha penetrado hasta una profundidad L desde el momento t en que empieza la infiltración (Nania, 2002).

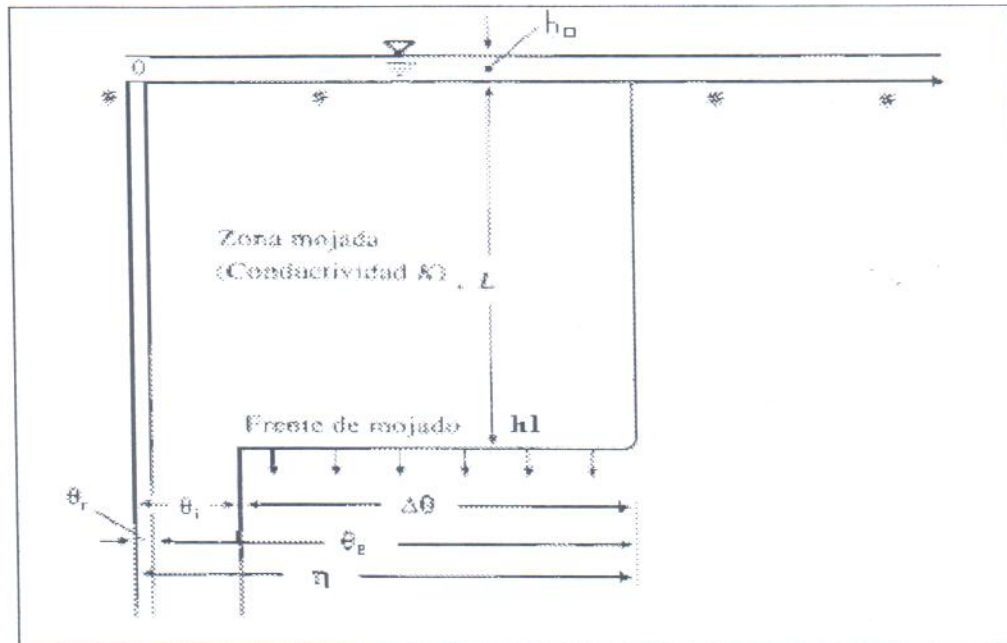


Figura 11. Esquema de las variables que intervienen en el Modelo de Green-Ampt.

Si se considera una columna vertical de suelo de área transversal horizontal unitaria, como la Figura 11, se deduce que la cantidad de agua almacenada como resultado de la infiltración es $L (\eta - \theta_i)$ equivale a:

$$F(t) = L(\eta - \theta_i) = L(\theta_s - \theta_i) = L \Delta\theta \quad (18)$$

Según la ley de Darcy:

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (19)$$

En este caso q es constante a través de toda la profundidad y es igual a $-f$, debido a que q es positivo hacia arriba, mientras que f es positivo hacia abajo. Si el punto h_0 coincide

con la superficie del suelo y el punto h_l se localiza en el lado seco del frente de mojado, la ley de Darcy se aproxima a lo siguiente:

$$f = K \left(\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right) \quad (20)$$

La altura de carga en la superficie h_1 es igual a la profundidad de encharcamiento h_0 . La altura h_2 en el suelo seco por debajo del frente de mojado es $-\psi - L$, entonces:

$$f = K \left[\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L} \right] \approx K \left[\frac{\psi + L}{L} \right] \quad (21)$$

La profundidad del frente de mojado $L = F/\Delta\theta$, y suponiendo $h_0 = 0$, queda:

$$f = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (22)$$

Como $f = dF/dt$, entonces la ecuación anterior se expresa como:

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (23)$$

Desarrollando matemáticamente e integrando podemos encontrar el valor de $F(t)$:

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) \quad (24)$$

Lo que nos da la ecuación de Green-Ampt para infiltración acumulada. Es una ecuación implícita en F y una vez calculada ésta, la tasa de infiltración puede obtenerse como sigue:

$$f(t) = K \left[\frac{\psi\Delta\theta}{F} + 1 \right] \quad (25)$$

La aplicación del modelo de Green-Ampt, requiere la estimación de la conductividad hidráulica K , la porosidad η , y la altura de succión del frente de mojado ψ . (Nania, 2002)

5.6.11.1. Movimiento del agua en el suelo

Se considera que un suelo está saturado cuando todos sus poros o espacios están llenos de agua, en ésta situación el suelo se encuentra sin aire. La fuerza que interviene cuando el suelo está saturado de agua es la gravedad, así el agua circula libremente entre los espacios y desciende en profundidad, denominándose *agua libre o de gravedad*.

El agua libre o de gravedad desaparece por percolación, según la textura del suelo, horas en suelos arenosos y días en arcillosos. Una cantidad de agua queda retenida en el suelo por fuerzas mayores a la gravedad (capilaridad) y al disminuir parte del agua que satura el suelo, el aire llena el espacio que deja (Maderey y Jiménez, 2005).

El agua capilar es retenida con más fuerza que el agua libre o de gravedad, pues llena los espacios en el suelo y es retenida por fuerzas capilares producidas por el contacto aire-agua. En el suelo y el subsuelo existen varias zonas donde el movimiento del agua tiene características propias y leyes particulares. Se pueden distinguir cuatro zonas: suelo, zona no saturada, zona capilar y zona saturada. En la Figura 12 quedan representadas estas zonas.

En la parte más superficial de las formaciones acuíferas, y en contacto con la atmósfera, se encuentra una zona húmeda, caracterizada en general por su alta porosidad y abundancia de materia orgánica. Es comúnmente conocida por suelo y en ella el movimiento del agua está caracterizado por los fenómenos de almacenamiento, evaporación y transpiración. El suelo puede almacenar una cantidad de agua o reserva de agua almacenada por las plantas que dependen de su capacidad de campo (humedad máxima que puede almacenar), punto de marchitez permanente (humedad mínima necesaria para que las plantas puedan vivir), profundidad radicular media y densidad aparente.

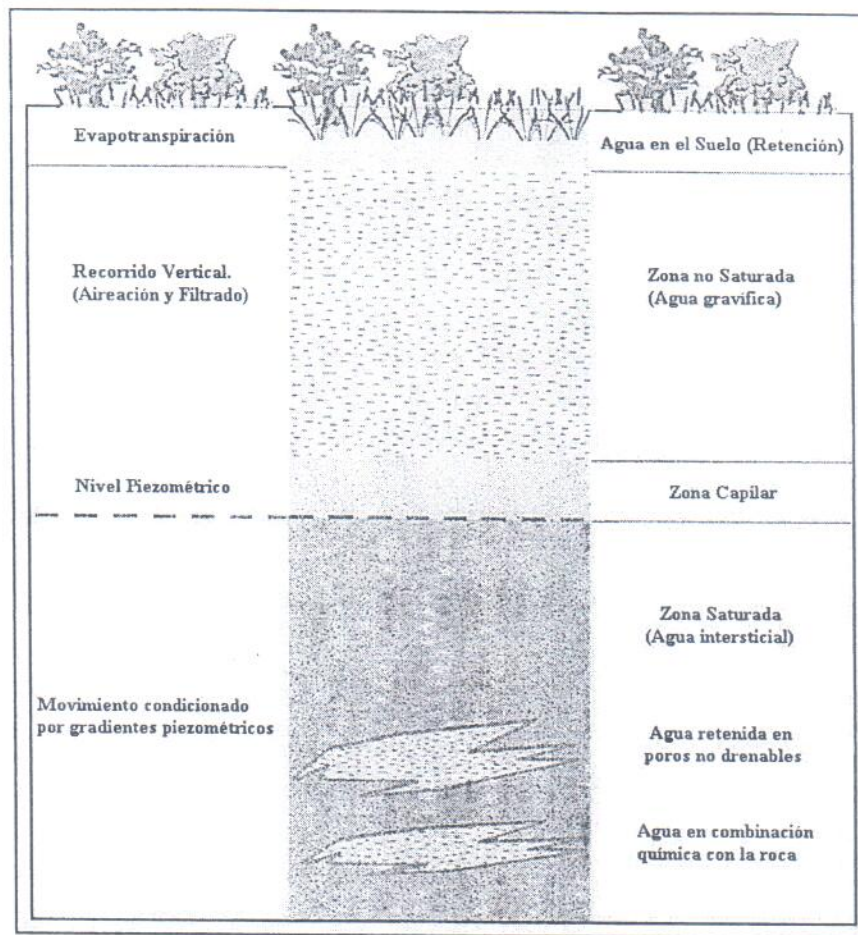


Figura 12. Movimiento del agua en las diferentes capas del suelo
(Modificado de González, 2004)

5.6.11.2. Movimiento del agua en la zona no saturada

El movimiento del agua en esta zona es gravífico, y por tanto verticalmente descendente. Aunque su componente vertical es muy importante, dependiendo de su posición dentro de esta zona y de circunstancias locales, puede ser alterado y tener otras componentes pero, a grandes rasgos, debe ser asumido el movimiento del agua como vertical descendente. También en esta zona existe absorción y debido a las presiones negativas, el nivel piezométrico es inferior a la altura de posición.

5.6.11.3. Movimiento del agua en la franja capilar

Es una zona de transición entre las zonas no saturada y saturada, debida a la absorción de la parte de formación acuífera situada inmediatamente encima de la zona saturada. En la parte superior de la franja capilar las bolsas de aire pueden constituir un freno al

movimiento descendente, mientras que en la parte inferior el movimiento del agua es muy similar al movimiento del agua en la zona saturada. Debido a la absorción, el nivel piezométrico es inferior a la altura de posición.

5.6.11.4. Movimiento del agua en la zona saturada

Es la zona inferior donde el agua satura totalmente los poros del acuífero; en esta zona, el nivel piezométrico nunca es inferior a la altura de posición. En la parte más alta, junto a la franja capilar, el nivel piezométrico y la altura de posición son coincidentes y nula la altura de presión. A medida que se desciende en la zona saturada, el nivel piezométrico se mantiene, pero las pérdidas de altura de posición se compensan con el incremento de altura de presión (González, 2004).

5.6.12. Aguas Subterráneas

De manera general, los pozos y manantiales o fuentes proporcionan agua para las ciudades, las cosechas, el ganado y la industria. El agua subterránea es el agua potable para más del 50% de la población, el 40% del agua se utiliza para la irrigación y proporciona más del 25% de las necesidades de la industria. En algunas áreas, el uso excesivo y desmedido de éste recurso se ha traducido en escasez de agua, agotamiento de las corrientes, hundimiento del terreno, contaminación salina, aumento en el costo de equipo de bombeo y contaminación del agua subterránea (Tarbuck y Lutgens, 1999).

5.6.12.1. Importancia de las aguas subterráneas

El agua subterránea es uno de nuestros recursos más valiosos y de difícil acceso, aunque la percepción con respecto al ambiente subsuperficial de donde procede son a menudo poco claras. En realidad, la mayor parte del ambiente subsuperficial no es completamente “sólido”, sino que consta de incontenibles poros diminutos, así como de estrechas fracturas en el lecho de la roca, generando aperturas donde se reúne y se mueve el agua subterránea.

El agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce que resulta indispensable para los seres humanos, y su valor en términos de economía y de bienestar

humano es incalculable. Desde un punto de vista geológico, el agua subterránea es importante como agente erosivo pues la acción disolvente del agua va minando lentamente las rocas solubles como la caliza, permitiendo la formación de depresiones superficiales denominadas *dolinas*, así como la creación de *cavernas subterráneas*.

5.6.12.2. Distribución de las aguas subterráneas

Cuando llueve parte del agua escurre por la superficie, otra se evapora y el resto se infiltra en el suelo. Los factores que influyen en esta variación son el grado de pendiente, la naturaleza del material edafológico y geológico, la intensidad de la lluvia y el tipo de vegetación. Si tenemos lluvias densas que caen sobre pendientes pronunciadas donde las capas adyacentes están compuestas de materiales impermeables, provocarán obviamente un elevado porcentaje de agua de escorrentia y poca infiltración; caso contrario, si la lluvia cae de manera suave y uniforme sobre pendientes moderadas con materiales fácil de penetrar, las cantidades de infiltración de agua serán mayores (Tarbuck y Lutgens, 1999).

El agua que no es retenida en las capas superficiales de la tierra, se infiltra hacia abajo hasta que alcanza una zona donde todos los espacios libres del sedimento y la roca están completamente llenos de agua, ésta es la **zona de saturación**, el limite superior de ésta zona se conoce como **nivel freático** y hacia arriba del nivel freático se encuentra la **franja capilar**, en la cual el agua es mantenida por la tensión superficial, el área situada por encima del nivel freático que abarca la franja capilar y el cinturón de humedad del suelo se denomina **zona de aireación**, aquí los poros no están saturados sino llenos fundamentalmente de aire.

5.6.13. Formaciones geológicas y su relación con el agua

Los acuíferos son definidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir agua. De tal manera que existe en la naturaleza diversas formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones se dividen en cuatro grupos principales (González, 2004).

- ✓ **Acuíferos:** formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir el agua (grava, arenas, materiales calizos, etc.); con *capacidad de drenaje alta* en las que se pueden perforar pozos y sondeos, con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc.
- ✓ **Acuitardos:** capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; suelen denominarse como formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su *capacidad de drenaje es media a baja*; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.
- ✓ **Acuicludos:** pueden almacenar agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y *se drenan con mucha dificultad*; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); en hidrogeología se asumen como impermeables, pero en ingeniería geológica éste concepto se hace menos preciso, pues drenajes muy limitados pueden presentar problemas en determinadas obras.
- ✓ **Acuífugos:** formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos.

Los acuíferos tienen diferentes tipos de texturas y material geológico, como se presenta en el Cuadro 8, lo que diferencia unos de otros de acuerdo a la facilidad que tienen de permitir el movimiento del agua en el suelo (Fig. 13), según González (2004).

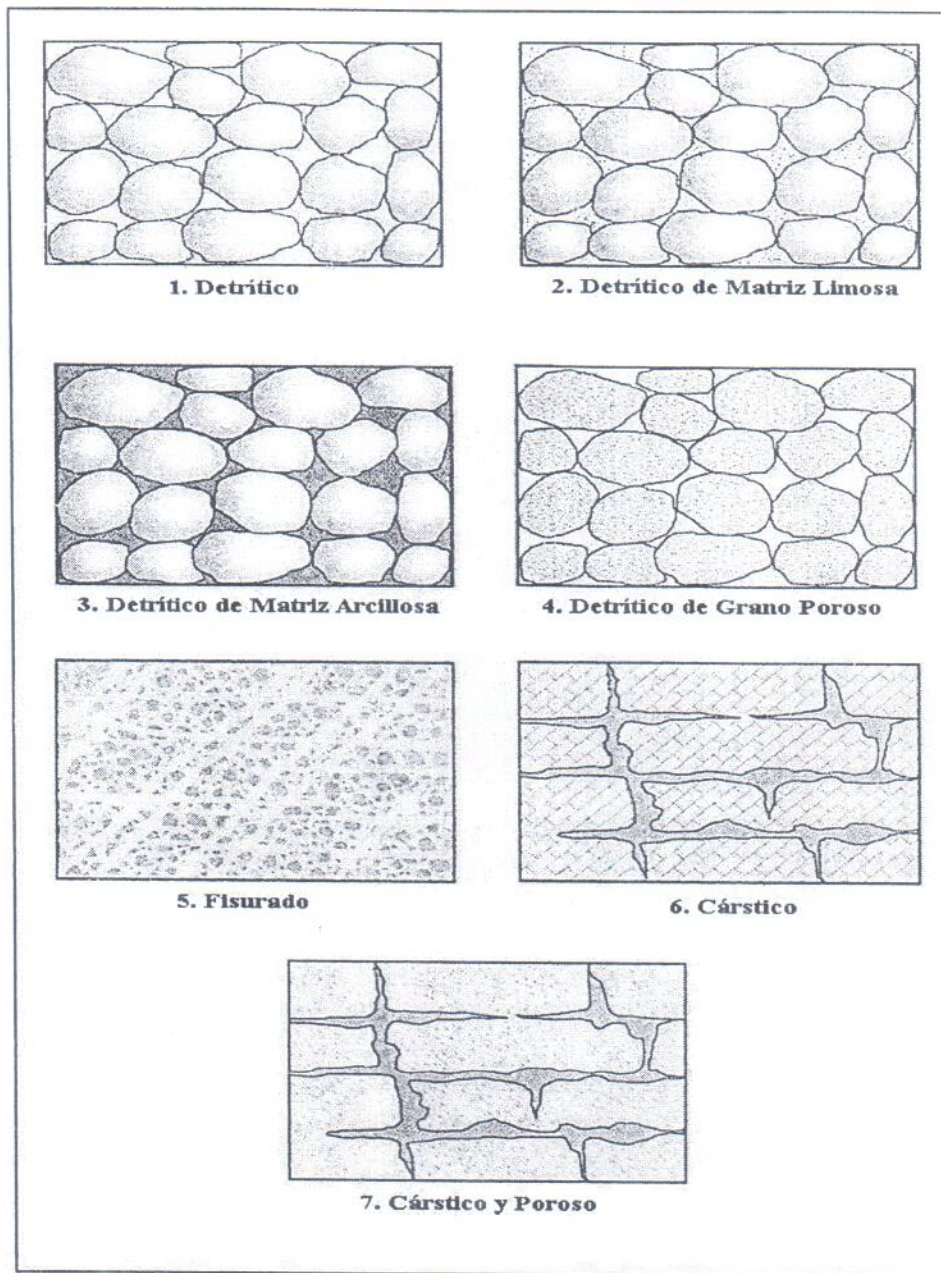


Figura 13. Tipos de Textura presentes en los acuíferos (Modificado de González, 2004)

Cuadro 8. Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua

Tipo de Formación	Características	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir
ACUÍFEROS	Gravas, arenas, calizas	ALTA	ALTA	ALTA
ACUITARDOS	Limos, arenas limosas y arcillosas	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA
ACUICLUDOS	Arcillas	ALTA	MUY BAJA	NULA
ACUIFUGOS	Granitos, gneises y mármoles	ALTA	NULA	NULA

Fuente: González (2004).

5.6.13.1. Tipo de acuíferos y su comportamiento

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos (González, 2004):

1. **Acuíferos porosos**, cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular; entre ellos se encuentran las gravas, arenas y en general todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo. Aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución, forman en conjunto los *acuíferos cársticos* y *fisurados*, y en ellos se encuentran las calizas, dolomitas, granitos, basaltos, etc., siendo los dos primeros los tipos más importantes; por último están los acuíferos cuya permeabilidad se debe a un conjunto de las dos anteriores causas, teniendo así los *acuíferos cársticos y porosos*, aquí son típicas las calcarenitas.
2. **Acuíferos libres**: son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada, éste volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos confinados (Fig. 14).
3. **Acuíferos cautivos o confinados**: son aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados (Fig. 14). El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo del material acuífero; en

realidad, están a presión o en carga debido al peso de los materiales superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero.

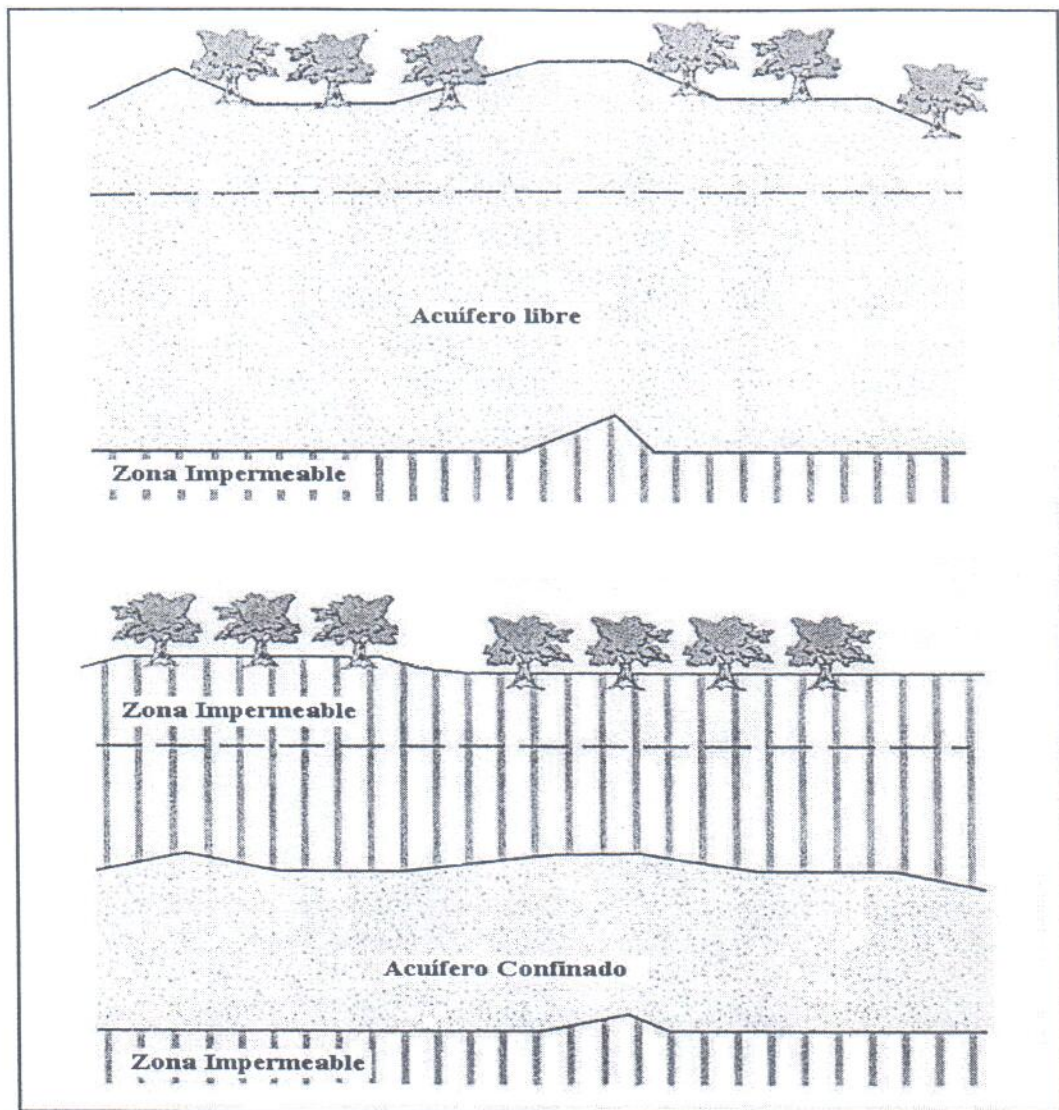


Figura 14. Esquema de un acuífero libre y confinado (Modificado de González, 2004)

4. **Acuíferos semiconfinados:** los materiales que los rodean no son todos impermeables; así el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua a otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado (Fig. 15).

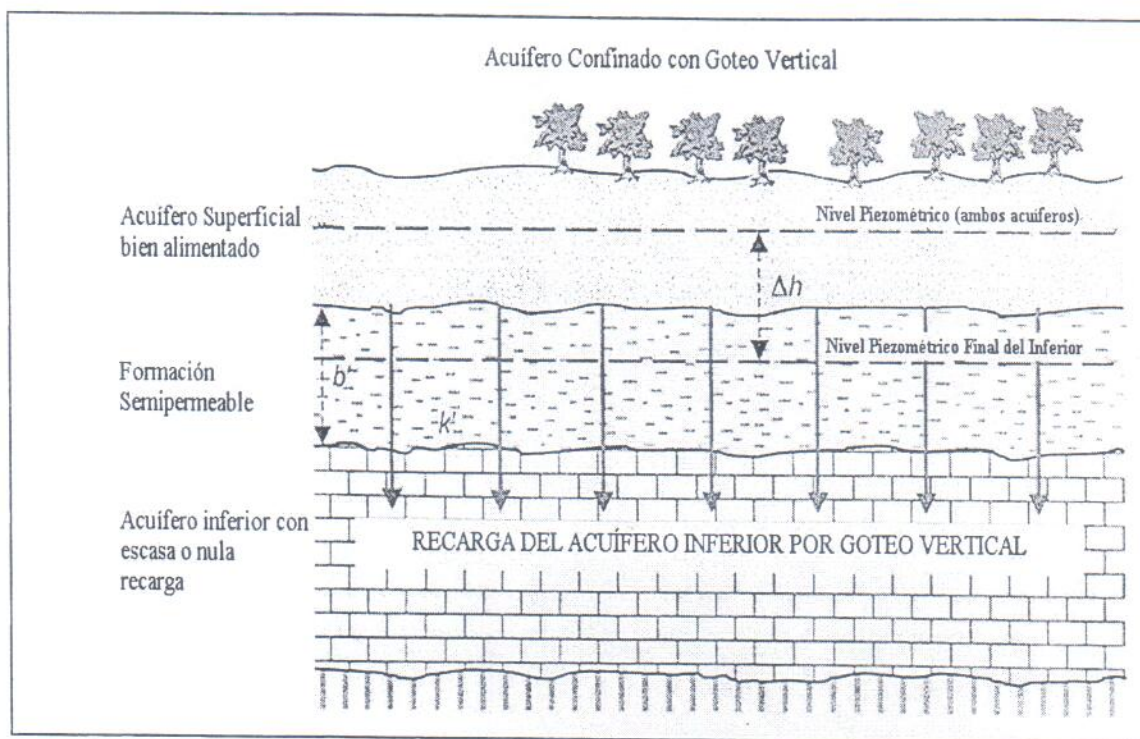


Figura 15. Esquema de un acuífero semiconfinado (Modificado de González, 2004)

Cuando se bombea un pozo, baja el nivel de agua en el mismo y en toda la porción de acuífero circundante a él; el descenso de nivel es más pronunciado en el pozo y se reduce a medida que aumenta la distancia al mismo. La distancia existente entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero en la que la influencia puede considerarse nula, es el llamado *radio de influencia* (Fig. 16). Se forma en torno al pozo un gran cono de bombeo, cuya superficie es denominada dinámica y el valor del nivel de agua en un punto de dicha superficie es el llamado *nivel dinámico* y el nivel estático es el que existe en el pozo antes de iniciar el bombeo.

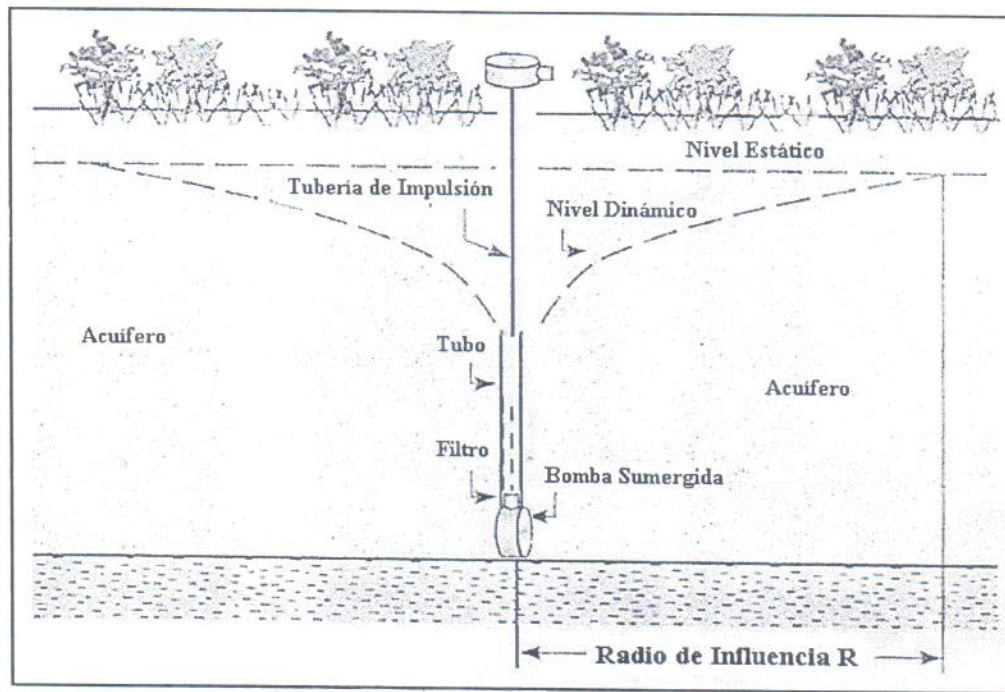


Figura 16. Representación del comportamiento del agua en un pozo.
(Modificado de González, 2004)

5.7. Valoración Económica del Recurso Hídrico

En este apartado es conveniente definir algunos conceptos tales como valor de los servicios, costo de mantenimiento y precio ó tarifas; en relación a la valoración del servicio hídrico en términos de un servicio ambiental, ya que esto permitirá dejar en claro lo que se presenta más adelante.

Cuando nosotros le damos valor a alguna cosa u objeto, debemos tener bien claro que a éste objeto lo debemos denominar como una mercancía, la cual es un bien o servicio que se produce con el fin de usarlo ó intercambiarlo. Por ejemplo si una persona produce un bien para satisfacer sus propias necesidades, el producto resultante no es una mercancía, es tan solo un bien que satisface sus necesidades. Para que sea mercancía, la finalidad de la producción es la venta del producto.

Méndez (1997), menciona que la mercancía tiene dos características principales:

- a) Satisface necesidades humanas; es decir, es un valor de uso.
- b) Se produce para intercambiarla; es decir, es un valor de cambio.

Para los fines que interesan sólo se manejará el valor de uso, ya que en términos de servicios ambientales, no se puede cambiar un bien o servicio por otro.

El mismo autor define al **valor de uso** como la capacidad de un bien o servicio para satisfacer necesidades humanas.

Esto quiere decir que puede haber bienes que sólo tienen valores de uso; por ejemplo el aire (servicio ambiental que satisface necesidades humanas, pero no se intercambia), que es un bien natural no producido por el trabajo del hombre. De esta manera una mercancía o valor de uso puede satisfacer diferentes necesidades humanas, de acuerdo con sus características específicas y sus propiedades que le hacen cumplir con el objetivo de satisfacer esas necesidades. Entonces debemos señalar que el valor de un bien o un servicio, esta dado por su importancia en la satisfacción de necesidades humanas.

Costo. Heyne (1998), lo define como un concepto que esta relacionado con la oferta y la demanda y los principios que gobiernan la oferta, pero él relaciona que este concepto se adapta más al término de *costo de oportunidad* ó *costo de mantenimiento*.

En términos generales el *costo de oportunidad o de mantenimiento se define* como el cuanto cuesta el cambiar una cosa por la otra, es decir cuanto perdemos o ganamos al hacer una buena elección de un bien o un servicio que nos dejará mayores satisfacciones que otro.

Precio. Méndez (1997), lo define como: la expresión monetaria del valor.

También se puede decir que el precio es la cantidad de dinero que damos a cambio de mercancías o servicios, con lo cual, lo que realmente hacemos es expresar monetariamente el valor de dichas mercancías y servicios.

El autor menciona que se transforma el valor en precio, cuando se refiere al precio de mercado que se establece cuando se da el intercambio de mercancías y servicios, en

otras palabras la relaciones entre oferentes y demandantes. Los precios del mercado tienen fluctuaciones debido a los cambios que experimentan las fuerzas de la demanda y la oferta.

Para términos de servicios ambientales el precio ó tarifa puede o no fijarse a la oferta y la demanda, ya que hay quines estarían dispuestos a pagar una cuota establecida, pero hay quines no, además existe quien no percibe el bien o servicio ambiental, ya que no le cuesta nada el producir esos bienes y servicios, pero los obtiene.

De esta manera es difícil establecer un precio de acuerdo a la ley de la oferta o la demanda, pero existen otros mecanismos para establecer una cuota o tarifa para pago de servicios ambientales, tal es el caso del costo de oportunidad.

El agua un recurso natural escaso, que actualmente está siendo cada vez más valioso en términos económicos por las distintas actividades productivas que de ella se desarrollan y más esencial en términos de necesidades sociales (Solanes, citado por Freeman, 1994).

Freeman (1994) destaca una clasificación de métodos de valoración realizada por Mitchell y Carson (1989), donde la valoración se hace sobre distintas características. La primera, es si los datos provienen de observaciones de gente actuando en situaciones reales del mundo donde vive con las consecuencias de sus opciones, o si proviene de las respuestas de la gente a preguntas hipotéticas tales como: *¿qué haría usted si...?*, ó *¿estaría dispuesto a pagar...?* La segunda característica es si el método entrega valores monetarios directamente o si los valores monetarios deben ser inferidos a través de alguna técnica basada en un modelo del comportamiento y opción individual.

Ferreiro (1994) señala que el proceso de valoración del agua, en términos económicos, debe tener en cuenta el carácter final o de bien intermedio que distingue unos usos de otros; por ejemplo de carácter final o de bien intermedio que distingue unos usos de otros; por ejemplo de carácter intermedio el agua para usos industriales y generación de energía eléctrica.

Para la valoración económica de recursos naturales que tienen multiatributos, como el agua, los economistas distinguen una clasificación de los distintos valores a considerar que dependen del uso del recurso (Freeman, 1994; Castro y Barrantes, 1998). Para identificar las funciones que confieren valor de agua, debe considerarse el componente de uso y el componente de no uso.

5.8. Metodología de Valoración Económica

El presente apartado hace una síntesis de las metodologías que se utilizan para la valoración económica del recurso hídrico, y que para el caso de varios estudios en algunos países, los más utilizados han sido los costos de sustitución y la valoración contingente.

5.8.1. Valoración de la Oferta Hídrica

Castro y Barrantes (1998), describen que el valor del agua se mide a través de los costos incurridos en el proceso productivo y de mantenimiento y se puede desagregar de la siguiente forma:

- ✓ Valor de los costos de captación de agua.
- ✓ Valor de los costos de protección de la cuenca contra inundaciones.
- ✓ Valor de los costos administrativos y de operación.
- ✓ Valor del agua como insumo de la producción.

5.8.2. Valor de la Productividad Hídrica del Bosque

En la valoración del agua como un servicio ambiental que ofrecen los bosques, donde se requiere sostenibilidad de la producción en términos de calidad, cantidad y perpetuidad, se requiere considerar el valor de la productividad de los bosques en función de la captación y producción de agua (*valor de uso directo*), más que por los otros servicios ambientales como: *captura de CO₂, belleza escénica, biodiversidad y otros, lo que representa un valor de uso indirecto* (Castro y Barrantes, 1998).

La productividad del bosque en este caso, está determinada por la cantidad de agua captada, y su valor corresponde a un porcentaje cercano al costo total de oportunidad. Si

se ve la productividad del bosque en términos económicos, entonces el no usar los bosques para las otras actividades, se valora por la cantidad de agua captada en su costo de oportunidad. Su valor de uso directo no puede separarse entre el bosque y el agua al depender uno de otro.

5.8.3. Valor de Protección y Mantenimiento

La protección es un mecanismo que ayuda a la conservación de las aguas superficiales y subterráneas, evita la sedimentación de los ríos porque disminuye la erosión de los suelos. Estos beneficios asociados a la protección y conservación del bosque llevan implícito un costo que debe ser considerado dentro de la estructura de valoración económico-ecológico para el uso del agua.

Los costos incurridos en la protección de áreas de bosque se determinan por los gastos en salarios, cargas sociales de personal destinados a la protección, más los montos correspondientes a combustibles, transportes, infraestructura y otros gastos de operación e incentivos utilizados para la protección ambiental.

Además, los costos de reforestación con fines de mitigación y mantenimiento de calidad y cantidad de caudales, regeneración de áreas, otros desembolsos necesarios para el sostenimiento de laderas y, aquellos otros gastos preventivos para evitar el desgaste en la cuenca impidiendo erosión de suelos y reduciendo el impacto de los flujos de agua superficial en el arrastre de sedimentos y/o en la formación de cárcavas.

5.8.4. Valor del Agua según su Uso (Insumo de la Producción) - Valor Monetario del Agua en la Producción Agrícola

En México desde 1982 se implementó el pago de derechos por el uso del agua, y desde entonces el sector agrícola bajo la modalidad de riego ha estado exento de dicho pago. Sin embargo, organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), a la cual pertenece México, han sugerido a sus países miembros recuperar todos los costos económicos en los que se incurre por suministrar el agua para riego (Montesillo, 2003).

Montecillo (2003), describe que el precio de eficiencia social para el agua de riego en México tiene tres componentes: 1) el valor del producto físico marginal del agua; 2) el costo ecológico por agotamiento y 3) el costo ecológico por degradación; lo que al sumarlos nos da ese precio de eficiencia social.

La agricultura usa el agua en el riego de los cultivos, y es de las actividades que mayor consumo tiene del recurso. En condiciones normales, más del 80% del agua disponible se dedica a la agricultura (CNA, 2005). El riego incrementa la productividad agrícola y este cambio en la producción puede ser usado para calcular el valor del agua. Este cambio en la producción multiplicado por el precio del producto agrícola (mercado) aproxima el valor del agua usada en agricultura (Castro y Barrantes, 1998).

Puente (2005), describe que el agua como insumo de la producción aumenta la rentabilidad de los cultivos (mayores ingresos económicos), el precio que se paga por el suministro de agua no representa un costo real para el productor, lo que en ocasiones representa un 32% en aumento de la producción. Con base al modelo del Sistema de Producción (SP) se elaboran los Presupuestos (Ingresos, Costos, Ganancias), para cada cultivo y en su conjunto, obteniéndose los indicadores de rentabilidad. Con amplias variaciones entre cultivos, el Retorno Real del Capital (descontada la inflación), para el Sistema de Producción es de 22.9%. El Costo del Agua representa el 10.9% del Costo Total de Producción.

La productividad agrícola está en función de una serie de condiciones climáticas y agroecológicas; donde el recurso hídrico es vital para que se realice el balance hídrico dentro de la planta como parte del proceso de fotosíntesis. En este proceso la energía lumínica es transformada en energía química; esta energía química tiene un valor de mercado cuando se trata de bienes agrícolas, simple y sencillamente no puede producirse en ausencia de agua.

Lo anterior implica que el agua es insustituible en la producción agrícola y, por lo tanto, se debe hacer esfuerzos por separar - en términos de valor - el aporte de las variables

climáticas, agroecológicas y específicamente, hídricas, en su contribución al cambio de productividad. De manera tal, que se pueda valorar el aporte que tiene el agua en el cambio de la producción.

5.8.5. El Recurso Hídrico como un Flujo Permanente de Ingreso

En un escenario de ausencia total de bosques, es de esperar que el volumen del recurso en épocas secas se vea reducido o limite el desempeño de la actividad económica que hoy se da. Esto significa que la permanencia y ampliación de las áreas de bosque natural (primario y secundario), son de gran importancia para garantizar un flujo hídrico durante todo el año.

La internalización de los costos ambientales en el valor del agua; y la presencia de un flujo hidrológico que se potencializa con la presencia de bosques con poder de captación y retención, favorece la generación de ingreso por *venta* de recurso bajo la presencia de mercados.

Si el recurso se valora desde el punto de vista económico y ecológico, mediante la *internalización de los costos ambientales*, y partiendo del hecho de que los usuarios deben pagar por la utilización del mismo. El ingreso captado como pago por los servicios ambientales, podría ser la base financiera para el desarrollo sostenible de la cuenca y, a la vez, convertirse en un flujo permanente de ingreso que podría ir aumentando conforme se vayan incrementando las áreas boscosas captadoras del recurso (Barzev, 2000).

5.8.6. Valoración de la Demanda Hídrica – Método de Valoración Contingente (MVC)

Para el cálculo de la demanda hídrica actual, se utilizan datos estadísticos existentes recolectados en la región o en la zona de estudio. Sin embargo, si no existe este tipo de información, para estimar la demanda para los bienes y servicios ambientales, es necesario recurrir a técnicas estadísticas más sofisticadas y basadas en la opinión directa de los consumidores sobre los servicios ambientales que reciben en forma directa o

indirecta del bosque – relacionados con el recurso hídrico. Esto se logra a través de la aplicación de encuestas *in situ* - El Método de Valoración Contingente.

El Método de Valoración Contingente (MVC) intenta averiguar, a través de la pregunta directa, la valoración que otorgan las personas a los cambios en el bienestar que les produce la modificación en las condiciones de oferta de un bien ambiental. Básicamente, se les pregunta a las personas lo que estarían dispuestos a pagar por recibir un beneficio.

El proceso de “preguntar” se hace a través de una encuesta directa. Lo que se busca son las valoraciones personales de los encuestados frente al crecimiento o la reducción de la cantidad de un bien dado, en un mercado hipotético. Se considera que el mercado contingente no incluiría sólo el bien en sí mismo como mejor calidad y cantidad del agua, retener la erosión, procesamiento de nutrientes, etc., sino también el contexto institucional en el que éste sería ofertado y la forma en que se financiará.

El Método de Valoración Contingente ha sido ampliamente utilizado en la valoración de bienes que no tienen mercado específico, siendo que en muchos casos es la única técnica de estimación del beneficio. Además es aplicable a la mayor parte de los contextos de la política ambiental.

5.9. Pago por servicios ambientales

Este es un esquema de pago en el cual, es retribuido el valor económico generado por un bien o servicio ambiental, en éste caso el recurso hídrico que se genera por los bosques al captar agua.

5.9.1. Experiencias en México

El Pago de Servicios Ambientales (PSA) en México es muy reciente, en 2002 se incluyó en el Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR). La respuesta de la sociedad se manifestó rápidamente. Ese mismo año se aprobaron 37 proyectos para el pago de estos servicios, mismos que ya están en operación y en diferentes etapas de desarrollo (Contreras, 2003).

En el año 2003, el municipio de Coatepec, Veracruz, fue el primero del País en efectuar el pago por servicios ambientales a productores forestales que llevan a cabo proyectos productivos de conservación y desarrollo en zonas boscosas del estado, garantizado el abasto de agua en las principales zonas urbanas. La manera de operar del esquema de Pago de Servicios Ambientales consiste en hacer una retribución económica a los dueños y poseedores de la tierra en la que se producen beneficios que los usuarios o consumidores demanden (Contreras, 2003).

En el 2005 la mayoría de los estados están participando en el Programa de Pago por Servicios Ambientales (Cuadro 9), en sus distintas modalidades, como el Pago por Servicios Hidrológicos (PSAH), Captura de Carbono, Biodiversidad, Mejoramiento y Reconversión de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA).

Cuadro 9. Relación de los principales estados que registraron mayores superficies (has), Para participar en el Programa de Pago por Servicios Ambientales en el 2005.

Estado	PSAH (has)	PSA-CABSA		
		Captura de Carbono (has)	Biodiversidad (has)	Sistemas Agroforestales (has)
Aguascalientes	---	---	300	---
Chiapas	20,000	5,000	3,200	1,000
Coahuila	3,500	---	3,300	---
Chihuahua	15,000	---	6,200	---
Durango	32,000	2,200	4,300	---
Guerrero	---	---	500	1,800
Jalisco	7,500	---	---	---
Nayarit	2,000	---	---	---
Nuevo León	1,800	---	950	---
Michoacán	1,000	---	---	---
Puebla	2,500	1,800	---	---
Oaxaca	7,000	12,000	6,800	10,000
Sonora	1,500	---	800	---
Tabasco	200	200	400	---
Veracruz	12,000	350	100	300
Yucatán	7,500	---	850	---
En el PSAH participan todos los estados (CONAFOR, 2005)				

La CONAFOR de acuerdo a los lineamientos establecidos en el programa y a la inmediata respuesta de la sociedad en la ejecución de los proyectos ubica Áreas Promisorias para el establecimiento de Mercados de Servicios Ambientales (Cuadro 10).

Cuadro 10. Áreas Promisorias para el Establecimiento de Mercados de Servicios Ambientales.

Áreas Promisorias	Superficie Forestal (has)	Estado al que pertenecen
Cancún	559,638.35	Quintana Roo
Cerro Grande (Colima – Villa de Álvarez)	142,519.78	Colima y Jalisco
Copelita (Crucecita – Huatulco)	182,273.46	Oaxaca (Costa)
Oaxaca de Juárez	254,979.89	Oaxaca
Valle de Bravo	140,776.75	Edo. México
Xalapa – Coatepec	51,453.26	Puebla y Veracruz
Zapalinamé (Saltillo)	888,351.30	Coahuila
Zona Metropolitana de Monterrey	1,150,311.89	Coahuila-Nvo. León
Izta-Popo	50,000.00	México-Puebla
Zona Maya	200,000.00	Quintana Roo

Fuente: CONAFOR (2005).

5.9.2. Servicios ambientales de los ecosistemas

Los ecosistemas brindan una serie de servicios que benefician directa o indirectamente a la sociedad. Popularmente a estos servicios se les denomina, servicios ambientales. Reconocer socialmente estos servicios ha permitido una mayor y mejor comprensión de la importancia que tienen los recursos biológicos para el desarrollo económico y social. También ha permitido una conciencia más amplia sobre la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. El reconocimiento social de los servicios ambientales, plantea la necesidad de conocer con mayor exactitud el costo de disponer de ellos, así como el análisis de la oferta y la demanda de los mismos. El objetivo es el de internalizar dichos costos en los precios de los distintos productos que dependen de los servicios ambientales, para que se dé una distribución más equitativa de costos y beneficios entre los propietarios de los bosques y los usuarios de tales servicios (Barrantes, 2000).

La principal dificultad que enfrenta el pago por servicios ambientales es la valoración económica del mismo, debido a la ausencia de mercados, la información deficiente para estimar el costo de ofrecer el servicio y la estimación técnica (balance hidrológico) de la producción hídrica por los bosques, entre otros. El hecho de que los bosques ofrezcan una mayor productividad económica, podría hacer que los propietarios tengan una visión distinta de los mismos y, por lo tanto, realicen esfuerzos importantes por apoyar las

acciones estatales en la comercialización de servicios ambientales; esto es uno de los aspectos positivos que ofrece el pago por servicios ambientales, tanto para la conservación como para el desarrollo (Barrantes, 2000).

5.10. Políticas públicas y normatividad ambiental

En México la elaboración de políticas públicas y su planificación, están rezagadas si se le compara con otros procesos sociopolíticos, su desarrollo ha sido escaso, ya que se ha estudiado más la política social, en cuanto a su formación, estructura y funcionamiento, los partidos políticos, el proceso electoral, la institucionalidad y la toma de decisiones, pero en materia hidrológica hay un gran camino por recorrer.

Una política pública puede significar la realización específica ante una situación social deseada, como es el caso en materia ambiental, sin embargo, el diseño y desarrollo de la política obedece a los intereses de poder de diversos actores sociales. Las políticas públicas, por lo tanto, se reconocen como un proceso de aprendizaje colectivo para aumentar la capacidad de resolver problemas, influyendo de manera decisoria en la formulación y legitimación de la agenda pública a través de un proceso de interlocución y comunicación entre la sociedad y el gobierno. Ante ésta situación se requiere abundar en el marco teórico de la elaboración de políticas públicas ambientales (Vázquez, 2001).

La atención a la problemática ambiental y creación de políticas, ha evolucionado desde los inicios de los llamados de los conservacionistas ante la extinción de especies y la destrucción de los ecosistemas, hasta la consideración de manejo sostenido de recursos, primero como ecodesarrollo y posteriormente como desarrollo sustentable, es decir, desde una perspectiva estrictamente biológica y ecológica a una dimensión ambiental en la relación sociedad-naturaleza (Vázquez, 2001).

En 1987 se abordó el aspecto de la conservación mediante la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y el de la atención ambiental a través de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), para dar paso a la política social ambiental con la creación de la Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y

Pesca (SEMARNAP) en 1994, la cual se modificó en 2001 a SEMARNAT, ya sin Pesca y con el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), entre otras.

Para enriquecer el patrimonio de los recursos forestales de México, es importante contar con instrumentos jurídicos actualizados y dirigidos al desarrollo forestal sustentable, cumpliendo con estas expectativas el día 25 de febrero de 2003, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, misma que entró en vigor el día 23 de mayo del mismo año y el día 21 de febrero de 2005 fue publicado su Reglamento que entró en vigor el 23 de marzo del mismo año.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable en su Capítulo 6, habla de los Servicios Ambientales Forestales, en su artículo 133 menciona que “En el marco de los tratados internacionales y disposiciones nacionales aplicables, la Secretaría promoverá el desarrollo de un mercado de bienes y servicios ambientales, que retribuyan los beneficios prestados por los dueños y poseedores de recursos forestales a otros sectores de la sociedad”.

Y su artículo 134 establece que “La secretaria promoverá la formación de profesionales o técnicos, así como de empresas, los cuales estén capacitados para certificar, evaluar y monitorear los bienes y servicios ambientales, para el otorgamiento de asesoría técnica y capacitación a los titulares de los aprovechamientos forestales en la materia y para enlazarlos con los usuarios o beneficiarios de los bienes y servicios ambientales, así como a los mercados correspondientes en el ámbito nacional e internacional”.

Pero existen otros instrumentos normativos relacionados a la conservación de los recursos naturales, como en el caso del agua donde tenemos a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 y la Ley de Aguas Nacionales. La primera contempla la “Conservación del Recurso Agua” y establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales y la segunda es el

marco regulatorio bajo disposiciones legales para el aprovechamiento, manejo y conservación del recurso agua de la nación.

La NOM-011-CNA-2000 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 02 de agosto de 2001, y tiene por objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento.

Esta Norma Oficial Mexicana, establece las especificaciones que se deben aplicar en los estudios, para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas Hidrológicas y en unidades hidrogeológicas.

La Ley de Aguas Nacionales, instrumento jurídico publicado en el Diario Oficial de la Federación el 1° de diciembre de 1992 y con su última reforma publicada en el DOF el 29 de abril de 2004, creada con el objetivo de regular la explotación, uso ó aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Todo esto con el fin de atender aspectos de normatividad, ordenamiento ecológico del territorio, áreas naturales protegidas, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre, regulación ambiental industrial, de materias y residuos peligrosos y la calidad del aire, la descentralización, la comunicación y participación social, la información y evaluación, y la propuesta de un aspecto en materia ambiental.

En relación con lo anterior, es necesario señalar que no existe un acuerdo común respecto al significado de la participación social y de quien y cómo deben participar, en temas tales como “problemática ambiental” y “participación ciudadana”. En este sentido, se ha señalado la necesidad de desarrollar elementos teóricos para abordar la problemática ambiental, atender los obstáculos que surgen de la organización interna institucional y de la ciudadanía, así como los relacionados con la poca cultura de organización y trabajo en equipo y falta de interés por comprometerse y asumir

responsabilidades; advirtiéndose problemas estructurales acumulados que son producto de un sistema, en donde lo económico predomina sobre los demás componentes del desarrollo (Aguiluz *et al.*, citado por Vázquez, 2001)

5.11. Mercados de agua y establecimiento de tarifas.

Como se mencionó en el tema anterior, en relación a una política y normatividad incluyente en la integración del agua a un esquema de mercado y establecimiento de tarifas; se aborda un poco sobre el tema, partiendo de que puede ser una alternativa para la regulación y un uso eficiente del recurso, por cada uno de los principales actores consumidores de agua (doméstico, industrial, agrícola, comercio, etc.).

Bien sabemos que el problema del agua es una situación que está latente, que no está resuelto y que se requiere de algún mecanismo que asigne el recurso con eficiencia y equidad, reduzca la presión de la demanda por agua y reasigne el recursos hacia usos alternativos de mayor valor, por lo que la asignación del agua a través del mercado es una posibilidad, pero para muchos se ha convertido en un mito o tabú, lo que requiere de analizar la propuesta con mente abierta (Ramos, 2006).

Se debe cuidar no dejar a las libres fuerzas del mercado el recurso agua, ni entregar este recurso al capital o la inversión extranjera, ni promover la acumulación o especulación del agua, sino evaluar el mercado como un mecanismo complementario para resolver el problema del agua en México (Ramos, 2006).

El agua puede tener o adquirir el carácter de mercancía, siempre y cuando llegue al nivel de poder ser comprada y vendida; independientemente del tipo de bien⁶ en que se clasifique al agua, público, privado, social, libre, común, mercancía y económico, ésta puede adquirir la modalidad de mercancía una vez que tenga propietario y se incorpore al mercado (Ramos, 2006).

⁶ Para mayor información en relación al tipo de bienes en los que se clasifica el agua. consultar la **referencia bibliográfica citada:** Mercados de Agua. **Autor:** Sergio Ramos O. **Año:** 2006.

El **mercado** puede definirse como un mecanismo de asignación de recursos, en el que interactúan compradores y vendedores de bienes y servicios. El agua no tiene un precio establecido como tal, sino valor, un valor alto para la sociedad, pero tiene la categoría de un bien escaso y limitado. Para que exista precio tiene que haber mercado y hoy día tiene que hablarse de un mercado del agua, el cual según los especialistas en el tema, será la solución al problema de eficiencia del agua (Ramos, 2006).

El agua generalmente ha tenido el carácter de bien social, partiendo de que todo ser humano tiene derecho a ella en cantidad y calidad, es un recurso usado generalmente para cualquier actividad, por lo que debe diferenciarse al tipo de usuario al que va destinada, para que de esta manera pueda ser cobrada a un precio real aproximado dependiendo su uso.

No se puede cobrar el agua al mismo precio, en el caso de consumo doméstico, que para uso agrícola, industrial y de comercio, ya que el primero no percibe un ingreso por su uso, sino que sólo se limita a cubrir las necesidades particulares de los usuarios, en cambio en las otras tres actividades, se usa como insumo de la producción y los usuarios tienen un ingreso por el uso del recurso, por lo que estos últimos deberían pagar a un precio más elevado, en comparación con el consumo doméstico que sólo debe limitarse a pagar los costos de administración (costos de operación, mantenimiento y distribución) en que se incurren para suministrar el vital líquido (Ramos, 2006).

Con lo anterior, se da una idea de cómo se pueden establecer tarifas para los diferentes usuarios del recurso, quien usa el agua sólo para cubrir sus necesidades pagará una cuota para cubrir costos de administración (supongamos 30 m³ por mes en una familia, para cubrir sus necesidades básicas), pero cuando se rebase esta cantidad el agua se pagará a un precio real aproximado; lo mismo en aquellos que utilicen el agua como insumo deberán pagar a un precio más elevado y no a costo social, según el autor arriba citado.

Incluso las aguas residuales pueden entrar al mecanismo de mercado, pues al darles un tratamiento y dejarlas libres de contaminantes, pueden reincorporarse a distintas actividades como, riego de cultivos, riego de jardines, lavado de autos, o inclusive para

usarse en los baños sanitarios de hoteles, etc., de esta manera quienes realizan procesos de producción y contaminan el agua tienen una alternativa de generar un mercado o por lo menos librarse de pagar impuestos o multas por contaminación. Esta es otra alternativa para todos los usuarios del agua, de reducir la contaminación y recuperar una parte de sus costos por abastecimiento del recurso.

6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este apartado, se mencionan aspectos relevantes de la zona de estudio tales como: ubicación, clima, geología, suelos, hidrología, aspectos socioeconómicos, aspectos ecológicos y problemática de la zona.

6.1. Ubicación del área de estudio

La microcuenca del Río Zahuapan, con una superficie de 2223.5 ha, se encuentra ubicada al noreste de la cabecera municipal de Tlaxco, en el Estado de Tlaxcala (Fig. 17), con latitud Norte de $19^{\circ} 40' 00''$ y una longitud Oeste de $98^{\circ} 03' 00''$, a una altitud media de 2900 msnm.

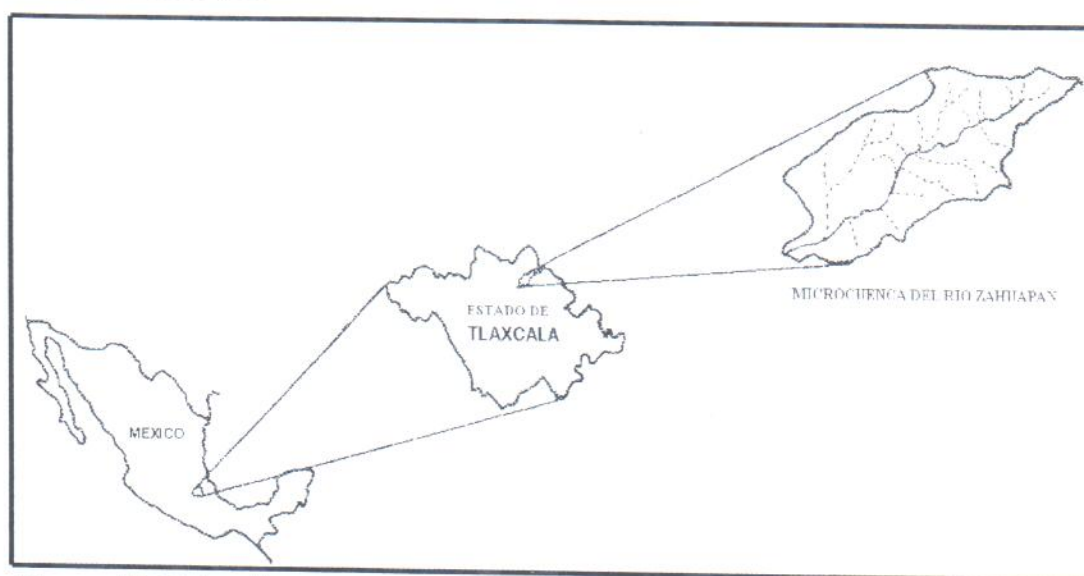


Figura 17. Ubicación geográfica de la microcuenca del Río Zahuapan.

6.1.1. Clima

El tipo de clima es templado subhúmedo, con precipitaciones en verano y un bajo porcentaje de lluvia invernal menor a 5 mm, el régimen pluvial promedio en la región es de 750 mm anuales, según la estación meteorológica Tlaxco (Clave: 29032 de la CNA). Los meses de mayor precipitación son junio, julio, agosto, con precipitaciones que van de los 110 a los 130 mm mensuales.

El Cuadro 11 presenta datos climatológicos que corresponden al promedio mensual de la estación Tlaxco (Clave: 29032 de la CNA), con datos del año 1997 a 2001.

Cuadro 11. Datos climatológicos promedio de la estación Tlaxco, Tlax.

Meses	Precipitación media (mm)	Evaporación Potencial media (mm)	Temperatura media (°C)	Temperatura min. (°C)	Temperatura max.(°C)
E	9.6	39.74	11.4	1.6	21.1
F	10.7	42.31	12.4	2.5	22.3
M	14.5	60.19	14.5	4.4	24.7
A	36.7	69.13	15.8	6.1	25.5
M	70.9	77.03	16.2	7.3	25.1
J	127.5	70.52	15.4	8.2	22.7
J	118.4	73.08	14.5	7.3	21.7
A	112.8	63.62	14.3	6.8	21.9
S	104.8	58.46	14.3	7.4	21.3
O	43.7	52.91	13.5	5.6	21.4
N	12.9	44.21	12.5	3.3	21.7
D	6.0	39.93	11.8	2.5	21.1
	668.5	691.1			

Fuente: Normales climatológicas⁷

Los datos del cuadro anterior se presentan gráficamente en la Figura 18.

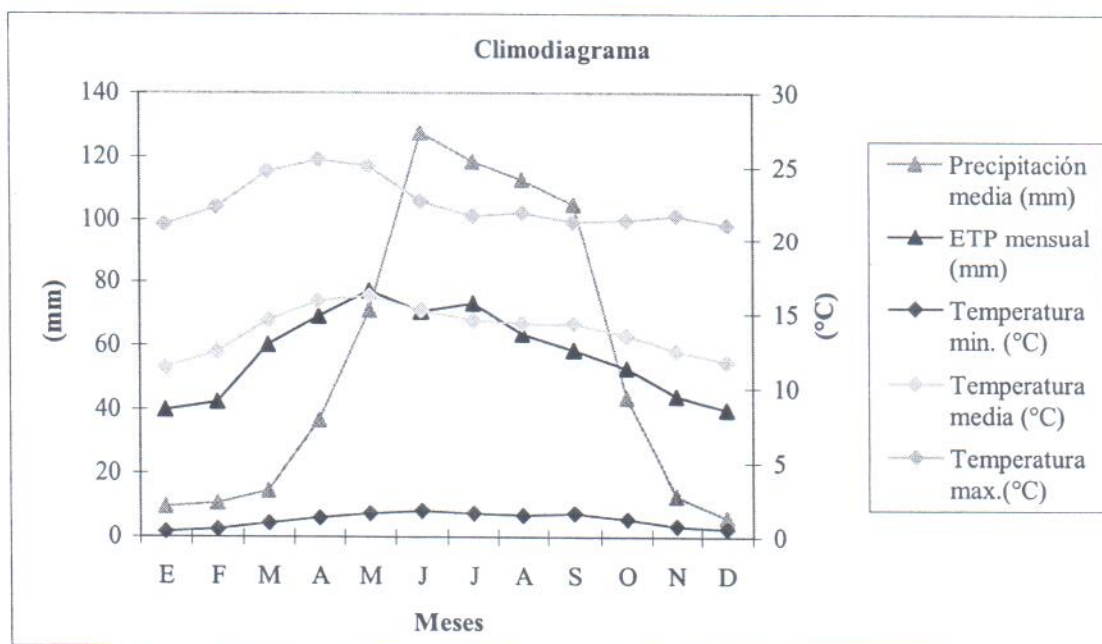


Figura 18. Climodiagrama de parámetros climatológicos de la estación meteorológica Tlaxco.

⁷ Para más información consultar la página web en: www.smn.gob.mx

6.1.2. Geología

Basado en la síntesis geográfica de los municipios del Estado de Tlaxcala publicado por el INEGI (1988), la zona de estudio presenta rocas ígneas extrusivas como andesitas, basaltos y tobas intermedias (ver anexo cartográfico), que tienen minerales de feldespatos, plagioclasas y ferromagnesianos.

6.1.3. Suelos

La variedad edáfica es poca, debido al tipo de clima que prevalece en la región. En ésta región los suelos son de origen residual (ver anexo cartográfico), los cuales tienen un desarrollo incipiente o moderado, generalmente de textura media o arenosa (INEGI, 1988).

Según la clasificación FAO-UNESCO (INEGI, 1988), en la sierra de Tlaxco dominan los suelos con una profundidad de 35 cm en promedio asociados a suelos con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes (feozems háplicos). La textura varía de limoso a arcilloso, siendo los suelos dominantes de textura limosa, variando su composición de acuerdo al tipo de vegetación existente.

6.1.4. Hidrología

Con base a la síntesis geográfica de Tlaxcala, publicada por INEGI (1985), la zona de estudio queda comprendida en la región Hidrológica Río Balsas (RH-18), Cuenca del Río Atoyac, subcuenca perteneciente al Río Zahuapan. Dentro del Estado de Tlaxcala, esta región se encuentra representada por la cuenca del río Zahuapan.

6.1.5. Aspectos Socioeconómicos

Como señala la Figura 19, la localidad de Tlaxco contaba en el año 2005 con 13,743 habitantes a una tasa de crecimiento de 3.5% anual (INEGI, 2000).

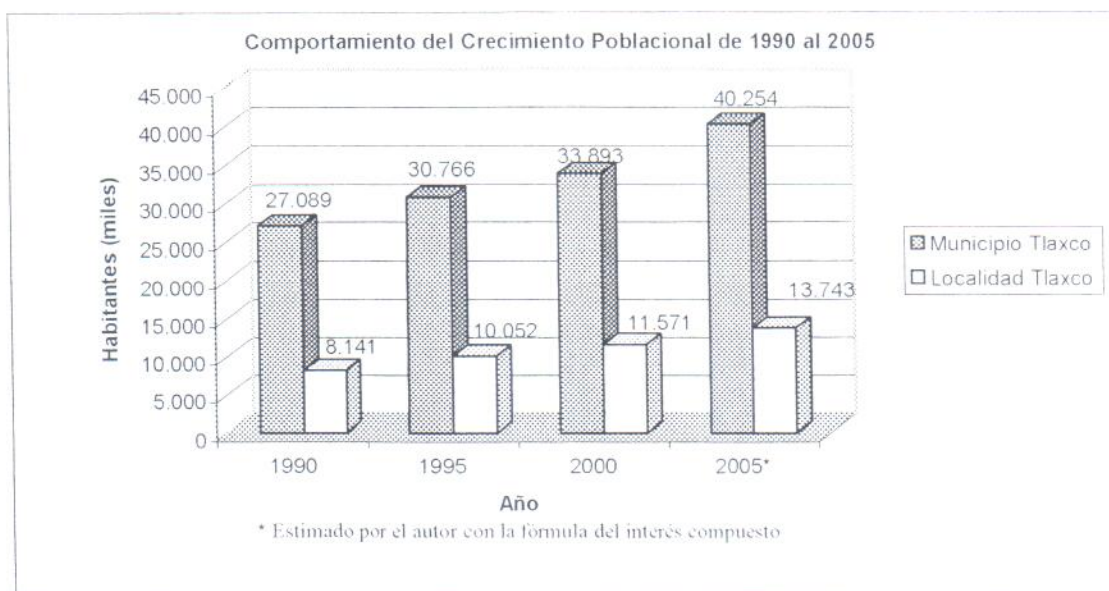


Figura 19. Crecimiento Poblacional en los últimos 15 años en el municipio y localidad de Tlaxco, Tlax.

La estructura demográfica muestra un crecimiento constante y registra una población del 40% en hombres y de 60% en mujeres del número total de habitantes (Fig. 20), de acuerdo a datos presentados por INEGI en el Censo del 2000.

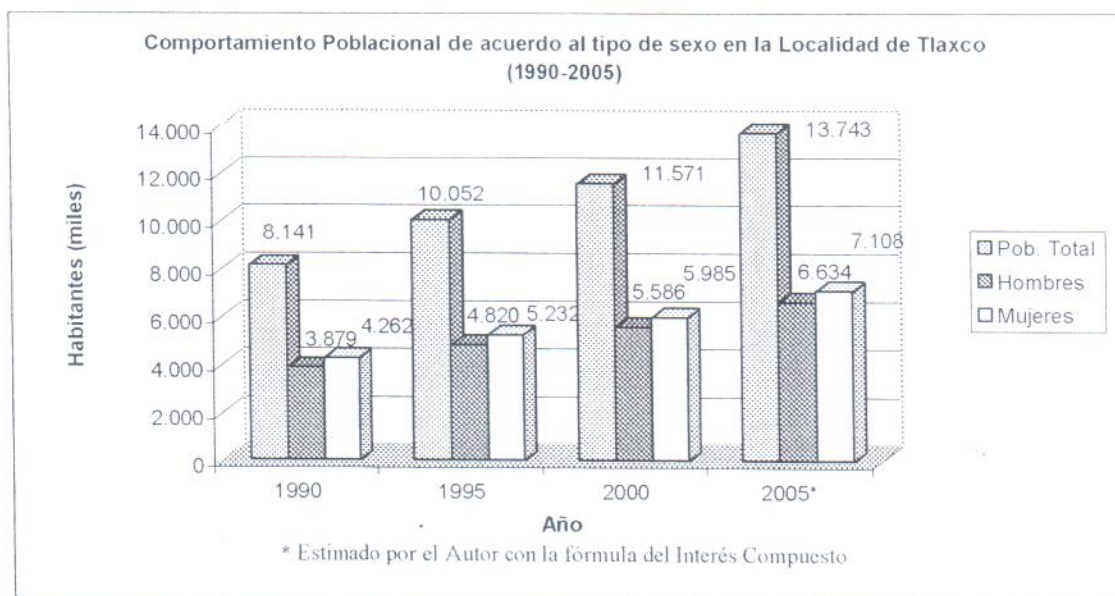


Figura 20. Comportamiento Poblacional por sexo en los últimos 15 años en la localidad de Tlaxco, Tlax.

De la población del municipio alrededor del 40% (Fig. 21), se considera económicamente activa siendo principalmente gente adulta (INEGI, 2000). Las principales actividades que se realizan son el comercio de productos lácteos destacando la venta de quesos, productos de conserva (frutas en almíbar), la agricultura de temporal como: maíz, frijol, haba, cebada y avena, ganadería de traspatio (aves, ovinos, porcinos, bovinos de leche y carne), y el **sector forestal**.

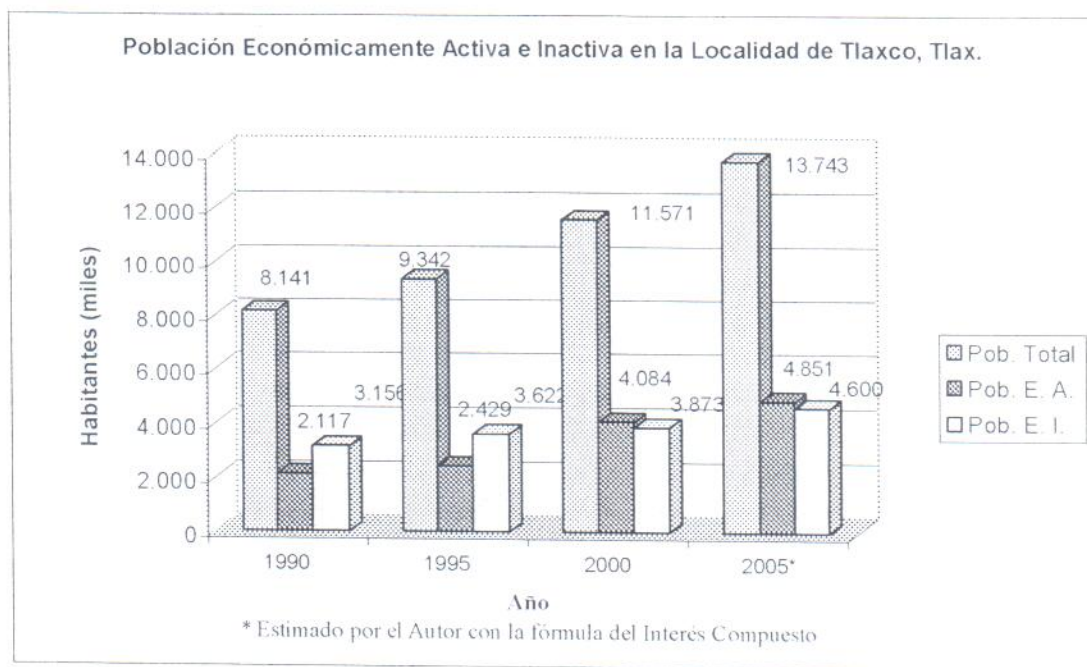


Figura 21. Población económicamente activa e inactiva

El municipio de Tlaxco cuenta con servicios públicos como alcantarillado, red de agua potable el cual es abastecido por tres pozos que suman un gasto de 480,924 m³/año (según la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tlaxco), luz pública, servicio médico (un Centro de Salud y una clínica del IMSS), infraestructura de carreteras, transporte local y foráneo (Obras Públicas, H. Ayuntamiento de Tlaxco, 2005).

El nivel de analfabetismo en la localidad es mínimo según datos de INEGI en el Censo del 2000, presentan grado escolar mínimo de preparatoria, pues cuentan con el Colegio de Bachilleres del Estado de Tlaxcala (COBAT) 09 Tlaxco, y a partir del 2004 se construyó un Instituto Tecnológico en Ciencias Ambientales que imparte cursos a nivel licenciatura.

6.1.6. Aspectos Ecológicos

En este apartado se describe las principales especies de flora, fauna y tipo de suelos presentes en la zona de estudio, describiéndolas por nombre común y científico en cada caso.

6.1.6.1. Tipos de Vegetación

Entre la vegetación existente dentro de la microcuenca destacan las especies de aprovechamiento maderable como son: el pino que ocupa mayor porcentaje de la superficie con el 70% sobresaliendo por su importancia el *Pinus patula*, seguido de *Pinus teocote*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus pseudostrobus*; el oyamel (*Abies religiosa*), que representa el 20% de la cobertura forestal en la microcuenca; y el encino (*Quercus sp.*), que ocupa el 10% restante junto con otras hojosas como el madroño (*Arbutus sp.*), además de diferentes especies arbustivas como el encino rastrero o cespitoso (*Quercus microphylla*). Existen otras especies arbustivas como la trompetilla (*Bourbardia ternifolia*), el zacate (*Stipia sp.*), y el zacatón (*Aristidia sp.*), escobilla (*Baccharis conferta*), grama (*Hilaria centroides*), cenicilla (*Helianthemum macruora*), la jarilla (*Senecio calcarius*), entre las más notables (Programa de manejo de aprovechamiento forestal, 2002).

La mayoría de los bosques que encontramos en la microcuenca están actualmente bajo manejo forestal, con ciclos de corta de 10 años y con aprovechamientos por contingencias como incendios y plagas, los cuales pueden aplicarse en una sola anualidad. Los principales métodos de manejo son el MDS y el SICODESI.

6.1.6.2. Fauna

La fauna que se encuentra con mayor frecuencia dentro de la microcuenca es el conejo (*Sylvilagus cunicularis*), ardilla gris (*Sciurus aureogaster*), zorrillo (*Corepatus mesoleucus*), tlacuache (*Didelphys marsupialis*), comadreja (*Mustela frenota*), ratones de campo (*Peromyscus maniculatus*), armadillo (*Dasypis novecinctus*), codorniz (*Colinus virginianus*), víbora de cascabel (*Crotalus triseriatus*).

6.1.6.3. Uso del Suelo

El uso del suelo en la zona de estudio son el forestal, pastizal y agricultura; aunque algunas áreas presentan grado de erosión derivado del cambio de uso del suelo por el avance de la frontera agrícola y la inadecuada aplicación de tratamientos silvícolas.

El tipo de tenencia de la tierra en la microcuenca es particular, dividido en predios de superficies variables y con diferentes usos del suelo de acuerdo a los intereses de los dueños, pero el principal uso es para actividades agrícolas y forestales; Gonzáles (2005, com. pers.).

6.1.7. Problemática de la zona

Social. Según INEGI (2000), la población de Tlaxco no presenta índice de pobreza significativo, pues alrededor del 90% de su población adulta se encuentra económicamente activa en diferentes ocupaciones (agrícola, pecuaria, forestal, comercio y pequeña industria como maquiladoras de costura). El sector agrícola y forestal cuentan con créditos por parte de programas del gobierno federal, el primero con el PROCAMPO y el Fondo Nacional para Desastres Naturales (FONDEN); sin embargo, carecen de capacitación técnica para un mejor rendimiento de sus cultivos. El segundo con el Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR), Programa de Conservación y Reforestación (PROCOREF), Programa de Desarrollo de Plantaciones (PRODEPLAN), Programa de Certificación y Manejo Forestal (PROCYMAF), los cuales contemplan asesoría técnica dirigida a los productores para un mejor desarrollo de cada uno los programas antes mencionados.

El comercio y la pequeña industria tramitan créditos a través de la Secretaría de Finanzas del Estado, no siempre teniendo una respuesta favorable, pues los requisitos suelen ser muy burocráticos, lo que representa una limitante para un desarrollo micro-económico.

Estructural y normativo. A pesar de que la población no es numerosa, se presentan limitantes respecto a las cuestiones estructurales y normativas, pues el gobierno

municipal carece de un vínculo con productores forestales, agricultores y pequeña industria y comercio, careciendo así de una organización de los múltiples actores políticos, sociales y económicos limitando el desarrollo a nivel local.

Técnicos. No se cuenta con el personal técnico capacitado suficiente que desarrolle las actividades de planeación, ejecución y seguimiento de programas municipales, como de desarrollo social, agricultura, medio ambiente, educación, salud, obras públicas, etc., esto limita generar información a la cual se le pueda dar seguimiento a futuro, prediciendo y previniendo posibles problemáticas que pongan en riesgo el desarrollo de la calidad de vida de los habitantes.

Económicos. La tala ilegal representa pérdidas ecológicas y monetarias para los dueños de los bosques, derivada de una problemática de libre acceso, de la cual nadie tiene control pues no existe vigilancia en la zona.

El arbolado derribado por viento es uno de los problemas que se presenta cada año con la llegada de los fuertes vientos en los meses de febrero y marzo, aunque no es muy significativo, genera reducción en la cobertura vegetal. Los incendios forestales es otro problema que se presenta cada año con la llegada de las sequías, generando pérdidas monetarias y ecológicas al reducir la cobertura vegetal dejando prácticamente el suelo descubierto y altamente propenso a la erosión. En los últimos años la incidencia de incendios ha disminuido, pero es un fenómeno que está latente para aparecer en cualquier momento.

Medio Ambiente. El problema más notable en la microcuenca es la erosión de áreas dentro y fuera de la misma, producto del cambio de uso del suelo para establecimiento de cultivos, la deforestación, la aplicación de tratamientos silvícolas intensos, los cuales al momento de la extracción de los productos maderables (arrastre y arrime de la trocería), deja el suelo desprovisto de vegetación y da paso al proceso de erosión, provocando el arrastre de sedimentos hacia las partes bajas por escurrimiento superficial.

7. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación se circunscribe en el diseño del método para estimar la captación de agua de la microcuenca del río Zahuapan, Tlaxco, Tlax., y la determinación del valor económico-ecológico que representa para la región.

A través de consultas bibliográficas, análisis documental de políticas públicas, entrevistas a funcionarios y aplicación de encuestas, así como el levantamiento de datos en campo, el uso de material cartográfico como: ortofotos digitales, carta topográfica, edafológica, hidrológica, uso del suelo y tipo de vegetación; así como el uso de software empleado en cartografía (Arc View 3.2 y AutoCad Map 2004), para el procesamiento de la información, se realizó el diagnóstico de los recursos presentes en la zona, lo cual ayudó a obtener información confiable para la realización del presente trabajo.

7.1. Cartografía y delimitación del área de estudio

Mediante el uso de las ortofotos digitales E14B23 (b, c, e y f) escala 1:20,000, proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y Datum: ITRF 92, cartas topográfica, edafológica y geológica (E14B23, Tlaxco), y la aplicación del Software Arc View 3.2 y AutoCad Map 2004, se delimitó el área de interés, obteniendo información como: forma y área de la cuenca, ubicación de poblaciones, caminos existentes, flujos y cuerpos de agua, uso del suelo, unidades edafológicas y geológicas, tipo de vegetación y su clasificación a través de la unidad de manejo denominada **rodal**, área de cada unidad de clasificación, porcentaje de cobertura y pendiente.

7.2. Medición de variables morfométricas de la microcuenca

Se obtuvo el valor de cada uno de los parámetros morfométricos, que son fundamentales en el estudio de manejo de cuencas pues ayudan a conocer de que manera se comporta el flujo hídrico superficial, el cual está estrechamente relacionado con las características fisiográficas tales como: el área de drenaje, la elevación media de la microcuenca, pendiente ponderada, sistema de corrientes, etc.

7.3. Balance Hidrico

Para el cálculo de éste factor hidrológico, se estableció la fórmula que toma las variables del ciclo hidrológico para realizar la distribución del agua, basado en la publicación de Lee (1980) y Chang (2003), donde:

$$BH = P - (Int + Ev + E + Inf + Rs) \quad (26)$$

Donde:

BH: Balance Hidrico

P: precipitación (mm/año)

Int: Intercepción (mm), por el dosel y suelo forestal.

Ev: Evapotranspiración (mm/año), Evaporación + Transpiración.

E: Escurrimiento Superficial (m³/ha).

Inf: Infiltración (mm/hr ó día)

Rs: Recarga subterránea (mm/hr, mm/día ó cm/hr, cm/día)

El cálculo de estos parámetros es complejo, pero se establece una metodología adoptada de las fuentes bibliográficas consultadas, y ajustada a las condiciones de la microcuenca.

7.3.1. Precipitación

Este es el más relevante de los componentes de la fórmula del Balance Hidrico, pues representa la principal entrada de agua en una cuenca o microcuenca. Su importancia radica en la forma de suministro natural de agua a los ecosistemas, condicionando la vida de los organismos y el desarrollo de las actividades humanas (agrícolas, económicas, industriales, etc.).

Las variables que se tomaron en cuenta para la estimación de la precipitación fueron las siguientes:

- ✓ Precipitación media anual (mm).
- ✓ Número total de eventos, con precipitación efectiva en un periodo de tiempo (tormentas).
- ✓ Número de eventos extremos (existencia probable de inundaciones).

7.3.2. Intercepción de la Precipitación

La intercepción de la lluvia, es la parte de la precipitación que queda retenida en el estrato forestal, cuantitativamente ésta es la diferencia entre la precipitación (P), y la suma de la precipitación directa (T), y escurrimiento por tallos y/o ramas (S) (Lee, 1980).

$$I_c = P - T - S \quad (27)$$

Donde:

I_c : Intercepción del Dosel (mm).

P : Precipitación (mm).

T : Precipitación directa, aquella que alcanza el suelo forestal.

S : Escurrimiento por tallos y/o ramas (mm).

Se estableció y calculó un coeficiente ponderado de intercepción (CPI), considerando variables como:

- ✓ Tipo de vegetación (bosque, pastizal y agricultura).
- ✓ Cobertura (%).
- ✓ Tipo de corteza y densidad de ramas (de acuerdo al tipo de especie).

La medición de la intercepción se determinó relacionando la precipitación menos la precipitación directa y el escurrimiento por tallos, adaptando valores ya existentes de investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo, las cuales se utilizaron como punto de referencia.

7.3.3. Infiltración

Es la porción de precipitación que finalmente es absorbido por el suelo mineral, su valor potencial es la precipitación efectiva (P_e), éste valor se obtiene en la fórmula propuesta por Lee (1980):

$$P_e = T + (S - I_f) \quad (28)$$

Donde:

P_e : Precipitación efectiva (mm).

T : Precipitación directa.

S : Flujo de agua por tallos y/o ramas.

I_f : Intercepción del suelo forestal.

No es fácil medir la infiltración, al igual que la recarga subterránea, por lo que generalmente los valores de estos componentes del Balance Hídrico, se determinan por diferencia de la precipitación, menos la intercepción, evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

Se estimó la infiltración aplicando el principio del método de Green-Ampt y la Ley de Darcy, la cual sólo funciona para medios porosos no saturados, por lo que se limita a esta condición de suelo.

Las variables que intervienen en gran medida en la infiltración son la pendiente, capa de materia orgánica (hojarasca y humus), textura, estructura, porosidad, profundidad del suelo y la percolación, las cuales fueron consideradas para determinar la infiltración.

Los usos del suelo en la microcuenca son cuatro, se estimó la profundidad del suelo o capa fértil apta para el desarrollo de las raíces de las plantas, los cuales se describen a continuación:

1. Bosque (profundidad promedio del suelo de 60 cm)
2. Agricultura (profundidad promedio del suelo 30 cm)
3. Pastizales (profundidad promedio del suelo 50)
4. Erosión (suelos desnudos, pero se tomó en cuenta la presencia de grietas)

Cabe, señalar que la profundidad del suelo se utilizó para calcular el valor del gradiente hidráulico (variable que considera la Ley de Darcy), es decir, un desnivel o pendiente en la parte baja del suelo, por el cual el agua fluye por gravedad a través de los espacios vacíos del suelo llamados poros.

Para el caso de las áreas degradadas, por la ausencia de suelo se consideró la presencia de grietas, que a través de ellas puede penetrar cierta cantidad de agua, y por ello se le dio un valor hipotético al gradiente hidráulico, el cual se describe más adelante.

A continuación se presenta el desarrollo del cálculo de la infiltración, a través de las fórmulas derivadas de las ecuaciones generales (Green-Ampt y Darcy), las cuales se plantearon de manera práctica y aplicada, dejando de lado el concepto teórico-matemático que por lo general manejan los autores sin llevar a una explicación concreta.

Esta en primer lugar a la Ley de Darcy, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$Q = k.i.A \quad (29)$$

Donde:

Q : Caudal de paso (unidades de volumen/tiempo: m³/hr)

k : coeficiente de permeabilidad –valores experimentales- (mm/hr ó cm/hr)

i : gradiente hidráulico (adimensional)

A : Área de paso (m²)

El gradiente hidráulico lo obtenemos de una diferencia de niveles en una distancia determinada, lo que nos da como resultado una pendiente, expresada de la siguiente manera:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (30)$$

Por otra parte el volumen por unidad de tiempo, puede derivarse de la fórmula del gasto, tal y como se presenta a continuación:

$$Q = A.V \quad (31)$$

Donde: Q : gasto (en unidades de m³/seg ó m³/hr)

A : área en m²

V : velocidad de flujo en m/seg ó m/hr

Igualando la fórmula 29 y 31, tenemos lo siguiente:

$$k.i.A = A.V \quad (32)$$

Se cancelan las áreas y nos queda:

$$V = k.i \quad (33)$$

Donde: V : velocidad de descarga (velocidad con la que se infiltra el agua)

k : coeficiente de permeabilidad (mm/hr ó cm/hr)

i : gradiente hidráulico (adimensional)

La velocidad (V), no representa una velocidad real con que el agua fluye a través del suelo. Esta velocidad llamada de descarga está referida al área, que no es realmente de la que dispone el agua para fluir, considerando que el flujo sólo es posible a través de los espacios porosos, debe de disponerse de una velocidad llamada de infiltración (v_i); por lo cual se plantea una nueva expresión para la ecuación de continuidad con otras variables, tal y como se señala a continuación:

$$A_v.v_i = A.V \quad (34)$$

Donde: A_v : Área de espacios porosos en m^2

v_i : velocidad de infiltración (mm/hr ó cm/hr)

A : Área en m^2

V : Velocidad de flujo (mm/hr, cm/hr ó m/hr)

Despejando la velocidad de infiltración (v_i), tenemos:

$$v_i = \frac{AV}{A_v} \quad (35)$$

Si se considera una dimensión unitaria normal a un plano de referencia y se recurre a la definición de la relación de espacios porosos, se tiene:

$$e = \frac{A_v}{A - A_v} \quad (36)$$

Donde: e : coeficiente de porosidad

A : área en m^2

A_v : Área de espacios porosos en m^2

Con las fórmulas desarrolladas hasta ahora, no se puede calcular la velocidad de infiltración, la cual sólo se da en el área de espacios porosos, pues es necesario tener el valor del coeficiente de porosidad, por lo que se realiza un despeje de la fórmula 36.

$$\frac{1}{e} = \frac{A - A_v}{A_v}; \quad \frac{1}{e} = \frac{A}{A_v} - 1; \quad \frac{A}{A_v} = \frac{1}{e} + 1;$$

y tenemos
$$\frac{A}{A_v} = \frac{1+e}{e} \quad (37)$$

De acuerdo a lo anterior, la relación entre v_i y V se deduce de acuerdo a las ecuaciones 35 y 37:

$$v_i = \frac{1+e}{e} V \quad (38)$$

Rigurosamente, la velocidad de infiltración v_i no es una velocidad real, puesto que el flujo en el suelo es a través de la conexión de conductos irregulares entre las partículas del estrato. Por lo tanto la velocidad de descarga y la de infiltración son sólo variables de cálculo que permiten llegar a resultados concretos.

Una vez obtenidas las fórmulas a emplearse en el cálculo de la infiltración, se realizó el desarrollo para cada uno de los tipos de uso del suelo.

7.3.4. Evapotranspiración Real.

Ortiz (1984) menciona que la evapotranspiración potencial (ETP) es determinada como 0.8 por la Evaporación pues se considera que la ETP es reducida en un 20% por la evaporación del lugar.

La fórmula de Thornthwaite modificada por Llorente en 1961, es la más apropiada para determinar la ETP, a comparación de la fórmula de Turc que propone Custodio (1983) y para el cálculo de la ETR se aplicó el método Blaney-Criddle.

Se obtuvieron datos de precipitación y temperatura mensual de la estación meteorológica Tlaxco (Clave:29032 de la CNA), con datos de 1997 a 2001, los cuales se utilizaron en el cálculo de la ETP y ETR utilizando la formula y método antes mencionados que fueron adaptados para las condiciones de México, contemplando las siguientes variables:

- ✓ Precipitación media mensual (mm)
- ✓ Temperatura media mensual (°C)
- ✓ Tipo de vegetación (bosque, pastizal y agricultura)
- ✓ Tipo de suelo.
- ✓ Latitud.
- ✓ Propiedades físicas del suelo tales como: Textura, estructura y profundidad.
- ✓ Porcentaje de horas de sol por mes.

Para el cálculo del Coeficiente Ponderado de Evapotranspiración Real, se dividió el valor de la ETR, entre la ETP.

7.3.5. Escurrimiento superficial

Representa la suma de los gastos de agua de las corrientes superficiales, captadas por los cauces de arroyos y ríos. La escorrentia está en función de la intensidad y duración de la lluvia, del tipo de vegetación y propiedades físicas del suelo (Sánchez, 1987).

Este componente del Balance Hídrico se obtuvo con el Método de Curvas Numéricas establecido por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, y adoptado

recientemente por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el 2004; es un método sencillo de aplicarse para mediciones de escorrentia.

Las variables que usa el método para obtener valores de escurrimiento medio son: la textura, cobertura total, condición hidrológica del suelo y omite la pendiente.

Para la obtención del cálculo del Coeficiente Ponderado de Escurrimiento a través del Método de Curvas Numéricas del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos se usaron variables tales como:

- ✓ Precipitación (Número de eventos en determinado tiempo).
- ✓ Tipo de vegetación (bosque, pastizal y agricultura).
- ✓ Tipo de suelo (textura y estructura).
- ✓ Cobertura (%)

7.3.6. Recarga Subterránea

Quizá ésta es la más difícil de estimar junto con la infiltración, pues están íntimamente relacionadas, ya que una porción del agua infiltrada termina formando parte de los mantos freáticos, volviéndose agua disponible para el consumo de las actividades humanas, la cual se obtiene a través de la perforación de pozos.

Conociendo la cantidad de agua extraída en un periodo anual, este valor se toma como valor del agua que esta disponible en el acuífero y se considera como la cantidad de recurso hídrico disponible para recarga subterránea siempre y cuando el nivel estático y dinámico se mantenga o inclusive este último se eleve.

La estimación de la recarga subterránea generalmente se estima por la diferencia de todos los componentes del Balance Hídrico como se presenta a continuación:

$$Rs = P - (Int + Ev + E) \quad (39)$$

La precipitación, vegetación (densidad de cobertura), geología, extracción de agua a través de pozos y las prácticas de manejo realizadas son variables que se tomarán en cuenta para estimar la recarga subterránea.

7.4. Valoración Económica-Ecológica de Servicios Hidrográficos

La valoración económica – ecológica de servicios ambientales hidrográficos, responde a la necesidad de mantener ecosistemas de valor hídrico para la provisión del recurso en cantidad y calidad.

Para la valoración del agua como servicio ambiental ofrecido por los bosques se tomó en cuenta el valor de la productividad de los bosques en función de la captación (valor de uso directo) de agua, además de otros servicios ambientales (captación de CO₂, belleza escénica, biodiversidad y ecoturismo o recreación). El aumento de la cobertura boscosa implica un **costo de sustitución** (costo de oportunidad), *por la renuncia a los ingresos potenciales que generaría otra actividad económica en esas tierras (aprovechamiento maderable m³/ha, no maderable: extracción de musgo y heno, agricultura de temporal)*. Esto implica la compensación a los dueños de las tierras con un monto igual o superior a su costo de oportunidad para que dedique sus tierras a la protección y conservación de cuencas (Barrantes y Vega, 2002).

Se estimó el valor económico de los servicios hidrográficos por el método de valoración contingente, técnica que se basó en preguntas directas a los consumidores (a través de una encuesta) para determinar su disposición a pagar (DAP) por obtener un bien ambiental.

Las encuestas fueron dirigidas aleatoriamente para obtener variabilidad en las respuestas, y de ésta manera la información obtenida fuera lo más precisa posible y evitar sesgos.

7.4.1. Cuantificación y cálculo del recurso hídrico

El cálculo de las entradas y salidas de agua fue determinado para obtener el Balance Hídrico de la microcuenca. Como primer paso obtener una valoración económica – ecológica de los servicios hidrográficos, mediante la internalización del valor del servicio hídrico como insumo de producción en las diferentes actividades socioeconómicas del lugar tales como: consumo doméstico, comercio (hoteles, restaurantes, florerías, carnicerías, panaderías, cremerías, etc.) e industria textil, la agricultura no se considero ya que ésta es de temporal.

7.4.1.1. Cuantificación y cálculo de la oferta hídrica

El recurso hídrico disponible para diversos usos de las actividades humanas, está determinado por la cantidad de agua precipitada dentro de la microcuenca, aunque no toda el agua puede ser aprovechada, debido a que es distribuida al momento de ser retenida en el dosel vegetal por efecto de la intercepción, evaporación-transpiración y escurrimiento superficial, dando como resultado un balance hidrológico local.

El cálculo de la oferta hídrica se determina con el agua precipitada anualmente, menos aquella que se intercepta en la vegetación, evapotranspira y escurre superficialmente. El valor del activo hídrico disponible, para ser aprovechado se estimó como se describe a continuación:

$$Ahd = P - (Int + ETR + Es + As) \quad (40)$$

Donde:

Ahd: Activo hídrico disponible $m^3/año$

P: Precipitación total en la microcuenca $m^3/año$

Int: Intercepción por la cobertura vegetal $m^3/año$

ETR: Evapotranspiración Real $m^3/año$

Es: Escurrimiento superficial $m^3/año$

As: Agua suspendida o agua higroscópica

7.4.1.2. Cuantificación y cálculo de la demanda hídrica

La cantidad de agua demanda está en función del crecimiento de la población, así como de las actividades económicas y humanas que usan el recurso como un insumo de producción. En la cuenca del río Zahuapan la demanda está en función del volumen disponible para consumo doméstico, el comercio e industria y el caudal ecológico.

El cálculo de la demanda es determinado por el volumen utilizado anualmente por los usuarios en las diferentes actividades económicas, en el caso de Tlaxco la industria, comercio y uso doméstico. Por lo que la demanda se estimó de la siguiente manera.

$$Dh = Vic + Va + Vd \quad (41)$$

Donde,

Dh : Demanda del recurso hídrico ($m^3/año$).

Vic : Volumen usado en la industria y el comercio ($m^3/año$).

Va : Volumen usado en la agricultura ($m^3/año$).

Vd : Volumen en el uso doméstico ($m^3/año$).

7.5. Políticas públicas y normatividad ambiental

Tomando a la Ley Forestal de Desarrollo Forestal Sustentable y su Reglamento como máximo instrumento regulatorio relacionado al sector forestal y preservación de los recursos naturales, se indican aquellos Capítulos y Títulos contenidos en la misma que establecen lineamientos específicos en la conservación y protección de los recursos forestales para el área de estudio. Así como la interacción con la NOM-011-CNA-2000 y la Ley de Aguas Nacionales en términos del cuidado, manejo y aprovechamiento del recurso agua en el país.

Se ubicaron los programas que emplea la CONAFOR, donde ofrece apoyos para la ejecución de proyectos en relación con el desarrollo forestal, en los cuales el área de estudio puede incluirse por las características que presenta:

Se analizaron las reglas de operación de los programas, en las cuales están los lineamientos mínimos requeridos para participar en la asignación de recursos, donde los montos y cantidades de apoyos financieros están definidos con base a parámetros establecidos por la Comisión.

7.6. Integración de Mercados de Agua y Establecimiento de Tarifas

Se describieron los posibles escenarios en los cuales se podría establecer o incorporar el recurso hídrico a un sistema de mercado, que conlleve a un establecimiento de tarifas acorde a la cantidad de agua consumida por los usuarios.

La integración de mercados para el agua, se analizó como una alternativa para disminuir el agotamiento del recurso, maximizar el uso eficiente y alcanzar la equidad social en el suministro y pago del vital líquido.

8. RESULTADOS

En este apartado se presenta la información obtenida del desarrollo de la investigación en la microcuenca del río Zahuapan, como fuente generadora de bienes y servicios ambientales para la comunidad de Tlaxco, siendo ésta dependiente del buen manejo de los recursos presentes en la microcuenca.

8.1. Caracterización cartográfica y delimitación del área de estudio

A partir del uso de material cartográfico como ortofotos digitales E14b23 (b, c, e y f), cartas topográfica, edafológica y geológica (E14b23), y el uso de Software en Sistemas de Información Geográfica (SIG), como AutoCad Map 2004 y Arc View 3.2, se caracterizó la zona de estudio (ver anexos cartográficos), ubicando las principales características a tomar en cuenta: la delimitación de la microcuenca a través de los parteaguas, rodalización o unidades de clasificación de uso del suelo, poblaciones, caminos y corrientes de agua, obteniendo información como: área de la cuenca y de cada rodal, unidades geológicas, edafológicas, red hidrológica, tipo de vegetación (por especie), porcentaje de cobertura, pendiente y uso del suelo.

8.2. Medición de variables morfométricas de la microcuenca

Se derivaron del desarrollo de las fórmulas establecidas para calcular cada uno de los parámetros que se consideran en la morfometría comparativa de una microcuenca. Es una serie de cálculos que fueron realizados, omitiendo su desarrollo y presentando únicamente los resultados obtenidos.

El Cuadro 12 presenta los parámetros de la morfometría, con su respectivo valor obtenido para la microcuenca del río Zahuapan.

Parámetro	Índice o valor
Área de la cuenca	2,223.5 ha ó 22.23 Km.
Perímetro	23.5 Km.
Longitud del cauce principal	9.525 Km.
Densidad de corrientes	0.0116
Densidad de drenaje	1.27
Pendiente del cauce principal	8.3 %
Factor de forma	0.276
Índice de forma	0.2512
Relación de elongación	0.7698
Relación de forma	0.5387
Índice de compacidad	1.4
Pendiente ponderada de la cuenca	31.89 %
Altura media de la cuenca	2,996.29 m.

Los datos obtenidos indican que la microcuenca presenta una forma oval-oblonga por lo que la concentración de los escurrimientos será muy rápida debido a la pendiente ponderada y a la pequeña superficie que presenta, por lo tanto en una precipitación intensa y de corta duración provocará un incremento considerable en los afluentes, lo cual en ocasiones provoca problemas de inundaciones en la población de Tlaxco que se encuentra en la parte baja, debido a las altas concentraciones de agua en un corto periodo de tiempo.

8.3. Balance Hídrico

Derivado de la obtención de cada uno sus componentes, este es la base de la distribución del recurso hídrico en la microcuenca, y a partir del cual se puede tomar decisiones para el manejo de los recursos naturales, tomando como punto de partida el activo hídrico disponible.

$$BH = P - (Int + Ev + E + Inf + Rs) \quad (42)$$

A continuación se presenta la forma en que se obtuvo cada uno de los componentes del balance hídrico.

8.3.1. Precipitación

El más importante de los componentes pues de aquí se deriva el balance hídrico, la precipitación representa la máxima entrada de agua a la microcuenca, distribuyéndose en cada uno de los componentes del balance hídrico al hacer contacto con el estrato vegetal, suelo y cuerpos de agua.

La precipitación media anual en la zona de influencia de la microcuenca, de acuerdo a los datos obtenidos fue de 668.5 mm (Cuadro 13), con un promedio de 95 días efectivos de precipitación en todo el año, registrándose la estación de lluvias entre los meses de mayo a septiembre con un promedio de 75 días efectivos de lluvia. La presencia de eventos extremos no es frecuente, pero ocurren, tal es el caso de una lluvia de 88 mm el día 5 de octubre de 1999, lo cual originó inundaciones. Suelen presentarse más periódicamente eventos que van de 35 a 55 mm, cada año.

Cuadro 13. Precipitación media anual en la microcuenca del río Zahuapan.

Meses	Precipitación media (mm)
Enero	9.6
Febrero	10.7
Marzo	14.5
Abril	36.7
Mayo	70.9
Junio	127.5
Julio	118.4
Agosto	112.8
Septiembre	104.8
Octubre	43.7
Noviembre	12.9
Diciembre	6.0
Precip. media anual	668.5

Fuente: Normales Climatológicas

Se calculó la cantidad de agua precipitada por rodal, multiplicando el área de cada rodal en m², por la precipitación media anual en metros (0.6685 m), lo cual dio como resultado la cantidad de lluvia precipitada por rodal en metros cúbicos (Cuadro 14).

Cuadro 14. Precipitación por rodal en m³

No. de Rodal	Area_m ²	Tipo de Vegetación	Precipitación media anual (m)	Precipitación por rodal (m ³)
1	49,200	Bosque de Pino	0.6685	32,890.20
2	677,800	Bosque de Pino-encino	0.6685	453,109.30
3	162,300	Bosque de Pino	0.6685	108,497.55
4	69,600	Agricultura (Maíz)	0.6685	46,527.60
5	439,800	Bosque de Pino-encino	0.6685	294,006.30
6	1,069,400	Bosque de Pino-encino	0.6685	714,893.90
7	45,300	Agricultura (avena)	0.6685	30,283.05
8	659,600	Bosque de Pino	0.6685	440,942.60
9	31,100	Agricultura (avena)	0.6685	20,790.35
10	1,364,400	Bosque de Pino	0.6685	912,101.40
11	17,800	Agricultura (avena)	0.6685	11,899.30
12	39,900	Agricultura (avena)	0.6685	26,673.15
13	1,904,300	Bosque de Pino-oyamel	0.6685	1,273,024.55
14	68,300	Pastizal	0.6685	45,658.55
15	365,900	Agricultura (cebada)	0.6685	244,604.15
16	1,881,300	Bosque de Oyamel-pino	0.6685	1,257,649.05
17	163,400	Bosque de Oyamel	0.6685	109,232.90
18	9,500	Agricultura (cebada)	0.6685	6,350.75
19	178,300	Bosque de Oyamel-pino	0.6685	119,193.55
20	93,200	Bosque de Oyamel-pino	0.6685	62,304.20
21	126,900	Bosque de Pino	0.6685	84,832.65
22	121,200	Bosque de Oyamel-pino	0.6685	81,022.20
23	12,400	Pastizal	0.6685	8,289.40
24	64,600	Pastizal	0.6685	43,185.10
25	75,700	Bosque de Oyamel-pastizal	0.6685	50,605.45
26	176,200	Pastizal	0.6685	117,789.70
27	203,700	Agricultura (cebada)	0.6685	136,173.45
28	844,400	Bosque de Oyamel-pino	0.6685	564,481.40
29	261,200	Agricultura (cebada)	0.6685	174,612.20
30	71,200	Agricultura (maíz)	0.6685	47,597.20
31	189,800	Bosque de Pino	0.6685	126,881.30
32	338,400	Bosque de Pino	0.6685	226,220.40
33	521,300	Bosque de Pino	0.6685	348,489.05
34	112,200	Bosque de Pino	0.6685	75,005.70
35	355,500	Bosque de Pino	0.6685	237,651.75
36	119,800	Bosque de Pino	0.6685	80,086.30

Continuación Cuadro 14.

37	793.900	Pastizal	0.6685	530.722.15
38	487.100	Bosque de Pino	0.6685	325.626.35
39	558.600	Bosque de Pino-encino	0.6685	373.424.10
40	42.100	Agricultura (maíz)	0.6685	28.143.85
41	10.500	Agricultura (cebada)	0.6685	7.019.25
42	855.300	Bosque de Pino-encino	0.6685	571.768.05
43	1.015.100	Agricultura (cebada)	0.6685	678.594.35
44	463.700	Bosque de Pino-encino	0.6685	309.983.45
45	644.900	Agricultura (cebada)	0.6685	431.115.65
46	459.100	Agricultura (maíz)	0.6685	306.908.35
47	161.500	Bosque de Pino	0.6685	107.962.75
48	389.900	Bosque de Encino-pino	0.6685	260.648.15
49	608.000	Bosque de Pino-encino	0.6685	406.448.00
50	111.700	Bosque de Pino-encino	0.6685	74.671.45
51	582.900	Pastizal	0.6685	389.668.65
52	253.100	Pastizal	0.6685	169.197.35
53	325.300	Bosque de Pino-encino	0.6685	217.463.05
54	292.700	Área degradada	0.6685	195.669.95
55	287.700	Agricultura (Maíz)	0.6685	192.327.45
56	344.800	Agricultura (Maíz)	0.6685	230.498.80
57	662.600	Área degradada	0.6685	442.948.10
	22,235,000			14,864,364.9

8.3.2. Intercepción de la precipitación

La intercepción de la lluvia tiene una amplia relación con la cobertura vegetal, en el caso de los bosques bajo manejo tiene que ver con el tipo de tratamiento silvícola y la intensidad de corta. En el caso de la microcuenca del río Zahuapan, los bosques se encuentran bajo manejo con el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM), con intensidades de corta del 35% en promedio, información obtenida de los programas de manejo que actualmente están siendo ejecutados por la Consultoría de Servicios Técnicos Forestales “Tlaxco”.

El porcentaje de la cobertura en cultivos en la microcuenca, al momento de estar establecido el cultivo se consideró de 80 y 90%, por lo que al llegarse la temporada de lluvias, influye significativamente en la disminución del escurrimiento superficial y el arrastre de sedimentos.

El Cuadro 15 muestra la obtención de la lluvia interceptada por rodal en m^3 , se multiplicó la precipitación por rodal en m^3 (columna 3), por el porcentaje de cobertura (columna 4) y por el coeficiente de intercepción (columna 5).

Cuadro 15. Intercepción por rodal en m^3

No. rodal	Tipo de Vegetación	Precipitación por rodal (m^3)	Cobertura (%)	Coeficiente intercepción (%)	Intercepción por rodal ($m^3/año$)
1	Bosque de Pino	32,890.20	95	19.2	5,999.17
2	Bosque de Pino-encino	453,109.30	85	16.4	63,163.44
3	Bosque de Pino	108,497.55	70	19.2	14,582.07
4	Agricultura (Maiz)	46,527.60	80	11	4,094.43
5	Bosque de Pino-encino	294,006.30	95	16.4	45,806.18
6	Bosque de Pino-encino	714,893.90	80	16.4	93,794.08
7	Agricultura (avena)	30,283.05	90	5	1,362.74
8	Bosque de Pino	440,942.60	80	19.2	67,728.78
9	Agricultura (avena)	20,790.35	90	5	935.57
10	Bosque de Pino	912,101.40	95	19.2	166,367.30
11	Agricultura (avena)	11,899.30	90	5	535.47
12	Agricultura (avena)	26,673.15	90	5	1,200.29
13	Bosque de Pino-oyamel	1,273,024.55	85	21	227,234.88
14	Pastizal	45,658.55	10	9.7	442.89
15	Agricultura (cebada)	244,604.15	80	5	9,784.17
16	Bosque de Oyamel-pino	1,257,649.05	90	22	249,014.51
17	Bosque de Oyamel	109,232.90	95	23	23,867.39
18	Agricultura (cebada)	6,350.75	90	5	285.78
19	Bosque de Oyamel-pino	119,193.55	65	22	17,044.68
20	Bosque de Oyamel-pino	62,304.20	95	22	13,021.58
21	Bosque de Pino	84,832.65	25	19.2	4071.97
22	Bosque de Oyamel-pino	81,022.20	90	22	16,042.40
23	Pastizal	8,289.40	80	9.7	643.26
24	Pastizal	43,185.10	80	9.7	3,351.16
25	Bosque de Oyamel-pastizal	50,605.45	40	22	4,453.28
26	Pastizal	117,789.70	40	9.7	4,570.24
27	Agricultura (cebada)	136,173.45	90	5	6,127.81
28	Bosque de Oyamel-pino	564,481.40	90	22	111,767.32
29	Agricultura (cebada)	174,612.20	90	5	7,857.55
30	Agricultura (maíz)	47,597.20	80	11	4,188.55
31	Bosque de Pino	126,881.30	30	19.2	7,308.36
32	Bosque de Pino	226,220.40	75	19.2	32,575.74
33	Bosque de Pino	348,489.05	85	19.2	56,873.41
34	Bosque de Pino	75,005.70	50	19.2	7,200.55
35	Bosque de Pino	237,651.75	75	19.2	34,221.85
36	Bosque de Pino	80,086.30	50	19.2	7,688.28
37	Pastizal	530,722.15	40	9.7	20,592.02
38	Bosque de Pino	325,626.35	40	19.2	25,008.10
39	Bosque de Pino-encino	373,424.10	70	16.4	42,869.09

Continuación Cuadro 15.

40	Agricultura (maíz)	28,143.85	80	11	2,476.66
41	Agricultura (cebada)	7,019.25	90	5	315.87
42	Bosque de Pino-encino	571,768.05	90	16.4	84,392.96
43	Agricultura (cebada)	678,594.35	90	5	30,536.75
44	Bosque de Pino-encino	309,983.45	75	16.4	38,127.96
45	Agricultura (cebada)	431,115.65	90	5	19,400.20
46	Agricultura (maíz)	306,908.35	80	11	27,007.93
47	Bosque de Pino	107,962.75	50	19.2	10,364.42
48	Bosque de Encino-pino	260,648.15	70	16	29,192.59
49	Bosque de Pino-encino	406,448.00	95	16.4	63,324.60
50	Bosque de Pino-encino	74,671.45	60	16.4	7,347.67
51	Pastizal	389,668.65	60	9.7	22,678.72
52	Pastizal	169,197.35	40	9.7	6,564.86
53	Bosque de Pino-encino	217,463.05	70	16.4	24,964.76
54	Área degradada	195,669.95	15	2	587.01
55	Agricultura (Maíz)	192,327.45	80	11	16,924.82
56	Agricultura (Maíz)	230,498.80	80	11	20,283.89
57	Área degradada	442,948.10	5	2	442.95
		1,486,4364.9			1,808,610.95

8.3.5. Infiltración

Es el componente más complejo de todos, pero quizá el más importante desde el punto de vista social, debido a que los seres humanos dependen estrechamente del vital y preciado líquido (agua), para sus actividades y desarrollo económico diario.

La infiltración se determinó de ecuaciones generadas a partir de las fórmulas ya establecidas y conocidas, como es el caso de la ley de Darcy y la fórmula de Green-Ampt, las cuales consideran ciertas características de las propiedades físicas del suelo, tales como la profundidad, textura y porosidad. Se adoptó el principio de las fórmulas antes mencionadas para determinar la infiltración en la microcuenca del Río Zahuapan, tomando en cuenta el tipo de uso del suelo, para saber como influye en el proceso de infiltración; su desarrollo y cálculo se presenta a continuación:

Bosque.

Suelo de textura media (franco)

Velocidad de descarga: $V = k \cdot i$

$k = 3.4 \text{ mm/hr}$ (valor obtenido de tabla 3 de anexos)

$i = 0.45$

$$V = (3.4 \text{ mm/hr}) (0.45) = \mathbf{1.53 \text{ mm/hr}}$$

Velocidad de infiltración: $v_i = \frac{1+e}{e} I$

$e = 0.434$ -se obtiene de la tabla 3 de anexos

Sustituyendo valores en la fórmula, se tiene:

$$v_i = \frac{1+0.434}{0.434} (1.53 \text{ mm/hr}) = \frac{1.434}{0.434} (1.53 \text{ mm/hr}) = \frac{2.19402}{0.434} = 5.05 \text{ mm/hr}$$

Calculada la velocidad de infiltración, se debe conocer el área de espacios porosos, lo que sería el área efectiva por la cual fluye el agua, ésta se obtiene de despejar la fórmula 26, señalando que para el presente estudio se tomó como base 1 ha. (10,000m²) y se tiene:

$$\text{Área de espacios porosos: } A_p = \frac{AI}{v_i}$$

Sustituyendo valores:

$$A_p = \frac{(10,000 \text{ m}^2)(0.00153 \text{ m/hr})}{0.00505 \text{ m/hr}} = \frac{15.3 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.00505 \text{ m/hr}} = 3,029.7 \text{ m}^2$$

El valor obtenido es el área efectiva de espacios porosos en 1 ha. por la cual fluye el agua.

Finalmente se obtiene el gasto ó volumen infiltrado, en este caso para 1 ha. y posteriormente puede extrapolarse el valor por el número total de hectáreas con su respectiva área de espacios porosos.

$$Q = A_p \cdot V$$

$$Q = (3,029.7 \text{ m}^2) (0.00153 \text{ m/hr}) = \mathbf{4.63 \text{ m}^3/\text{hr/ha}}$$

Agricultura.

Suelo de textura media (franco)

Velocidad de descarga: $V = k.i$

$k = 3.4 \text{ mm/hr}$ (valor obtenido de tabla 3 de anexos)

$i = 0.1$

$$V = (3.4 \text{ mm/hr}) (0.1) = 0.34 \text{ mm/hr}$$

Velocidad de infiltración: $v_i = \frac{1+e}{e} V$

$e = 0.434$ -se obtiene de la tabla 3 de anexos

Sustituyendo valores en la fórmula, se tiene:

$$v_i = \frac{1+0.434}{0.434} (0.34 \text{ mm/hr}) = \frac{1.434}{0.434} (0.34 \text{ mm/hr}) = \frac{0.48756}{0.434} = 1.12 \text{ mm/hr}$$

Cálculo del área de espacios porosos:

$$\text{Área de espacios porosos: } A_p = \frac{AV}{v_i}$$

Sustituyendo valores:

$$A_p = \frac{(10,000 \text{ m}^2)(0.00034 \text{ m/hr})}{0.00112 \text{ m/hr}} = \frac{3.4 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.00112 \text{ m/hr}} = 3,035.7 \text{ m}^2$$

Cálculo del gasto ó volumen infiltrado en el área de espacios porosos:

$$Q = A_p V$$

$$Q = (3,035.7 \text{ m}^2) (0.00034 \text{ m/hr}) = 1.032 \text{ m}^3/\text{hr/ha}$$

Pastizales densos.

Suelo de textura media (franco)

Velocidad de descarga: $V = k.i$

$k = 3.4 \text{ mm/hr}$ (valor obtenido de tabla 3 de anexos)

$i = 0.30$

$$V = (3.4 \text{ mm/hr}) (0.30) = \mathbf{1.02 \text{ mm/hr}}$$

Velocidad de infiltración: $v_i = \frac{1+e}{e} I$

$e = 0.434$ -se obtiene de la tabla 3 de anexos

Sustituyendo valores en la fórmula, se tiene:

$$v_i = \frac{1+0.434}{0.434} (1.02 \text{ mm/hr}) = \frac{1.434}{0.434} (1.02 \text{ mm/hr}) = \frac{1.46268}{0.434} = 3.37 \text{ mm/hr}$$

Cálculo del área de espacios porosos:

$$\text{Área de espacios porosos: } A_p = \frac{A I}{v_i}$$

Sustituyendo valores:

$$A_p = \frac{(10,000 \text{ m}^2)(0.00102 \text{ m/hr})}{0.00337 \text{ m/hr}} = \frac{10.2 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.00337 \text{ m/hr}} = 3,026.7 \text{ m}^2$$

Cálculo del gasto ó volumen infiltrado en el área de espacios porosos:

$$Q = A_p \cdot V$$

$$Q = (3,026.7 \text{ m}^2) (0.00102 \text{ m/hr}) = \mathbf{3.08 \text{ m}^3/\text{hr/ha}}$$

Áreas degradadas.

Se consideró como de textura fina (arcilloso), y con un coeficiente de permeabilidad bajo, pues el fenómeno de infiltración es casi nulo, debido a que es en estas condiciones predomina un tepetate impermeable, pero se tomó en cuenta la presencia de grietas por las cuales puede infiltrarse cierta cantidad de agua.

$$\text{Velocidad de descarga: } V = k \cdot i$$

$k = \mathbf{0.5 \text{ mm/hr}}$ (valor obtenido de tabla 3 de anexos)

$$i = \mathbf{0.1}$$

$$V = (0.5 \text{ mm/hr}) (0.1) = \mathbf{0.05 \text{ mm/hr}}$$

Velocidad de infiltración: $v_i = \frac{1+e}{e} I$

$e = 0.423$ se obtiene de la tabla 3 de anexos

Sustituyendo valores en la fórmula, se tiene:

$$v_i = \frac{1+0.423}{0.423} (0.05 \text{ mm/hr}) = \frac{1.423}{0.423} (0.05 \text{ mm/hr}) = \frac{0.07115}{0.423} = 0.168 \text{ mm/hr}$$

Cálculo del área de espacios porosos:

$$\text{Área de espacios porosos: } A_p = \frac{AV}{v_i}$$

Sustituyendo valores:

$$A_p = \frac{(10,000 \text{ m}^2)(0.00005 \text{ m/hr})}{0.000168 \text{ m/hr}} = \frac{0.5 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.000168 \text{ m/hr}} = 2,976.1 \text{ m}^2$$

Cálculo del gasto ó volumen infiltrado en el área de espacios porosos:

$$Q = A_p \cdot V$$

$$Q = (2,976.1 \text{ m}^2) (0.00005 \text{ m/hr}) = 0.15 \text{ m}^3/\text{hr/ha}$$

Obtenidos los valores de volumen infiltrado en el área de espacios porosos en cada uno de los diferentes tipos de uso del suelo, se estima la cantidad de agua infiltrada en toda la superficie que cada uno de estos ocupa.

A continuación se presenta en el Cuadro 16 un resumen de los valores utilizados de cada uno de los parámetros empleados en la determinación de la infiltración.

Cuadro 16. Resumen de valores de los parámetros empleados para el cálculo de la infiltración

Tipo de uso del suelo	Conductividad hidráulica (K) en mm/hr	Gradiente Hidráulico (i)	Velocidad de descarga $V=K*i$ (mm/hr)	Porosidad efectiva (e)	Vel. de infiltración (mm/hr)	Área (m ²) de espacios porosos en 1 ha	Volumen infiltrado m ³ /hr/ha
Bosque	3.4	0.45	1.53	0.434	5.05	3029.7	4.63
Agricultura	3.4	0.1	0.34	0.434	1.12	3035.7	1.032
Pastizales densos	3.4	0.30	1.02	0.434	3.37	3026.7	3.08
Áreas degradadas	0.5	0.1	0.05	0.423	0.168	2976.1	0.15

Fuente: Elaboración propia

Como la infiltración en las primeras capas del suelo no puede presentarse todo el año, se definió un periodo de infiltración tomando en cuenta sólo los meses del periodo de lluvias (mayo-septiembre), así como el número de días con precipitación efectiva en dicho lapso de tiempo, obteniendo un promedio de estos lo que representó **75 días**, debido a que la precipitación no se presenta a diario o cuando se presenta no siempre alcanza una intensidad que origine el fenómeno de infiltración.

Se consideró un tiempo efectivo de infiltración de **6 horas** ya que no puede presentarse las 24 hr del día, después de cada evento, tomando en cuenta que ésta no se inicia en los primeros minutos de la precipitación.

En el Cuadro 17, se presenta como estimar el cálculo del volumen infiltrado (considerado para el periodo de lluvias únicamente), se multiplica el volumen infiltrado en el área de vacíos (columna 2), por el tiempo efectivo de infiltración (columna 3), el resultado se multiplica por los días de precipitación efectiva (columna 4) y finalmente se multiplica por el área total de vacíos (columna 7), dando como resultado el volumen infiltrado en metros cúbicos para cada uso del suelo.

Cuadro 17. Estimación del volumen infiltrado en m³ por tipo de uso del suelo

Uso del suelo	Vol. Infiltrado en los espacios porosos (m ³ /hr/ha)	Tiempo efectivo de infiltración (hr/día)	Pp. efectiva en días	Superficie por tipo de uso de suelo (has)	Area de espacios porosos en 1 ha.	Area total de espacios porosos (has)	Vol. Infiltrado anualmente (m ³)
Bosque	4.63	6	75	1,540.8	0.30297	466.82	972,619.5
Agricultura	1.032	6	75	392.0	0.30357	119.00	55,263.6
Pastizales densos	3.08	6	75	195.20	0.30267	59.10	81,912.6
Áreas degradadas	0.15	6	75	95.55	0.29761	28.50	1,923.75
				2223.5		673.30	1,111,719.45

Fuente: Elaboración propia

El agua infiltrada representa el 7.5% del total de la precipitación (Cuadro 18), aunque no toda está disponible para ser aprovechada ya que un porcentaje queda retenida en el suelo, y no llega al acuífero.

Cuadro 18. Infiltración por rodal en m³

No. Rodal	Tipo de Vegetación	Área ha	Área de espacios porosos en 1 ha	Vol. Inf. en el área de vacíos m ³ /hr/ha	Tiempo efectivo de inf. (hr/día)	Días efectivos de lluvia	Infiltración por rodal (m ³)
1	Bosque de Pino	4.92	0.30297	4.63	6	75	3105.69
2	Bosque de Pino-encino	67.78	0.30297	4.63	6	75	42785.31
3	Bosque de Pino	16.23	0.30297	4.63	6	75	10244.99
4	Agricultura (Maíz)	6.96	0.30357	1.032	6	75	981.21
5	Bosque de Pino-encino	43.98	0.30297	4.63	6	75	27761.85
6	Bosque de Pino-encino	106.94	0.30297	4.63	6	75	67504.59
7	Agricultura (avena)	4.53	0.30357	1.032	6	75	638.63
8	Bosque de Pino	65.96	0.30297	4.63	6	75	41636.46
9	Agricultura (avena)	3.11	0.30357	1.032	6	75	438.44
10	Bosque de Pino	136.44	0.30297	4.63	6	75	86126.11
11	Agricultura (avena)	1.78	0.30357	1.032	6	75	250.94
12	Agricultura (avena)	3.99	0.30357	1.032	6	75	562.50
13	Bosque de Pino-oyamel	190.43	0.30297	4.63	6	75	120206.65
14	Pastizal	6.83	0.30267	3.08	6	75	2865.19
15	Agricultura (cebada)	36.59	0.30357	1.032	6	75	5158.38
16	Bosque de Oyamel-pino	188.13	0.30297	4.63	6	75	118754.80
17	Bosque de Oyamel	16.34	0.30297	4.63	6	75	10314.43
18	Agricultura (cebada)	0.95	0.30357	1.032	6	75	133.93
19	Bosque de Oyamel-pino	17.83	0.30297	4.63	6	75	11254.97

Continuación Cuadro 18.

20	Bosque de Oyamel-pino	9.32	0.30297	4.63	6	75	5883.14
21	Bosque de Pino	12.69	0.30297	4.63	6	75	8010.41
22	Bosque de Oyamel-pino	12.12	0.30297	4.63	6	75	7650.60
23	Pastizal	1.24	0.30267	3.08	6	75	520.18
24	Pastizal	6.46	0.30267	3.08	6	75	2709.97
25	Bosque de Oyamel-pastizal	7.57	0.30297	4.63	6	75	4778.47
26	Pastizal	17.62	0.30267	3.08	6	75	7391.60
27	Agricultura (cebada)	20.37	0.30357	1.032	6	75	2871.72
28	Bosque de Oyamel-pino	84.44	0.30297	4.63	6	75	53301.74
29	Agricultura (cebada)	26.12	0.30357	1.032	6	75	3682.34
30	Agricultura (maíz)	7.12	0.30357	1.032	6	75	1003.76
31	Bosque de Pino	18.98	0.30297	4.63	6	75	11980.90
32	Bosque de Pino	33.84	0.30297	4.63	6	75	21361.09
33	Bosque de Pino	52.13	0.30297	4.63	6	75	32906.44
34	Bosque de Pino	11.22	0.30297	4.63	6	75	7082.49
35	Bosque de Pino	35.55	0.30297	4.63	6	75	22440.51
36	Bosque de Pino	11.98	0.30297	4.63	6	75	7562.23
37	Pastizal	79.39	0.30267	3.08	6	75	33304.15
38	Bosque de Pino	48.71	0.30297	4.63	6	75	30747.60
39	Bosque de Pino-encino	55.86	0.30297	4.63	6	75	35260.95
40	Agricultura (maíz)	4.21	0.30357	1.032	6	75	593.38
41	Agricultura (cebada)	1.05	0.30357	1.032	6	75	147.99
42	Bosque de Pino-encino	85.53	0.30297	4.63	6	75	53989.79
43	Agricultura (cebada)	101.51	0.30357	1.032	6	75	14307.37
44	Bosque de Pino-encino	46.37	0.30297	4.63	6	75	29270.51
45	Agricultura (cebada)	64.49	0.30357	1.032	6	75	9089.57
46	Agricultura (maíz)	45.91	0.30357	1.032	6	75	6470.80
47	Bosque de Pino	16.15	0.30297	4.63	6	75	10194.49
48	Bosque de Encino-pino	38.99	0.30297	4.63	6	75	24611.97
49	Bosque de Pino-encino	60.8	0.30297	4.63	6	75	38379.27
50	Bosque de Pino-encino	11.17	0.30297	4.63	6	75	7050.93
51	Pastizal	58.29	0.30267	3.08	6	75	24452.69
52	Pastizal	25.31	0.30267	3.08	6	75	10617.56
53	Bosque de Pino-encino	32.53	0.30297	4.63	6	75	20534.17
54	Área degradada	29.27	0.29760	0.15	6	75	587.98
55	Agricultura (Maíz)	28.77	0.30357	1.032	6	75	4055.00
56	Agricultura (Maíz)	34.48	0.30357	1.032	6	75	4859.80
57	Área degradada	66.26	0.29760	0.15	6	75	1331.03
		2223.54					1111719.7

8.3.3. Evapotranspiración Real (ETR)

Proceso que representa la mayor pérdida de agua en la microcuenca, por efecto de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, aquí se aplicó la fórmula de Thornthwaite (1948), modificada por Llorente (1969) para obtener la

Evapotranspiración Potencial en la zona, para posteriormente obtener la Evapotranspiración Real aplicando el Método de Blanney-Criddle.

Primero se calculó la Evapotranspiración Potencial (ETP), utilizando el método de Thornthwaite, el cual calcula el uso consuntivo mensual de agua, como una función de las temperaturas medias mensuales a través de la siguiente fórmula:

$$ETP = 1.6 K_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

donde:

ETP = ETP en el mes j , en mm.

T_j = Temperatura media en el mes j , en °C.

a, I = Constantes

K_a = Factor de corrección de la duración del día de acuerdo a la latitud (Cuadro 19).

Cuadro 19. Valores de K_a (factor de corrección), de acuerdo a la latitud y el mes del año.

Latitud grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Fuente: Aparicio (2005).

Las constantes I (índice de eficiencia de temperatura) y a se calculan de la siguiente forma:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

donde:

$$i_j = \text{Índice de calor mensual} \quad i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad j = \text{número de mes.}$$

$$a = (675 \times 10^{-9} I^3) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (179 \times 10^{-4} I) + 0.492$$

Para la obtención de los datos de ETP mensual, utilizamos los datos de temperaturas medias mensuales para sustituirlos en la fórmula de Thornthwaite y obtener los valores de cada uno de los elementos de dicha fórmula.

Con la fórmula de índice de calor mensual obtenemos el valor para cada uno de los meses (columna 3 del cuadro 20), luego sumando los valores obtenemos el índice de calor anual, el cual es utilizado en la fórmula de ETP.

El factor de corrección de acuerdo a la latitud (columna 4 del cuadro 20), se obtiene de datos ya establecidos y los cuales se presentan en el Cuadro 19.

El valor de la constante a se obtiene sustituyendo el valor del índice de calor anual en la fórmula presentada anteriormente, obteniendo lo siguiente:

$$a = (675 \times 10^{-9} (57.1)^3) - (771 \times 10^{-7} (57.1)^2) + (179 \times 10^4 (57.1)) + 0.492 = 1.38837674$$

Después de haber obtenido todos los componentes de la fórmula de ETP, se sustituyen los valores en la fórmula para generar la ETP mensual (columna 5 del Cuadro 21), lo que dió la ETP anual.

Cuadro 20. Estimación de la ETP mensual en la microcuenca de acuerdo al método de Thornthwaite (1948).

Meses	Temperatura Media mensual °C (Tj)	Índice de calor mensual (i)	(Factor de Corrección) Horas luz del mes de acuerdo a la latitud (Ka)	ETP mensual en la microcuenca
E	11.4	3.5	0.95	39.74
F	12.4	4.0	0.9	42.31
M	14.5	5.0	1.03	60.19
A	15.8	5.7	1.05	69.13
M	16.2	5.9	1.13	77.03
J	15.4	5.5	1.11	70.52
J	15.5	5.5	1.14	73.08
A	14.3	4.9	1.11	63.62
S	14.3	4.9	1.02	58.46
O	13.5	4.5	1.00	52.91
N	12.5	4.0	0.93	44.21
D	11.8	3.7	0.91	39.93
Total		57.1		691.1

El cuadro anterior muestra que la ETP estimada de **691.1 mm/año**, volumen mayor a la cantidad de agua precipitada. Sin embargo, este dato representa la demanda evaporativa de la atmósfera, pero el dato que requerimos es finalmente el de la Evapotranspiración real, es decir la que ocurre de acuerdo a las condiciones prevalecientes en cuanto a clima, cobertura, propiedades físicas del suelo y manejo.

Estimación de la ETR. Para el caso de esta investigación, nos interesa conocer la ETR, determinada por el método de Blanney-Criddle, que considera el tipo de vegetación o cobertura presente en la zona, puesto que cada especie tiene diferentes tipos de evapotranspiración a causa de sus diferentes procesos fisiológicos, se requiere que la información se presente de manera más específica.

Para estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se empleó la fórmula:

$$E_t = K_g F$$

Donde:

E_t = evaporación durante el ciclo vegetativo, mm.

F = factor de temperatura y luminosidad.

K_g = coeficiente global de desarrollo (Tabla 1 de anexos).

El coeficiente global de desarrollo K_g varía entre 0.5 y 1.2, los cuales se presentan en el cuadro de coeficientes globales de desarrollo para diversos cultivos. El factor de temperatura y luminosidad F se calculó de la siguiente manera:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i$$

donde n = número de meses que dura el ciclo vegetativo

$$f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

P_i = porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año (ver Tabla 2 de anexos)

T_i = temperatura media del mes i en °C.

Se tomaron los coeficientes globales de desarrollo (K_g), presentados en el Cuadro 21 para los cultivos y tipos de vegetación presentes en la microcuenca, como el maíz, cebada, avena y pastos densos, de los cuales se tomó el valor más bajo del rango, considerando que no se tienen datos de ET para cultivos en la zona y se pretende no sobreestimar valores; en el caso de la erosión y el bosque, fueron inferidos ya que la Tabla 2 de los anexos no los contempla.

Cuadro 21. Coeficientes globales por tipo de vegetación

Cultivo	Coeficiente global de ET	Coeficiente considerado
Maíz	0.75-0.85	0.75
Cebada	0.75-0.85	0.75
Avena	0.75-0.85	0.75
Pastizales densos	0.75	0.75
Erosión	0.05	0.05
Bosque	0.90-0.11	0.90

Fuente: Aparicio (2005)

Una vez establecidos los coeficientes globales para los diferentes tipos de cultivos y vegetación presente en la microcuenca, se calculó el valor de la ETR; para los cultivos sólo se consideró el ciclo vegetativo, a comparación de la erosión, los pastizales y el bosque que fue de todo el año.

Utilizando los valores de temperatura media mensual y el porcentaje de horas sol mensual, se sustituyen en la fórmula para calcular f_t (columna 4 del cuadro 22), y obtener el factor F mensual, que se multiplica por el coeficiente global del cultivo (valores del cuadro 21), dando como resultado los valores de ETR mensuales (columnas 5, 6, 7 y 8 del cuadro 22), los cuales para el caso de la erosión se consideró los meses lluviosos y para la agricultura el ciclo vegetativo del cultivo; y todo el año para los pastizales y el bosque.

Cuadro 22. Estimación de la ETR para cada tipo de uso del suelo de acuerdo al método de Blanney-Criddle

Mes	Temperatura Media mensual °C	Horas sol del mes en % (Pi)	$\bar{n}$	Áreas erosionadas	Agricultura (varios)	Pastizal (densos)	Bosque
E	11.4	7.79	10.4	0.0	0.0	7.8	9.4
F	12.4	7.28	10.1	0.0	0.0	7.6	9.1
M	14.5	8.41	12.5	0.0	0.0	9.3	11.2
A	15.8	8.51	13.1	0.0	0.0	9.8	11.8
M	16.2	9.11	14.2	0.7	10.7	10.7	12.8
J	15.4	8.97	13.7	0.7	10.2	10.2	12.3
J	15.5	9.2	14.1	0.7	10.5	10.5	12.6
A	14.3	8.92	13.1	0.7	9.9	9.9	11.8
S	14.3	8.28	12.2	0.6	9.1	9.1	11.0
O	13.5	8.19	11.8	0.6	8.8	8.8	10.6
N	12.5	7.63	10.6	0.0	0.0	8.0	9.5
D	11.8	7.71	10.5	0.0	0.0	7.9	9.4
				4.0	59.3	109.6	131.6
Total (mm/año)					304.5		

De esta forma el valor de la ETR en la microcuenca es de **304.5 mm/año**, que se pierden por este fenómeno, y que varía de acuerdo al tipo de cobertura presente en el lugar.

De acuerdo con Aparicio (2005) una vez obtenida la ETP y ETR, en la zona de estudio se calcula el coeficiente ponderado de Evapotranspiración con la siguiente fórmula:

$$K = \frac{ETR}{ETP}$$

donde: K = Coeficiente ponderado de Evapotranspiración

ETR = Evapotranspiración Real

ETP = Evapotranspiración Potencial.

Sustituyendo los valores en la fórmula se tiene:

$$K = \frac{304.5}{691.1} = 0.44$$

El Cuadro 23 presenta el valor de la ETR por rodal (m^3), multiplicando la precipitación media anual por rodal (columna 3), por el coeficiente ponderado de ETR (columna 5).

Cuadro 23. Estimación de la ETR ponderada por rodal.

No. de Rodal	Tipo de Vegetación	Precipitación media anual por rodal (m^3)	Coeficiente de ETR	ETR anual por rodal (m^3)
1	Bosque de Pino	32,890.20	0.44	14,471.7
2	Bosque de Pino-encino	453,109.30	0.44	199,368.1
3	Bosque de Pino	108,497.60	0.44	47,738.9
4	Agricultura (Maíz)	46,527.60	0.44	20,472.1
5	Bosque de Pino-encino	294,006.30	0.44	129,362.8
6	Bosque de Pino-encino	714,893.90	0.44	314,553.3
7	Agricultura (avena)	30,283.10	0.44	13,324.5
8	Bosque de Pino	440,942.60	0.44	194,014.7
9	Agricultura (avena)	20,790.40	0.44	9,147.8
10	Bosque de Pino	912,101.40	0.44	401,324.6
11	Agricultura (avena)	11,899.30	0.44	5,235.7
12	Agricultura (avena)	26,673.20	0.44	11,736.2
13	Bosque de Pino-oyamel	1,273,024.60	0.44	560,130.8
14	Pastizal	45,658.60	0.44	20,089.8
15	Agricultura (cebada)	244,604.20	0.44	107,625.8
16	Bosque de Oyamel-pino	1,257,649.10	0.44	553,365.6
17	Bosque de Oyamel	109,232.90	0.44	48,062.5
18	Agricultura (cebada)	6,350.80	0.44	2,794.3
19	Bosque de Oyamel-pino	119,193.60	0.44	52,445.2
20	Bosque de Oyamel-pino	62,304.20	0.44	27,413.8
21	Bosque de Pino	84,832.70	0.44	37,326.4
22	Bosque de Oyamel-pino	81,022.20	0.44	35,649.8
23	Pastizal	8,289.40	0.44	3,647.3
24	Pastizal	43,185.10	0.44	19,001.4
25	Bosque de Oyamel-pastizal	50,605.50	0.44	22,266.4
26	Pastizal	117,789.70	0.44	51,827.5
27	Agricultura (cebada)	136,173.50	0.44	59,916.3
28	Bosque de Oyamel-pino	564,481.40	0.44	248,371.8
29	Agricultura (cebada)	174,612.20	0.44	76,829.4
30	Agricultura (maíz)	47,597.20	0.44	20,942.8
31	Bosque de Pino	126,881.30	0.44	55,827.8
32	Bosque de Pino	226,220.40	0.44	99,537.0
33	Bosque de Pino	348,489.10	0.44	153,335.2
34	Bosque de Pino	75,005.70	0.44	33,002.5
35	Bosque de Pino	237,651.80	0.44	104,566.8
36	Bosque de Pino	80,086.30	0.44	35,238.0
37	Pastizal	530,722.20	0.44	233,517.7

Continuación Cuadro 23.

38	Bosque de Pino	325,626.40	0.44	143,275.6
39	Bosque de Pino-encino	373,424.10	0.44	164,306.6
40	Agricultura (maíz)	28,143.90	0.44	12,383.3
41	Agricultura (cebada)	7,019.30	0.44	3,088.5
42	Bosque de Pino-encino	571,768.10	0.44	251,577.9
43	Agricultura (cebada)	678,594.40	0.44	298,581.5
44	Bosque de Pino-encino	309,983.50	0.44	136,392.7
45	Agricultura (cebada)	431,115.70	0.44	189,690.9
46	Agricultura (maíz)	306,908.40	0.44	135,039.7
47	Bosque de Pino	107,962.80	0.44	47,503.6
48	Bosque de Encino-pino	260,648.20	0.44	114,685.2
49	Bosque de Pino-encino	406,448.00	0.44	178,837.1
50	Bosque de Pino-encino	74,671.50	0.44	32,855.4
51	Pastizal	389,668.70	0.44	171,454.2
52	Pastizal	169,197.40	0.44	74,446.8
53	Bosque de Pino-encino	217,463.10	0.44	95,683.7
54	Área degradada	195,670.00	0.44	86,094.8
55	Agricultura (Maíz)	192,327.50	0.44	84,624.1
56	Agricultura (Maíz)	230,498.80	0.44	101,419.5
57	Área degradada	442,948.10	0.44	194,897.2
		14,864,364.90		6,540,320.6

8.3.4. Esguerrimiento superficial

El esguerrimiento superficial fue determinado a través del Método de Curvas Numéricas, propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), en 1972, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y adoptado por la Comisión Nacional Forestal en el 2004.

El método de las curvas numéricas es una representación general de los coeficientes de esguerrimiento medio y esguerrimiento máximo instantáneo, y fueron obtenidos por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes áreas de los Estados Unidos. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso del suelo, con su tratamiento mecánico y condición de humedad antecedente (ésta última no considerada en el presente trabajo por falta de datos).

Para determinar el valor de las curvas numéricas (CN), se debe tomar en cuenta las condiciones del Cuadro 25, tales como el uso del suelo, tratamiento o práctica mecanizada utilizada en el terreno, y la condición hidrológica del suelo; esta última determinada por la cubierta vegetal (densidad de cobertura en porcentaje), y la cual se clasifica en tres rangos:

1. Buena = cobertura mayor al 75%
2. Regular = cobertura entre 50 y 75 %
3. Mala = cobertura menor del 50%

Una vez obtenida la condición hidrológica, se debe ubicar a que grupo de suelo pertenece, e indicar el valor de la curva numérica, para ello se presenta el Cuadro 24.

Cuadro 24. Grupos hidrológicos de suelo propuestos por SCS-USDA, 1972.

Grupo suelos	Potencial de escorrentía	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Textura del suelo	Descripción de las características del suelo
A	Escaso	Alta	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables	Suelos con bajo potencial de escurrimiento. incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil.
B	Moderado	Moderada	Arenas finas y Limos	Suelos con potencial de escurrimiento moderadamente bajo. Arenosos menos profundos y agregados que el grupo A. y presentan una infiltración mayor que el promedio cuando están húmedos. Encontramos suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos.
C	Medio	Lenta	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla	Suelos con potencial de escurrimiento moderadamente alto. Comprende suelos someros y considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menos que la promedio después de saturación, tales como: suelos migajones arcillosos.
D	Elevado	Muy lenta	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos; suelos muy impermeables.	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Aquí encontramos a los suelos pesados, son alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados.

Fuente: CONAFOR (2004), Aparicio (2005) y Becerra (2005).

Habiendo identificado las condiciones anteriores se determina el valor de la curva numérica, el cual se usa para estimar la escorrentía.

Cuadro 25. Valores de curvas numéricas (CN). para estimar la
Escorrentia (SCS-USDA, 1972)

<i>Cobertura</i>			<i>Grupos de suelo</i>			
Uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
			Valor curva numérica			
Suelos en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas a nivel	Mala	70	79	84	88
	Terraza y curvas a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curvas a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos (cereales)	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curvas a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curvas a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forrajes con rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	89
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curvas a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas a nivel	Buena	6	35	70	79
Pastos permanentes		Buena	30	58	71	78
Bosques naturales	Muy ralo		56	75	86	91
	Ralo		46	68	78	84
	Normal		36	60	70	77
	Denso		26	52	62	69
	Muy denso		15	44	54	61
Caminos	terracería	Regular	72	82	87	89
	pavimentados	Mala	74	84	90	92

Fuente: CONAFOR (2004) y Aparicio (2005)

Obtenido el valor de la curva numérica, se utiliza en la determinación del cálculo de la retención máxima en la cuenca o microcuenca, a partir de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (43)$$

Donde:

S : Retención máxima potencial de humedad (mm)

CN : Curva numérica o valor obtenido (Cuadro 25)

La retención máxima potencial, también nos expresa el gasto medio en lámina de escurrimiento que se presenta en el área de interés, para una tormenta en particular (se consideró la máxima precipitación del mes más lluvioso) y se determina con la siguiente ecuación:

$$Q = \left[\frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \right] \quad (44)$$

Donde:

Q : Escurrimiento medio en mm.

P : Precipitación en mm (para una tormenta en particular).

S : Potencial máximo de retención de humedad en mm.

Para la estimación de los coeficientes parciales, se consideró la precipitación del mes más lluvioso, en este caso Junio, con una precipitación media de 127 mm.

La obtención de los coeficientes parciales de escurrimiento se originan de dividir el gasto medio escurrido (columna 6), entre la precipitación del mes más lluvioso (columna 3), como se presenta en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Determinación de los coeficientes parciales de escurrimiento por tipo de vegetación.

No. de rodal	Tipo de Vegetación	Pp mes más lluvioso (mm) (Junio)	Cn	(S) Retención máxima potencial	Q= Gasto medio escurrido (mm)	Esc. por Rodal (mm)	Coeficiente parcial de Esc. "C"
1	Bosque de Pino	127.5	55	207.8	25.1	123.69	0.20
2	Bosque de Pino-encino	127.5	70	108.9	52.1	3530.90	0.41
3	Bosque de Pino	127.5	60	169.3	33.3	541.10	0.26
4	Agricultura (Maíz)	127.5	82	55.8	78.7	547.44	0.62
5	Bosque de Pino-encino	127.5	55	207.8	25.1	1105.67	0.20
6	Bosque de Pino-encino	127.5	55	207.8	25.1	2688.50	0.20
7	Agricultura (avena)	127.5	82	55.8	78.7	356.31	0.62
8	Bosque de Pino	127.5	55	207.8	25.1	1658.25	0.20
9	Agricultura (avena)	127.5	82	55.8	78.7	244.62	0.62
10	Bosque de Pino	127.5	55	207.8	25.1	3430.13	0.20
11	Agricultura (avena)	127.5	82	55.8	78.7	140.01	0.62
12	Agricultura (avena)	127.5	82	55.8	78.7	313.84	0.62
13	Bosque de Pino-oyamel	127.5	25	762.0	0.8	160.18	0.01
14	Pastizal	127.5	79	67.5	71.6	488.98	0.56
15	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	2878.01	0.62
16	Bosque de Oyamel-pino	127.5	25	762.0	0.8	158.25	0.01
17	Bosque de Oyamel	127.5	25	762.0	0.8	13.74	0.01
18	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	74.72	0.62
19	Bosque de Oyamel-pino	127.5	36	451.6	2.8	50.45	0.02
20	Bosque de Oyamel-pino	127.5	25	762.0	0.8	7.84	0.01
21	Bosque de Pino	127.5	60	169.3	33.3	423.08	0.26
22	Bosque de Oyamel-pino	127.5	25	762.0	0.8	10.19	0.01
23	Pastizal	127.5	61	162.4	35.1	43.49	0.28
24	Pastizal	127.5	61	162.4	35.1	226.59	0.28
25	Bosque de Oyamel-pastizal	127.5	66	130.8	44.2	334.77	0.35
26	Pastizal	127.5	79	67.5	71.6	1261.46	0.56
27	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	1602.22	0.62
28	Bosque de Oyamel-pino	127.5	25	762.0	0.8	71.03	0.01
29	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	2054.49	0.62
30	Agricultura (maíz)	127.5	82	55.8	78.7	560.03	0.62
31	Bosque de Pino	127.5	66	130.8	44.2	839.37	0.35
32	Bosque de Pino	127.5	60	169.3	33.3	1128.21	0.26
33	Bosque de Pino	127.5	55	207.8	25.1	1310.56	0.20
34	Bosque de Pino	127.5	73	93.9	58.3	654.30	0.46
35	Bosque de Pino	127.5	60	169.3	33.3	1185.22	0.26
36	Bosque de Pino	127.5	73	93.9	58.3	698.62	0.46
37	Pastizal	127.5	79	67.5	71.6	5683.73	0.56
38	Bosque de Pino	127.5	77	75.9	67.0	3265.64	0.53
39	Bosque de Pino-encino	127.5	60	169.3	33.3	1862.35	0.26
40	Agricultura (maíz)	127.5	82	55.8	78.7	331.14	0.62

Continuación Cuadro 26.

41	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	82.59	0.62
42	Bosque de Pino-encino	127.5	55	207.8	25.1	2150.24	0.20
43	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	7984.35	0.62
44	Bosque de Pino-encino	127.5	60	169.3	33.3	1545.96	0.26
45	Agricultura (cebada)	127.5	82	55.8	78.7	5072.51	0.62
46	Agricultura (maíz)	127.5	82	55.8	78.7	3611.09	0.62
47	Bosque de Pino	127.5	73	93.9	58.3	941.80	0.46
48	Bosque de Encino-pino	127.5	60	169.3	33.3	1299.91	0.26
49	Bosque de Pino-encino	127.5	25	762.0	0.8	51.14	0.01
50	Bosque de Pino-encino	127.5	73	93.9	58.3	651.39	0.46
51	Pastizal	127.5	69	114.1	50.1	2919.19	0.39
52	Pastizal	127.5	79	67.5	71.6	1812.01	0.56
53	Bosque de Pino-encino	127.5	60	169.3	33.3	1084.54	0.26
54	Área degradada	127.5	89	31.4	96.3	2818.28	0.76
55	Agricultura (Maíz)	127.5	82	55.8	78.7	2262.93	0.62
56	Agricultura (Maíz)	127.5	82	55.8	78.7	2712.05	0.62
57	Área degradada	127.5	89	31.4	96.3	6379.90	0.76

Una vez determinados los coeficientes parciales de escurrimiento por tipo de vegetación, se agrupan para obtener el escurrimiento por superficie de acuerdo al tipo de uso del suelo, y así generamos el valor del coeficiente parcial de escurrimiento para cada uso del suelo.

El Cuadro 27 presenta el escurrimiento por tipo de uso del suelo, el cual se obtiene multiplicando la superficie (columna 2), por la precipitación media anual (columna 3), después la multiplicamos por el coeficiente parcial (columna 4), dando como resultado el escurrimiento en m³/año.

Cuadro 27. Escurrimiento superficial en m³ por tipo de uso del suelo.

Uso del suelo	Superficie (m ²)	Pp. media anual (m)	Coeficiente "C"	Esc. (m ³ /año)
Bosque de Pino	4,648,000	0.6685	0.31	963,228.3
Bosque de Pino-oyamel	1,904,300	0.6685	0.01	12,730.2
Bosque de Pino-encino	5,108,600	0.6685	0.26	887,925.8
Bosque de Oyamel	163,400	0.6685	0.01	1,092.3
Bosque de Oyamel-pino	3,118,400	0.6685	0.01	20,846.5
Bosque Oyamel-pastizal	75,700	0.6685	0.35	17,711.9
Bosque de Encino-pino	389,900	0.6685	0.26	67,768.5
Agricultura	3,919,400	0.6685	0.62	1,624,473.7
Pastizal	1,951,400	0.6685	0.45	587,029.9
Áreas degradadas	955,300	0.6685	0.76	485,349.7
	22,234,400	"C" ponderada	0.31	
			Esc. Total	4,668,156.9

El cuadro anterior presenta la información del escurrimiento de una forma generalizada, pero lo más adecuado es saber las pérdidas por escurrimiento en cada unidad de clasificación (rodal), debido a las características tan particulares que presentan. El Cuadro 28 muestra los valores de escurrimiento ($\text{m}^3/\text{año}$), para cada unidad de clasificación, los cuales se derivan de multiplicar la precipitación por rodal en m^3 (columna5), por el coeficiente ponderado de escurrimiento (columna 6), derivado del promedio de los coeficientes parciales presentados en el cuadro anterior.

Cuadro 28. Escurrimiento medio en m^3 por rodal

No. de Rodal	Área (ha)	Tipo de Vegetación	Pendiente (%)	Precipitación por rodal ($\text{m}^3/\text{año}$)	Coeficiente ponderado de escurrimiento	Esc. Medio por Rodal ($\text{m}^3/\text{año}$)
1	4.92	Bosque de Pino	36	32,890.20	0.314050208	10,329.2
2	67.78	Bosque de Pino-encino	21	453,109.30	0.314050208	142,299.1
3	16.23	Bosque de Pino	27	108,497.55	0.314050208	34,073.7
4	6.96	Agricultura (Maíz)	13	46,527.60	0.314050208	14,612.0
5	43.98	Bosque de Pino-encino	46	294,006.30	0.314050208	92,332.7
6	106.94	Bosque de Pino-encino	38	714,893.90	0.314050208	224,512.6
7	4.53	Agricultura (avena)	13	30,283.05	0.314050208	9,510.4
8	65.96	Bosque de Pino	31	440,942.60	0.314050208	138,478.1
9	3.11	Agricultura (avena)	16	20,790.35	0.314050208	6,529.2
10	136.44	Bosque de Pino	31	912,101.40	0.314050208	286,445.6
11	1.78	Agricultura (avena)	16	11,899.30	0.314050208	3,737.0
12	3.99	Agricultura (avena)	9	26,673.15	0.314050208	8,376.7
13	190.43	Bosque de Pino-oyamel	23	1,273,024.55	0.314050208	399,793.6
14	6.83	Pastizal	19	45,658.55	0.314050208	14,339.1
15	36.59	Agricultura (cebada)	14	244,604.15	0.314050208	76,818.0
16	188.13	Bosque de Oyamel-pino	35	1,257,649.05	0.314050208	394,964.9
17	16.34	Bosque de Oyamel	20	109,232.90	0.314050208	34,304.6
18	0.95	Agricultura (cebada)	8	6,350.75	0.314050208	1,994.5
19	17.83	Bosque de Oyamel-pino	26	119,193.55	0.314050208	37,432.8
20	9.32	Bosque de Oyamel-pino	38	62,304.20	0.314050208	19,566.6
21	12.69	Bosque de Pino	24	84,832.65	0.314050208	26,641.7
22	12.12	Bosque de Oyamel-pino	44	81,022.20	0.314050208	25,445.0
23	1.24	Pastizal	33	8,289.40	0.314050208	2,603.3
24	6.46	Pastizal	21	43,185.10	0.314050208	13,562.3
25	7.57	Bosque de Oyamel-pastizal	38	50,605.45	0.314050208	15,892.7
26	17.62	Pastizal	45	117,789.70	0.314050208	36,991.9
27	20.37	Agricultura (cebada)	24	136,173.45	0.314050208	42,765.3
28	84.44	Bosque de Oyamel-pino	40	564,481.40	0.314050208	177,275.5
29	26.12	Agricultura (cebada)	12	174,612.20	0.314050208	54,837.0
30	7.12	Agricultura (maíz)	59	47,597.20	0.314050208	14,947.9

Continuación Cuadro 28.

31	18.98	Bosque de Pino	11	126,881.30	0.314050208	39,847.1
32	33.84	Bosque de Pino	15	226,220.40	0.314050208	71,044.6
33	52.13	Bosque de Pino	22	348,489.05	0.314050208	109,443.1
34	11.22	Bosque de Pino	27	75,005.70	0.314050208	23,555.6
35	35.55	Bosque de Pino	20	237,651.75	0.314050208	74,634.6
36	11.98	Bosque de Pino	44	80,086.30	0.314050208	25,151.1
37	79.39	Pastizal	34	530,722.15	0.314050208	166,673.4
38	48.71	Bosque de Pino	20	325,626.35	0.314050208	102,263.0
39	55.86	Bosque de Pino-encino	22	373,424.10	0.314050208	117,273.9
40	4.21	Agricultura (maíz)	18	28,143.85	0.314050208	8,838.6
41	1.05	Agricultura (cebada)	19	7,019.25	0.314050208	2,204.4
42	85.53	Bosque de Pino-encino	13	571,768.05	0.314050208	179,563.9
43	101.51	Agricultura (cebada)	6	678,594.35	0.314050208	213,112.7
44	46.37	Bosque de Pino-encino	24	309,983.45	0.314050208	97,350.4
45	64.49	Agricultura (cebada)	14	431,115.65	0.314050208	135,392.0
46	45.91	Agricultura (maíz)	9	306,908.35	0.314050208	96,384.6
47	16.15	Bosque de Pino	22	107,962.75	0.314050208	33,905.7
48	38.99	Bosque de Encino-pino	24	260,648.15	0.314050208	81,856.6
49	60.80	Bosque de Pino-encino	37	406,448.00	0.314050208	127,645.1
50	11.17	Bosque de Pino-encino	41	74,671.45	0.314050208	23,450.6
51	58.29	Pastizal	52	389,668.65	0.314050208	122,375.5
52	25.31	Pastizal	14	169,197.35	0.314050208	53,136.5
53	32.53	Bosque de Pino-encino	14	217,463.05	0.314050208	68,294.3
54	29.27	Área degradada	16	195,669.95	0.314050208	61,450.2
55	28.77	Agricultura (Maíz)	13	192,327.45	0.314050208	60,400.5
56	34.48	Agricultura (Maíz)	3	230,498.80	0.314050208	72,388.2
57	66.26	Área degradada	14	442,948.10	0.314050208	139,107.9
	2223.54			14,864,364.9		4,668,156.9

El valor del coeficiente ponderado de escurrimiento (**0.31**), indica que el 31% del total de la precipitación que cae en la microcuenca anualmente, se convierte en escurrimiento superficial, representando una pérdida considerable de agua, principalmente en aquellas áreas carentes de una buena cobertura vegetal.

8.3.6. Recarga subterránea

Proceso que presenta la misma complejidad que la infiltración, pues este se da después de la infiltración denominándose precolación, siendo el agua que fluye hacia las partes más profundas del suelo a través de espacios porosos y grietas de los estratos rocosos,

quedando depositada en formaciones geológicas como acuíferos, acuícludos, acuitardos, acuífugos, etc., dependiendo de las características geológicas particulares de la zona.

Para este componente del balance hídrico, se consideró el agua extraída del acuífero a través de pozos, aunque cabe mencionar que la recarga está por arriba de la cantidad aprovechada, pero es difícil saber con exactitud cuanta del agua infiltrada se convierte en recarga subterránea, por lo que para fines de la presente investigación se tomó como parámetro el volumen extraído anualmente para consumo potable.

La población de Tlaxco cuenta con tres pozos para el abastecimiento de agua potable, con un periodo activo entre 8 y 12 horas diarias todo el año.

El Cuadro 29, presenta el volumen extraído anualmente de los pozos, siendo la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tlaxco, quien proporcionó los datos de tiempo activo de los pozos, profundidad, gasto en litros/segundo (l/seg), el número de horas y días que están activas las bombas, de cada uno de los pozos.

A partir de los datos en l/seg, horas de bombeo al día y el tiempo activo (días al año), se obtuvieron los gastos:

Pozo 1. gasto = 14 l/seg bombeo = 12 hr/día días activos = 365

Obtención del gasto en m³/año.

$$14 \text{ l/seg} \times 60 \text{ seg.} = \mathbf{840 \text{ l/min}}$$

$$840 \text{ l/min} \times 60 \text{ min.} = \mathbf{50,400 \text{ l/hr} = 50.4 \text{ m}^3/\text{hr}}$$

$$50.4 \text{ m}^3/\text{hr} \times 12 \text{ (horas de bombeo al día)} = \mathbf{604.8 \text{ m}^3/\text{día}}$$

$$604.8 \text{ m}^3/\text{día} \times 365 \text{ días (1 año)} = \mathbf{220,752 \text{ m}^3/\text{año}}$$

Así fue como se obtuvo el volumen de agua extraído ($\text{m}^3/\text{año}$), para cada uno de los pozos, valores que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 29. Volumen de agua extraído para cada pozo y el total anual en $\text{m}^3/\text{año}$.

	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Total
Tiempo Activo (años)	29	11	9	
Profundidad (m)	126	150	145	
Días activos	Todo el año	Todo el año	Todo el año	
Horas de bombeo/día	12	12	9	33
Gasto (l/seg)	14	3	18	35
Gasto (l/min)	840	180	1,080	2,100
Gasto (m^3/hr)	50.4	10.8	64.8	125.2
Gasto ($\text{m}^3/\text{día}$)	604.8	129.6	583.2	1317.6
Gasto ($\text{m}^3/\text{año}$)	220,752	47,304	212,868	480,924

Obtenidos todos los componentes del balance hídrico, se resumen en el Cuadro 30 y se presenta los porcentajes de cómo se distribuyen cada uno de ellos

Cuadro 30 Balance hídrico anual de la microcuenca del Río Zahuapan

Activo hídrico anual en la microcuenca	Cantidad anual del recurso hídrico en m^3
Precipitación total (100%)	14,864,364.9
<i>Componente del Balance Hídrico</i>	<i>Distribución del recurso hídrico en m^3</i>
Intercepción (12.2%)	1,808,610.9
Infiltración (7.5%)	1,111,719.45
Evapotranspiración real (44.1%)	6,540,320.6
Escurrimiento superficial (31.1%)	4,668,156.9
Recarga subterránea (Extracción en pozos) (3.3%)	480,924.0
Agua retenida en el suelo (1.8%)	254,633.05

8.4. Valoración Económica-Ecológica de Servicios Hidrográficos

Se adoptó una manera sencilla de obtener la mejor aproximación a la valoración de los servicios hidrográficos, siendo a través de los costos de sustitución (costo de oportunidad), basado en una actividad alternativa (servicios ambientales), diferente a la que se está realizando en la microcuenca (aprovechamiento de recursos forestales: maderables y no maderables), generando ingresos económicos de igual o mayor monto a la actividad que se deja de realizar.

En la microcuenca el mayor generador de ingresos todo el año para los dueños del bosque es el aprovechamiento maderable, seguido de los no maderables, tales como el heno y musgo, en la temporada navideña.

Al cuantificar los ingresos generados por extracción de madera hay que tomar en cuenta el incremento corriente anual (ICA en $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ de madera) y la distribución de productos (primarios, secundarios y leña), los cuales se derivan del aprovechamiento maderable, y cada uno de estos tiene un costo en el mercado regional. En la microcuenca, tenemos tres géneros con potencial maderero tales como: *Pinus* (pino), *Abies* (Oyamel) y *Quercus* (encino); y sus principales especies que encontramos son: *Pinus patula*, *Pinus rudis*, *Pinus ayacahite*, *Pinus pseudostrobus*, *Abies religiosa*, *Quercus glabrescens* y *Quercus rugosa*.

En un metro cúbico de madera rollo total árbol (r.t.a), se considera el 65% de productos primarios, el 20% de secundario, 10% de leña y 5% de desperdicios (material no aprovechable), por lo que para cuantificar el valor de 1 m^3 de madera, se tomó en cuenta cada porcentaje de su distribución de productos, multiplicado por el precio de cada uno de los productos.

Cuadro 31. Estimación del ingreso (\$) anual (ha/año), de acuerdo al ICA.

Género	ICA (m ³ /ha)	Distribución de Productos	Precio (\$) tipo de producto/m ³	Distribución de productos (%) en 1 m ³ r.t.a	Valor derivado de cada tipo de producto para 1 m ³ r.t.a	Ingreso (\$) anual (ha/año) de acuerdo al ICA
Pinus	1.5	Primarios	1,000.00	(65 %)	650.00	975.00
		Secundarios	600.00	(20 %)	120.00	180.00
		Leña	120.00	(10 %)	12.00	18.00
		Desperdicios	0.00	(5%)	0.00	0.00
				100 %	782.00	1,173.00
Abies	1.5	Primarios	1,000.00	(60%)	600.00	900.00
		Secundarios	600.00	(25 %)	150.00	225.00
		Leña	120.00	(10 %)	12.00	18.00
		Desperdicios	0.00	(5%)	0.00	0.00
				100 %	762.00	1,143.00
Quercus	0.75	Primarios	650.00	(50%)	325.00	244.00
		Secundarios	390.00	(30 %)	117.00	88.00
		Leña	120.00	(15 %)	18.00	13.50
		Desperdicios	0.00	(5%)	0.00	0.00
				100 %	460.00	345.50
				Ingresos Anuales ha/año		2,661.50

El cuadro anterior indica que el dueño del bosque obtiene ingresos anuales de \$1,173.00 para Pino, \$1,143.00 en oyamel y \$345.50 en encino, sumando un monto de \$2,661.50 ha/año. Un ingreso que dejaría de percibir por no realizar aprovechamiento maderable, y lo que costaría mantener o incentivar los Servicios Ambientales (captación de agua, captura de carbono, biodiversidad y recreación), es por ello que se le llama costo de oportunidad.

Pero lo anterior es sólo una de las distintas formas de valorar un servicio ambiental, ya que puede hacerse directamente a través de la aplicación de una encuesta (valoración contingente) a los distintos beneficiarios; dicha metodología se adoptó para la presente investigación y se aplicó de manera aleatoria, para evaluar la disponibilidad a pagar (DAP) de la gente por mantener el servicio hídrico a partir de la conservación del bosque en la parte alta de la microcuenca.

Se aplicaron 30 encuestas, de manera aleatoria entre la población, con el fin de recoger la información lo más variable posible, y no generar sesgos de acuerdo al conocimiento de la gente con el tema a tratar.

La encuesta aplicada (ver anexos), constó de 24 preguntas, relacionadas, al suministro de agua en la población, si éste es a diario o sólo por horas, con qué tipo de depósito cuenta la gente para almacenar el agua, qué importancia tiene el agua para el desarrollo de su vida diaria, la importancia de los bosques como productores de agua, la disponibilidad a pagar para la conservación de los bosques y mantener el suministro de agua en cantidad y calidad, quien debería tener bajo su cuidado los bosques de la microcuenca, y algunas otras.

Al aplicar la encuesta, la gente se mostró temerosa al mencionar que era relacionada con la disponibilidad de agua en la localidad de Tlaxco, lo que arrojó poca participación para contestar la encuesta, siendo finalmente 30 personas quienes completaron totalmente las encuestas. De acuerdo a las preguntas formuladas en la encuesta, la información recabada fue la siguiente:

1. La principal fuente de abastecimiento de agua en la comunidad es por red pública.
2. El suministro de agua en su mayoría es normal, es decir no hay escasez ni racionamiento.
3. Un porcentaje de la población recibe agua todos los días, la otra solo 3 ó 4 días a la semana por la mañana.
4. La mayoría de la gente cuenta con depósito de agua (tanque o cisterna).
5. El agua es el principal activo que la gente usa para el desarrollo de su vida diaria, y la consideran un recurso muy valioso.
6. La mayoría de la gente percibe la importancia de los bosques y la vegetación como reguladores del recurso hídrico.
7. La perspectiva de la gente en relación a quién debe cuidar los bosques de la microcuenca, respondieron que debe haber una interacción del Gobierno Federal, Estatal, Municipal, los dueños y la ciudadanía.

8. El 85% de los encuestados, se manifestaron a favor de que los dueños o poseedores del bosque, deberían recibir un pago ó compensación por cuidar y mantener el bosque, para la generación de servicios ambientales como el agua. El 15% restante dijo que no, ya que los dueños tienen ingresos de la madera que aprovechan.
9. En relación al establecimiento de una cuota mensual para proteger los bosques y mantener el suministro de agua, el 80% de los encuestados se manifestó a favor con montos que oscilan desde los \$5.00 hasta \$50.00, el resto de los encuestados declararon que el gobierno es quien debe pagar y otros por razones de una limitada economía.
10. Al preguntar a la gente que institución sería la más adecuada para recibir el pago si éste se realizara, el 100% coincidió en el Municipio, quien a su vez debe distribuir el pago a los dueños del bosque.
11. El 70% de los entrevistados tiene relación con los bosques, ya sea que son propietarios o porque trabajan en las actividades del bosque; el resto manifestó no tener relación directa alguna con los bosques.
12. Todos manifestaron visitar de vez en cuando el bosque, desde aquellos que son dueños, los que trabajan en él y los que sólo van de día de campo.
13. Al preguntar cuales son los servicios ambientales que se obtienen de los bosques y qué orden de importancia les darian, el 50% respondió la captación de agua, 20% producción de oxígeno, 10% prevención de la erosión, 10% hábitat de flora y fauna, 10% belleza escénica.

Es importante mencionar que la poca participación de la gente, limitó ampliar el rango de la perspectiva acerca de los bosques como proveedores de servicios ambientales, particularmente el agua, percibiendo un problema social, íntimamente ligado a la distribución del vital líquido y el establecimiento de tarifas.

8.4.1. Cuantificación y cálculo del recurso hídrico

A través de cada uno de los componentes del balance hídrico, se determinó la cantidad de agua que está disponible para consumo humano, la cual es utilizada en las diferentes actividades socioeconómicas del lugar.

En la Figura 22 se observa la distribución del balance hídrico, a través de cada uno de sus componentes, donde la Precipitación es la máxima entrada de agua en la microcuenca, la intercepción, la evapotranspiración real (ETR) y el escurrimiento superficial, representan las mayores pérdidas de agua, a comparación de la infiltración, recarga subterránea y el agua suspendida o retenida en el suelo, es una mínima parte del total, siendo el agua disponible para ser aprovechada.

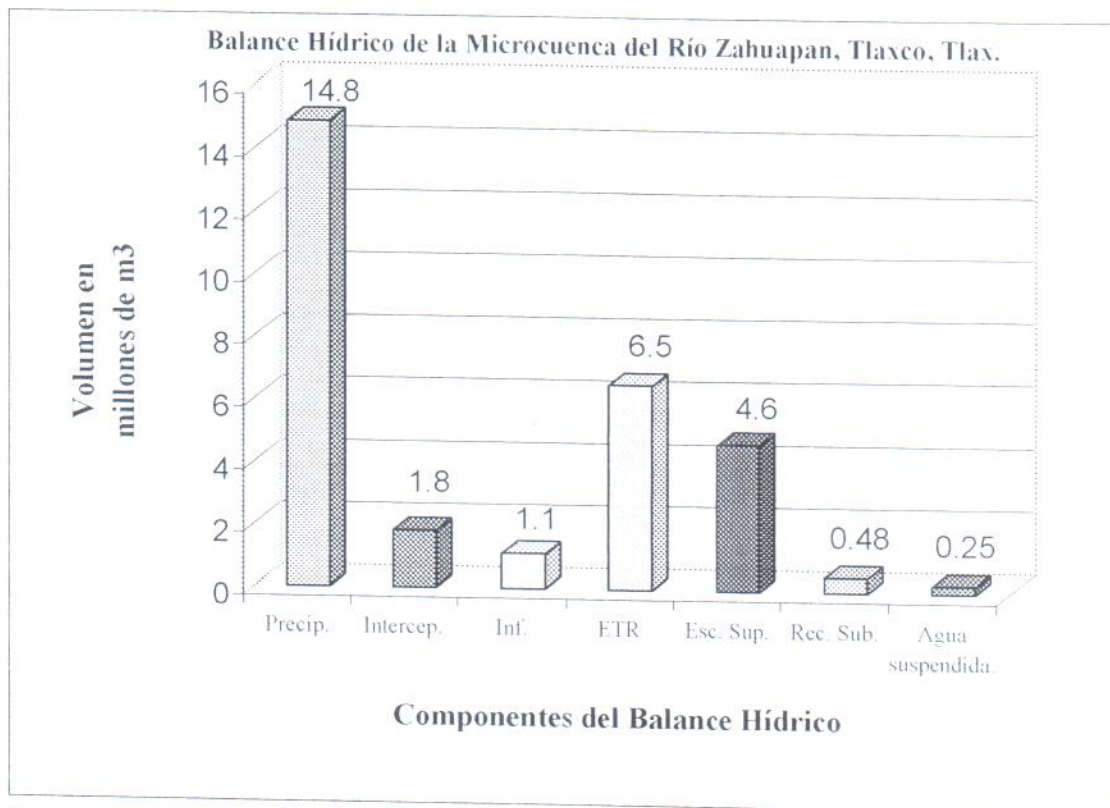


Figura 22. Balance hídrico de la microcuenca del Río Zahuapan, Tlaxco, Tlax.

8.4.1.1. Cuantificación y cálculo de la oferta hídrica

La oferta hídrica, es la cantidad de agua disponible para ser aprovechada y utilizada en los diferentes actividades socioeconómicas, de las cuales el ser humano depende estrechamente para su desarrollo y vida diaria.

Del agua precipitada en la microcuenca sólo alrededor de un 11% esta disponible para ser aprovechada (infiltración más recarga subterránea), pues la intercepción, evapotranspiración real y escurrimiento superficial representan pérdidas en el activo hídrico.

Para determinar la oferta hidrica a partir del agua precipitada anualmente en la microcuenca, restamos las pérdidas y el agua que no puede ser aprovechada para obtener el agua disponible para su uso.

$$Ahd = P - (Int + ETR + Es + As) \quad (45)$$

Donde:

Ahd: Activo hídrico disponible $m^3/año$

P : Precipitación total en la microcuenca $m^3/año$

Int: Intercepción por la cobertura vegetal $m^3/año$

ETR: Evapotranspiración Real $m^3/año$

Es. Escurrimiento superficial $m^3/año$

As: Agua suspendida o agua higroscópica

Sustituyendo los valores de cada uno de los componentes considerados para estimar el Activo hídrico disponible, se tiene lo siguiente:

$$Ahd = 14,864,364.9 - (1,808,610.9 + 6,540,320.6 + 4,668,156.9 + 254,633.05)$$

$$Ahd = 14,864,364.6 - (13,271,721.45) = \mathbf{1,592,643.45 \text{ } m^3/año}$$

Hay que mencionar que no todo el activo hídrico está disponible, pues parte del agua que se infiltra puede quedar retenida en espacios intersticiales en los estratos rocosos y del suelo, la cual puede pasar a formar parte de la recarga subterránea cuando vuelva la temporada de lluvias y sea desplazada por efecto de presión o bien ser alcanzada por las raíces de las plantas y ser transpirada hacia la atmósfera, por lo que se estima que sólo alrededor del 8% es el agua disponible.

8.4.1.2. Cuantificación y cálculo de la demanda hídrica

El cálculo de la demanda es determinado por la cantidad de agua (volumen $m^3/año$), utilizada en las diferentes actividades socioeconómicas (consumo doméstico, comercio e industria), excepto la agricultura debido a que es de temporal, pero es difícil saber con exactitud cuanto gasta cada una de las actividades antes mencionadas, por lo que se consideró que el agua extraída de los pozos es la demanda total anual para desarrollar todas las actividades.

Sin duda la demanda esta en función del crecimiento de la población, pues a mayor número de habitantes, la demanda de servicios públicos es mayor, pero caso contrario, la disponibilidad de éstos se reduce, pues la misma cantidad de servicios tiene que abastecer a un número mayor de usuarios, tal es el caso del agua, debido al incremento de la población la demanda es mayor, pero la disponibilidad del recurso puede ser constante o estarse reduciendo por la sobreexplotación del mismo. A continuación se presenta un esquema gráfico del comportamiento del crecimiento de la población de Tlaxco para el año 2020.

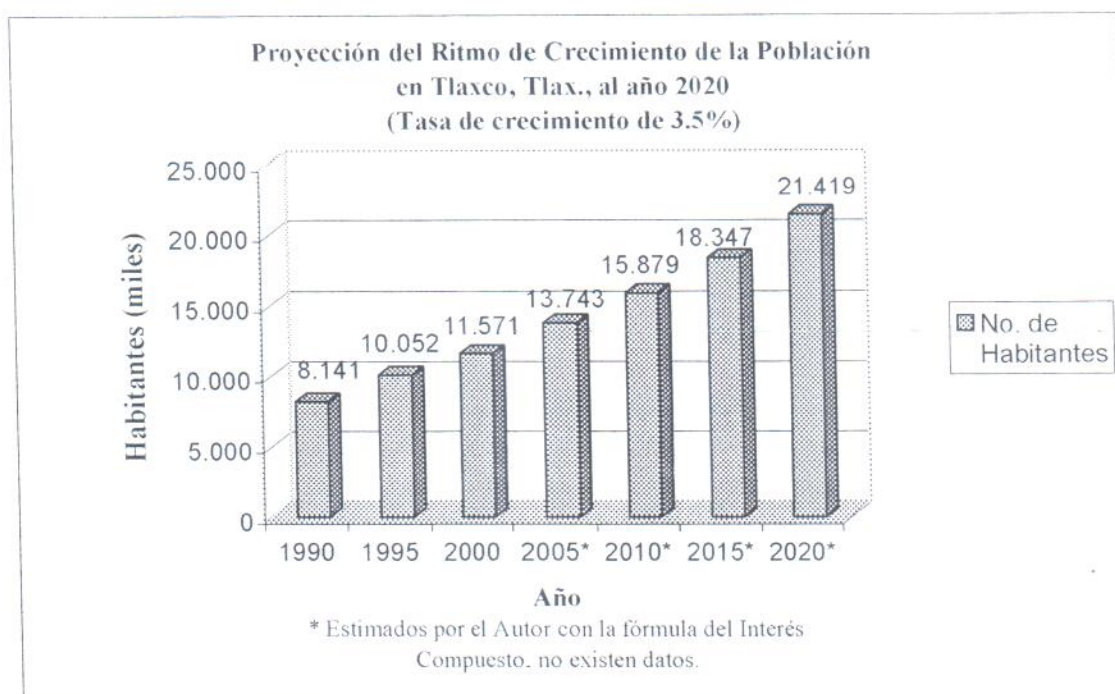


Figura 23. Proyección del ritmo de crecimiento de la población al año 2020.

La Figura 23 muestra el comportamiento del crecimiento de la población, la cual para el año 2020, será casi el doble de la población registrada en el año 2000, lo que indica que habrá más demanda de servicios, en particular el recurso hídrico.

Suponiendo que el abastecimiento de agua desde 1990 se ha mantenido constante como hasta la fecha ($480,924 \text{ m}^3/\text{año}$, extraído de los pozos), es decir, sin alteraciones en la disponibilidad real, sin duda hay una reducción en la disponibilidad del activo hídrico por persona, pues la misma cantidad del recurso tiene que distribuirse en un número cada vez mayor de usuarios (a un costo marginal de cero), sin embargo, a pesar de la evidente situación, las autoridades locales no han iniciado acciones para mitigar la inevitable problemática que se avecina, lo que causará un conflicto social muy serio ante la escasez que se prevé.

En la Figura 24, se muestra la clara tendencia en la reducción percapita del recurso hídrico conforme aumenta la población, pues el mismo volumen de agua habrá que distribuirlo a un número mayor de personas de acuerdo a la proyección establecida al año 2020 donde la disponibilidad percapita pasará de 50 a 22 m^3 anuales.

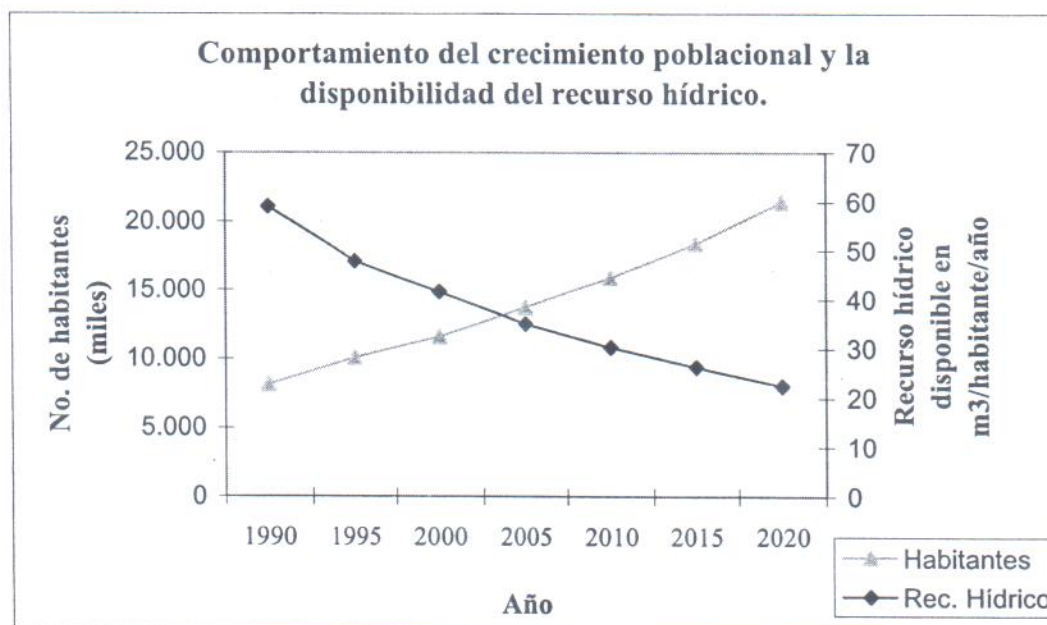


Figura 24. Tendencia del crecimiento poblacional y disponibilidad del recurso hídrico.

8.5. Políticas públicas

En el último sexenio (2000-2006), se desarrollaron programas sectoriales, especiales, institucionales y regionales en materia de agua en México, basados en el Plan Nacional de Desarrollo (PND), decretado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Dicho plan menciona la necesidad de disponer del recurso agua en cantidad y calidad, con el fin de procurar el bienestar y desarrollo de la sociedad, a través de un manejo sustentable (suficiente y racional) de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Entre los programas sectoriales que menciona el PND está el Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006, en el cual se describe la problemática de la contaminación y distribución de las aguas, señalando como metas principales la recuperación de los espacios hidrológicos del país que se encuentren en peligro inminente de alteración y desaparición.

Por otra parte la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), cuenta con el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 (PNH), en el cual se establecen las estrategias y políticas a seguir para la consecución de objetivos establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 115, fracción III menciona que compete a los municipios el servicio de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales, en la práctica estas obligaciones están lejos de ser alcanzadas, debido a que se tiene un sistema de gobernabilidad imperante en el ámbito político y no de servicio a la ciudadanía.

Derivado de la Constitución tenemos un sin número de leyes, reglamentos, normas, etc., de las cuales la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) y su Reglamento, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la NOM-011-CNA-2000 “Conservación del Recurso Agua”, son instrumentos regulatorios en materia ambiental y de recursos naturales.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), es el máximo instrumento normativo en materia de agua en el país, en ella se establece:

- ✓ La Administración del recurso.
- ✓ Los organismos públicos federales, estatales y municipales encargados de organizar, dirigir, reglamentar y conducir las estrategias en materia de aguas.
- ✓ La planeación y programación hídrica.
- ✓ Derechos de explotación (concesiones y asignaciones), uso o aprovechamiento de aguas nacionales.
- ✓ Derechos y obligaciones de los concesionarios o asignatarios
- ✓ Restricciones de uso de agua.
- ✓ Usos de agua (doméstico, agrícola, industrial, generación de electricidad, etc.)
- ✓ Cultura del agua, prevención de inundaciones, contaminación del agua, inversión hidráulica, etc.

La Ley de Aguas Nacionales a partir de sus disposiciones tiene como objetivo, la permanencia, distribución y aprovechamiento sustentable del recurso, para los ciudadanos mexicanos.

Otro instrumento regulatorio en el marco legal del País son las Normas Oficiales Mexicanas, que de acuerdo a la materia en que se enfocan tienen el objetivo de ser un instrumento regulador que especifica las condiciones bajo las cuales los ciudadanos tienen que registrarse.

La NOM-011-CNA-2000 “Conservación del recurso agua” establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media de las aguas nacionales. El objetivo de la norma es determinar la disponibilidad media de las aguas en el país, aplicando una metodología práctica y sencilla, pero que genera un significativo margen de error, ya que el balance hídrico en una región o microcuenca, no puede limitarse sólo al recurso tangible (precipitación, escurrimiento y cuerpos de agua), sino que se debe considerar la parte intangible, que se pierde por infiltración y evapotranspiración.

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), establece criterios para prevenir y controlar todas aquellas acciones que pudieran tener un efecto directo e indirecto en la contaminación, cantidad y calidad del agua.

Otra ley que no está dirigida estrictamente al recurso agua, pero que tiene una estrecha relación para la permanencia de éste es la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) y su Reglamento, la cual se centra en regular y fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos.

La presente Ley en su Título IV habla del Manejo y Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Forestales, y en sus Capítulos 1, 2 y 3, en el cual el primero se refiere a las Autorizaciones para el Aprovechamiento de los Recursos Forestales, el segundo del Aprovechamiento y Usos de los Recursos Forestales, y el tercero del Manejo Forestal Sustentable y Corresponsable, a través de sus artículos que tratan todo lo relacionado a los aprovechamientos, usos y responsables de la ejecución de las autorizaciones forestales.

En el Título V sobre las Medidas de Conservación Forestal, y sus Capítulos 1. Del Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales, 3. De la Prevención, Combate y Control de incendios Forestales, 4. De la Conservación y Restauración, 5. De la Reforestación y Forestación con Fines de Conservación y Restauración y 6. De los Servicios Ambientales. Todos con sus respectivos artículos orientados a las actividades de conservación forestal.

Finalmente el Título VI sobre el Fomento al Desarrollo Forestal, y su capítulo 1. De los Instrumentos Económicos del Fomento Forestal, donde se habla de los incentivos en materia de apoyo al desarrollo y actividades forestales.

El punto antes mencionado es importante para el caso de la microcuenca del río Zahuapan, pues como fuente generadora de bienes y servicios ambientales que

benefician directamente a la localidad de Tlaxco y a la presa de Atlangatepec, se deben considerar fuentes alternativas que fomenten la conservación y el desarrollo de la misma.

Una opción es la incorporación y participación en los Programas implementados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), donde de acuerdo a los lineamientos establecidos en las Reglas de Operación⁸ de cada uno de los programas, la microcuenca cumple con los requisitos para que los dueños y poseedores de los recursos contenidos en ella participen en los siguientes Programas:

1. PRODEFOR (Programa de Desarrollo Forestal)
2. PRONARE (Programa Nacional de Reforestación)
3. PROCYMAF (Programa de Certificación y Manejo Forestal)
4. PSAH (Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos)
5. PSA-CABSA (PSA para Captura de Carbono y Sistemas Agroforestales)

Probablemente para el caso de la presente investigación el Pago por Servicios Hidrológicos (PSH), es el más importante, desde el punto de vista que la microcuenca es generadora al 100% de servicios hídricos, pero los demás programas sin duda son complementarios en las actividades de desarrollo, mantenimiento y conservación de la misma.

Todo lo anterior tiene relación con el recurso agua, pues si se realiza un manejo o aprovechamiento de manera sustentable, se practica la conservación de los recursos forestales y se implementan instrumentos económicos al fomento forestal, se estará en un margen aceptable del uso de los recursos sin causar su explotación y agotamiento.

Existen varios programas que fueron implementados a partir del presente sexenio, pero finalmente esa no es la solución a la problemática existente, sino la adecuada y estricta

⁸ Para más información revisar las Reglas de Operación de los Programas en:
<http://www.conafor.gob.mx>

aplicación de la normatividad, sin favoritismos o inclinaciones económico-político y sociales, sino un estado jurídico con equidad.

8.6. Integración de Mercados de Agua y Establecimiento de Tarifas

Para eficientar el uso del agua, una opción es la integración de la misma a un esquema de mercado, diferenciando cada uno de los sectores consumidores del vital líquido (doméstico, comercio, industrial y agrícola), ya que estos le dan un uso diferente y por lo regular pagan la misma cuota, independientemente de las desiguales cantidades de agua que consumen.

En el caso del consumo doméstico, el agua es usada para cubrir las necesidades básicas de una familia, mientras que en el comercio, industria y agricultura, es usada como insumo para generar un producto o servicio, lo que genera un ingreso económico, cosa que no sucede en el consumo doméstico. Por ello, el agua para uso doméstico debe pagar una cuota que mínimo abarque los costos incurridos en la distribución y abastecimiento, mientras que para los otros tipos de usuarios tendrán que pagar a un costo real aproximado (incluye costos de operación, mantenimiento y distribución, costos de sustentabilidad o costos ecológicos).

Las aguas residuales también pueden ser incluidas en un tipo de mercado, la estrategia es que los municipios y empresas que usan el agua como insumo y que en el proceso de producción se contamina, por medio de plantas tratadoras reduzcan los niveles de contaminación de las aguas para que puedan ser aprovechadas en otras actividades secundarias, como riego agrícola, riego de jardines, lavado de autos, para baños sanitarios en hoteles o para lavado de pisos y banquetas. Pero sino se puede incluir a una actividad secundaria, simplemente se regresa al medio ambiente con un nivel bajo de contaminación.

Otro punto esencial relacionado al tema del agua es el establecimiento de tarifas, por el uso y suministro de la misma, y que a la fecha este tema causa polémica, pues ha sido más complicado establecerle un precio definido como en una mercancía, por su carácter de recurso natural disponible y su libre acceso considerado como un derecho humano.

En el caso de las empresas operadoras del recurso, fijan tarifas de acuerdo al servicio que prestan, mantenimiento de la red hidráulica (aunque en ocasiones es deficiente), el servicio de medidores y facturación, gastos administrativos y operativos, etc., obligando a los usuarios a ser regulares con los pagos, de lo contrario la empresa tiene la facultad de suspenderle el servicio.

Las tarifas generalmente no reflejan el costo real aproximado del recurso, sino que se establecen a partir de los costos que genera su distribución y los diferentes usos a la que es destinada (doméstico, agrícola, industria y generación de electricidad). En el caso de la localidad de Tlaxco, el agua no presenta una cuota derivada del valor verdadero del recurso, y tampoco esta definido de acuerdo al uso en los diferentes sectores, sino que se establece a partir de los gastos generados (salarios de personal, refacciones, pago de luz, costos administrativos, etc.), para el suministro a la población.

Según datos proporcionados por el CAPAT (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tlaxco), los gastos mensuales en la operación de los tres pozos, para suministrar el recurso son de \$190,000 donde el mayor gasto se incurre en el pago de la luz para el funcionamiento de los pozos con un monto de \$120,000 y los \$70,000 restantes se distribuyen en gastos administrativos y operativos. Anualmente se tiene un gasto de \$2,280,000 por concepto de suministro de agua a la población.

La mayor recaudación es a través de una cuota de \$550 anuales que se cobra a la gente por el suministro de agua, se tienen registradas 2,800 tomas en la localidad, si multiplicamos el cobro de la cuota anual por el número de tomas se obtiene un ingreso de \$1,540,000 (sólo suponiendo que todos pagan la cuota), el cual no cubre el gasto total incurrido por el suministro del recurso, pues hay un déficit de \$740,000 que deben ser

cubiertos por los usuarios a través de una cuota anual de \$815 la cual apenas cubrirá el total de los gastos.

Indudablemente existe una inequidad en la aplicación de las políticas públicas y el establecimiento de tarifas, ya que el costo del agua para quines no se encuentran conectados a una red de distribución, es mucho mayor que el que paga los usuarios conectados.

9. CONCLUSIONES

El contenido de este apartado se presenta en un ámbito técnico, económico y normativo, de la misma manera que fue abordado en el desarrollo del trabajo.

La presente investigación mostró de manera objetiva, la importancia de considerar a la cuenca (o microcuenca), como la unidad básica de planeación de los recursos naturales, su influencia en las fases del ciclo hidrológico como componente regulador del mismo, y como generador de bienes y servicios ambientales hidrológicos, indispensables para el desarrollo económico-social de las poblaciones.

Indudablemente la problemática de escasez de agua a nivel mundial, derivada de su distribución desigual en el planeta, y con los diferentes niveles de desarrollo de los países y sus distintos crecimientos de población, ha demandado la atención de todos los sectores de la sociedad (gobiernos, organismos internacionales, instituciones de educación superior e investigación, etc.), como nunca antes para hacer frente a dicho problema, impulsando iniciativas que ayuden a minimizar el mal uso, impulsar políticas que incentiven la eficiencia en el manejo y distribución del recurso, alcanzar un estado de equidad y sustentabilidad, todo con un sólo propósito: asegurar la disponibilidad futura del vital líquido.

En México en los años 70 con una población de 48.2 millones de habitantes se contaba con una disponibilidad per cápita de 9,815 m³/habitante/año, y actualmente con una población aproximada de 105 millones de habitantes, la disponibilidad de agua se ha reducido a 4,446 m³/habitante/año en promedio, según las estadísticas de la CONAGUA (2005), mientras que para el año 2025 se estima que el recurso hídrico se verá disminuido en un 15% o más (apenas a 3,807 m³/habitante/año), derivado del crecimiento demográfico, mayor demanda de bienes y servicios, ineficiencia en los sistemas de distribución y manejo del recurso (particularmente para riego), establecimiento de políticas públicas poco competitivas en la materia y todos los factores que afectan el régimen de lluvias ante el cambio climático.

Aspectos técnicos.

Ubicándonos a un nivel local, como es el caso de la localidad de Tlaxco, con una población actual aproximada de 13,700 habitantes, cuenta con una disponibilidad del recurso hídrico de $35 \text{ m}^3/\text{habitante/año}$ ⁹, (dato derivado del total del agua extraída anualmente por los pozos de $480,924 \text{ m}^3$ y repartida en el total de la población), cantidad que se reducirá significativamente para el año 2020 en un 35% aproximadamente o quizá mayor, siendo el servicio hídrico disponible de $22.45 \text{ m}^3/\text{habitante/año}$. Todo lo anterior se deriva del inevitable crecimiento poblacional, situación que no puede ser detenida.

Lo anterior va acompañado de una inadecuada planeación a futuro, por parte de las autoridades locales, la limitada participación de la ciudadanía (planeación familiar, cultura del agua, uso eficiente del recurso, etc.), inaplicabilidad de la normatividad establecida en la materia, falta de implementación de estrategias para la utilización de las aguas residuales, limitada aplicación del pago por servicios ambientales hidrológicos para asegurar la permanencia del recurso, etc.

La disponibilidad del recurso hídrico para la localidad de Tlaxco, se deriva del cálculo del Balance Hídrico realizado en la microcuenca del río Zahuapan, ubicada en la parte alta de la zona. Dicho balance a través de sus componentes (precipitación, intercepción, infiltración, evapotranspiración real, escurrimiento superficial y recarga subterránea), muestra la distribución del activo hídrico, lo que permite tomar decisiones inmediatas o a futuro en relación con los recursos naturales presentes en la región y en particular conocer el estado actual de la disponibilidad del recurso hídrico.

En el área de influencia de la microcuenca del río Zahuapan, la precipitación media es de 780 mm, según la estación meteorológica Tlaxco (clave: 29032); pero los datos considerados de 1997 a 2001, dieron como resultado una precipitación media de 668.5 mm, derivado de la evidente influencia del cambio climático; el área de la microcuenca

⁹ Disponibilidad de agua derivada de dividir el total de agua extraída de los pozos entre el número de habitantes.

es de 2,223.54 hectáreas, multiplicando la precipitación media convertida en metros 0.6685 por la superficie de la microcuenca en metros cuadrados 22,235,400, lo que representó entradas de agua a la microcuenca de **14,864,364.9 m³/año**.

Parte del agua precipitada en la microcuenca queda retenida, por el fenómeno de intercepción de la vegetación expresado en porcentaje de cobertura, donde áreas forestales y pastizales, se consideraron que interceptan la lluvia en cualquier época del año, por su condición de perennes, mientras que la agricultura sólo lo hace en la temporada de establecimiento del cultivo, misma que coincide con la temporada de lluvias. Los datos se obtuvieron por rodal multiplicando la precipitación por rodal por el porcentaje de cobertura del mismo y el resultado se multiplicó por un coeficiente de intercepción establecido para cada tipo de vegetación, sumando un total de agua interceptada en la microcuenca de **1,808,610.95 m³/año**, lo que equivale al **12.2%** del total del agua precipitada.

El agua que no fue retenida por el dosel llega a la superficie del suelo, de la cual un porcentaje se incorpora al proceso de infiltración, componente del balance hídrico estimado a partir de la derivación y adaptación de parámetros (textura del suelo, gradiente hidráulico, velocidad de descarga y coeficiente de permeabilidad) y fórmulas ya existentes (el caso de la Ley de Darcy y el método de Green-Ampt). Las fórmulas obtenidas permitieron estimar la infiltración por tipo de uso del suelo de manera más aproximada a la realidad, pues se obtuvo a partir del cálculo del volumen infiltrado en el área de espacios porosos del suelo (m³/hr/ha), un tiempo efectivo de infiltración (hr/día) y la precipitación efectiva en la temporada de lluvias en días. Obtenidos los datos anteriores se multiplicó el área por tipo de uso de suelo (has), por el área de espacios porosos del suelo (has), dando un volumen infiltrado en la microcuenca de **1,111,719.45 m³/año**, siendo apenas el **7.5%** del total de la precipitación.

Parte de la cantidad de agua interceptada en la cobertura vegetal, la que llega a la superficie del suelo y la que se infiltra, se pierden por el fenómeno de

Evapotranspiración Real, determinado por el método de Blanney-Criddle. Valor que indicó la pérdida real aproximada de **304.5 mm/año**.

Con los valores de ETP y ETR se determinó el valor del Coeficiente Ponderado de Evapotranspiración que fue de **0.44**, el cual multiplicado por la precipitación total en la microcuenca (14,864,364.9), resulta una pérdida de agua de **6,540,320.6 m³/año** por efecto de la Evapotranspiración Real, lo que representa el **44.1%** del total del agua precipitada.

El escurrimiento superficial, fue determinado por el Método de las Curvas Numéricas, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (1964), perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y adoptado por la CONAFOR en el 2004. Este es un método que genera datos apegados a la realidad, pues se derivó de una serie de experimentos realizados en cuencas de los Estados Unidos, por lo que su metodología se establece a partir de ese principio.

Aplicando la metodología de las curvas numéricas, primero se obtuvo el coeficiente parcial de escurrimiento para cada tipo de uso del suelo, después se multiplicó por la superficie de cada uno de estos y finalmente se multiplicó por la precipitación media anual en metros (0.6685), para obtener el escurrimiento medio en m³/año. El valor total del escurrimiento medio en la microcuenca fue de **4,668,156.9 m³/año**, cantidad de agua que se pierde por este proceso y que equivale al **31.1%** del total precipitado.

La recarga subterránea, obtenida a partir de información proporcionada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tlaxco (CAPAT). El aprovechamiento del agua se realiza en tres pozos ubicados en la localidad de Tlaxco, con un funcionamiento diario de 11 horas en promedio cada uno, durante los 365 días del año, con un volumen anual extraído de **480,924 m³/año**, cantidad que abastece la demanda y que representa apenas el **3.3%** del total del agua precipitada.

Existe una cierta cantidad de agua, que queda retenida en el suelo, por efecto de procesos relacionados con las condiciones de los suelos, los estratos geológicos y la acción de las raíces de las plantas al intentar absorber el agua suspendida en los intersticios o espacios vacíos del suelo, agua que no es aprovechada pero que se encuentra en el subsuelo; la estimación del agua que está retenida fue de **254,633.05 m³** la cual puede estar distribuida en toda la microcuenca y que representa el **1.8%** del agua precipitada.

La microcuenca del Río Zahuapan es la principal receptora, reguladora y abastecedora de agua en la zona, ya sea de manera superficial o subterránea, para el funcionamiento del ecosistema y para el consumo humano, por ello la necesidad de conocer las acciones adecuadas que se deben llevar a cabo en torno a su manejo, para asegurar su permanencia.

Las actividades que actualmente se realizan en la microcuenca como el aprovechamiento de recursos forestales maderables y no maderables, tienen un impacto medianamente significativo en la alteración del ecosistema y la regulación del balance hídrico, pues las condiciones de la zona en los últimos 10 años se han mantenido casi iguales. Los métodos de aprovechamiento maderable se aplican con intensidades de corta del 35% generalmente, salvo aquellos casos en los que el programa de manejo plantea un tratamiento más agresivo como puede ser una corta de regeneración con intensidades de corta entre el 80% y 90%.

Con lo anterior el manejo del bosque se encuentra en un margen aceptable, haciendo a un lado la idea equivocada de que la mejor manera de mantener los ecosistemas es limitando su aprovechamiento, puesto que trabajando de forma sustentable, se generan beneficios sin alterar el medio y se mantienen las condiciones necesarias de la microcuenca para la captación de agua.

El manejo de la microcuenca tiene un impacto directo en el balance hídrico, pues éste es indispensable en las funciones del ecosistema y actividades humanas, en el caso de la

microcuenca del río Zahuapan las principales pérdidas del activo hídrico son por evapotranspiración real, escurrimiento superficial e intercepción del dosel vegetal, representando alrededor del 88% del total de la precipitación, mientras que el 12% restante se divide en la infiltración, recarga subterránea y el agua retenida en el suelo.

El efecto de la intercepción del dosel vegetal y las propiedades físicas del suelo, sin duda juegan un papel básico en la captación de agua, el primero como regulador de la cantidad de agua que llega al suelo (dependiendo del tipo de vegetación y porcentaje de cobertura), y el segundo como filtro que dependiendo de sus características particulares (textura, estructura, densidad aparente, volumen poroso, etc.), permite al agua llegar a las fuentes de almacenamiento (acuíferos), y convertirse en activo hídrico disponible para ser aprovechado.

El balance hídrico es sin duda la principal herramienta para saber que cantidad del recurso está disponible para ser aprovechada, y en la microcuenca del Río Zahuapan alrededor del 5% del total del agua precipitada, es el activo hídrico que puede ser aprovechado. Mientras que el 31% se pierde por escurrimiento, y que puede ser aprovechada implementando algunas estrategias de captación de aguas superficiales.

Aspectos Económicos.

La valoración económica del recurso hídrico en la zona, se llevó a cabo a través del método de costos de sustitución o costos de oportunidad, se comparó con el ingreso que se obtiene por la venta de un metro cúbico de madera rollo total árbol, el cual fue de **\$2,661.50**, monto que el dueño dejaría de percibir si su terreno lo destina a la generación de servicios ambientales manteniendo la cobertura a una densidad del 75% cuando menos, y que tendría que ser cubierto por los usuarios, microcuenca abajo, que se benefician de los múltiples servicios generados (producción de agua, control de inundaciones y sedimentación de la presa Atlangatepec, belleza escénica, recreación, captura de carbono, etc.).

Respecto a lo anterior, no se puede ir a los extremos, aprovechar el bosque sólo con fines maderables o destinarlo exclusivamente a la producción de servicios ambientales, sino que se debe encontrar un equilibrio, donde se pueda realizar un aprovechamiento maderable sustentable, con intensidades de corta entre 25 y 30%, manteniendo una cobertura del 75 o 70%, suficiente para no alterar el ecosistema y mantener la función de los servicios ambientales, lo que a los dueños o poseedores representaría una alternativa más atractiva, obteniendo ingresos económicos por la extracción de madera y la permanencia de su bosque al generar múltiples bienes y servicios.

También se aplicó el método directo de valoración contingente, por medio de encuestas aplicadas a los usuarios del recurso hídrico. Esta prueba arrojó datos interesantes, en primer lugar, la limitada disposición de la gente a responder los cuestionarios, ya que en cuanto se mencionaba el tema del agua, mostraban desconfianza pensando que con ello se daría pie a elevar las cuotas del pago de agua doméstica. De las personas que si aceptaron responder la encuesta el 80% mostró una disponibilidad a pagar una cuota adicional mensual por concepto de mantenimiento de la microcuenca con montos entre los **5 y 50 pesos mensuales**.

Si se recaudara el dinero por concepto de incentivos para Pago por Servicios Ambientales, de acuerdo a lo establecido por la gente encuestada, al multiplicar los **5 pesos** que fue la cantidad mínima a pagar, por el número de tomas (**2800**) de agua existentes, los ingresos mensuales serían de **\$14,000** y al año de **\$168,000**.

En contraste con la cantidad máxima de **50 pesos** que algunos encuestados estaban dispuestos a pagar, al multiplicarlo por las **2800** tomas existentes, se generarían ingresos mensuales de **\$140,000 (\$16,800,000 anuales)**, cantidad que podría ser destinada al pago de servicios ambientales, y para la conservación, restauración y recuperación al 100% de las áreas degradadas (95.53 has), de la microcuenca.

Pero si se ubica un punto medio y se considera un monto de **20 pesos** para el cobro de servicios ambientales hidrológicos, mensualmente se recaudaría una cantidad de **\$56,000** y al año de **\$672,000** que se destinarían directamente a un fondo de desarrollo forestal, realizando actividades de brechas corta fuego, restauración de las áreas degradadas (reforestación y prácticas de conservación de suelos), y mantenimiento de la zona boscosa de la microcuenca, ya que si se repartieran los \$672,000 en el número de hectáreas boscosas (1540 ha), la cantidad es muy baja por hectárea al año, sólo \$436 monto que no representa ingresos significativos a los dueños del bosque.

En Tlaxco la operación de los tres pozos representa un gasto mensual de \$190,000 distribuido en \$120,000 para pago de luz y \$70,000 para cubrir gastos administrativos y operativos. Por lo tanto el gasto anual es de \$2,280,000 por concepto de suministro del recurso a la población.

Los costos no son cubiertos en su totalidad, pues con el cobro de una cuota anual de \$550 que multiplicada por el número de tomas de agua (2800), apenas se recauda \$1,540,000 (asumiendo que todos pagan su cuota), cantidad que no cubre el gasto total y se genera una pérdida de \$740,000 cantidad que debería ser cubierta a través del cobro de una cuota anual de \$815 lo que apenas cubrirá en su totalidad los gastos para abastecimiento del vital líquido.

Aspectos Normativos.

En el marco de políticas públicas existen los instrumentos regulatorios necesarios en materia de agua (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ley Nacional de Aguas, NOM-011-CNA-2000, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, etc.), pero falta fortalecer esa interacción con la sociedad y alcanzar el máximo beneficio en la aplicación de la normatividad, buscando el equilibrio entre la parte gobernadora y la gobernada, con un solo propósito, asegurar la existencia del recurso bajo un esquema de uso eficiente, conciencia social, ambiental y desarrollo sustentable.

En el caso de los organismos gubernamentales es un problema frecuente el establecimiento de tarifas por concepto de agua, ya que generalmente es subsidiada por el gobierno federal, adquiriendo el carácter de bien social, lo que en ocasiones genera la inconformidad de la gente a pagar una cuota establecida por suministro del recurso, provocando grandes pérdidas de dinero el cual se recauda en su mayoría para solventar los gastos que genera el suministro del agua o que bien pueden ser destinados a realizar otro tipo de obras que requiera la población.

Una alternativa para el establecimiento de tarifas es la generación de mercados para el agua, diferenciando cada uno de los sectores a los que se les suministraría el activo hídrico (consumo doméstico, industria o comercio y agricultura), pues en el consumo doméstico sólo se usa para satisfacer las necesidades de la población y no tiene el carácter de insumo de la producción, mientras que en la agricultura, industria o comercio, su uso generalmente es como insumo en la producción de un determinado producto o mercancía. Lo que muestra una marcada inequidad en el uso y pago del recurso, y que a final de cuentas quienes lo usan como insumo de la producción pueden estar pagando una tarifa igual o menor que aquellos que sólo lo usan para satisfacer sus necesidades básicas, lo cual resulta injusto e inequitativo.

La propuesta de mercados para el agua, puede minimizar el problema de sobreexplotación, contaminación de fuentes de agua (acuíferos, ríos, lagos), y deterioro del ambiente, orillando a los usuarios a realizar un uso eficiente y racionado del recurso. Esto se explica de la siguiente manera, en el caso de la sobreexplotación del recurso, quien consuma más agua, pagará más, y esto disminuye la presión sobre las fuentes abastecedoras, la cantidad de agua contaminada por consiguiente se reduce y el impacto al ambiente se minimiza.

Las aguas residuales (del 100% del agua extraída de los pozos, alrededor del 60% se convierte en aguas grises), también juegan un papel importante en la implementación de mercados para el agua, pues si se someten a un tratamiento de purificación antes de ser desechadas por completo, ésta agua podrá ser utilizada en otras actividades (secundarias)

como para riego de jardines y zonas agrícolas, lavados de autos, e inclusive para lavar pisos y el sanitario, lo que resulta un mercado alternativo al cual se le puede vender ésta agua tratada, o en el último de los casos si no puede incorporarse a un mercado, ésta será regresada al ambiente con un nivel menor de contaminación.

Por el contrario, al no someter las aguas residuales a un tratamiento, se desechan con altos niveles de contaminación lo que afecta al medio ambiente, y una alternativa de regular esta medida, sería a través del cobro de una tarifa por desecho de aguas contaminadas, pero que a final de cuentas el costo de oportunidad de abatir la contaminación en el medio ambiente, esta muy por arriba de la tarifa a cobrar por permitir descargar las aguas contaminadas. Esta es una de las políticas que actualmente esta vigente y que no ha dado resultado, pues el dinero recaudado es destinado a otras actividades, excepto para limpiar el ambiente, y aunque así fuera no sería suficiente para revertir el daño ya existente.

No hay que perder de vista que si bien los mercados para el agua representan una solución a la sobreexplotación y uso eficiente del recurso, el origen de estos parte del esquema de “libre mercado” o “neoliberal”, lo que indica que su participación en materia de agua debe estar estrictamente regulada y definir un umbral que no rebase el poder adquisitivo de la sociedad.

Es evidente que la tendencia del manejo del agua, pudiera enfocarse a ceder o concesionar los sistemas de abastecimiento de agua y alcantarillado a empresas privadas, ante la ineficiencia de las instituciones federales, estatales y municipales en manejar de manera eficiente y estricta el tema del agua, y la poca conciencia de los ciudadanos en el uso y manejo del mismo, generando así su propio Apocalipsis en materia de agua, que una vez presente ya no habrá marcha atrás.

Limitaciones del estudio

La escasez de información es una limitante para la elaboración de cualquier trabajo, y para la presente investigación no fue la excepción, pues la falta de datos pluviométricos o meteorológicos, limitó la investigación a trabajar con datos existentes hasta el año de 2001, que fue la fecha hasta que trabajó la estación meteorológica de Tlaxco y en general, casi todas las estaciones meteorológicas del país, por lo que aunque exista la buena intención de hacer trabajos de calidad, sólo se queda en eso, en una buena intención

Finalmente, este tipo de trabajos representan la base para la toma de decisiones en la planeación y manejo de los recursos naturales, que sin duda son la principal fuente de oferta de bienes y servicios para el ser humano. Pero la parte lamentable es el poco interés de los gobiernos locales y el nulo apoyo financiero para la realización de investigaciones de este tipo, sino que generalmente son impulsados por instituciones de educación superior o centros de investigación, quienes que con otra perspectiva de la problemática social del país, atienden y abordan los diferentes temas relacionados con el desarrollo económico, político, social, agrícola y ambiental de la nación.

10. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ALBERTANI, C. 2004. **Globalización y guerras del agua en México**. Universidad de la Ciudad de México. 12 p.
- ÁLVAREZ, R. R. 1982. **El Método de “Desarrollo Silvícola” una Alternativa en la Silvicultura de Ordenación de Bosques**. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 86 p.
- APARICIO, M., F. 2005. **Fundamentos de hidrología de superficie**. Ed. Limusa, México, D.F. 291 p.
- BARRANTES, G. 2000. **Aplicación de Incentivos a la Conservación de la Biodiversidad en Costa Rica**. Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) y Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE). 28 p.
- BARRANTES, G. y VEGA, M. 2002. **Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque y su aplicación al ajuste de tarifas**. Asociación para el Desarrollo del Área de Conservación Tempisque (ASOTEMPISQUE). Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS). Heredia, Costa Rica. 102 p.
- BARZEV, R. 2000. **Estudio de valoración económica de la demanda hídrica del bosque que nace de la fuente del Río Chiquito (Finca El Cacao, Achuapa) – Implementación de mecanismos de Pagos por Servicios Hídricos**. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Latina Central (PASOLAC). Achuapa. 17 p.
- BECERRA, M. A. 2005. **Escorrentía, erosión y conservación de suelos**. Universidad Autónoma Chapingo. México. 122-128 Pp.
- CANTÚ, M. y GARDUÑO, H. 2003. **El agua en México**. Documento FAO. En: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/006/Y5062S/y5062s08.htm (21/11/05)
- CANTU, S., I. y GONZÁLEZ, R., H. 2002. **Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pino-encino en el Noreste de México**. Revista Ciencia UANL. (5): 1:72-77
- CARBONELL, M. 2005. **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**. Leyes y Códigos de México. 151ª. Edición actualizada. Ed. Porrúa. México, D.F. 29-32 Pp.
- CFE. 1981. **Manual de diseño de obras civiles**. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. 70 p.
- CHANG, M. 2003. **Forest hydrology: an introduction to water and forest**. CRC Press LLC. E.U. 131-150 Pp.

- CNA. 1992. **Ley de Aguas Nacionales**. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. 92 p.
- CNA. 2001. **NOM-011-CNA-2000 “Conservación del Recurso agua”**. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. 22 p.
- CNA. 2005. **Estadísticas del agua en México. Síntesis**. Comisión Nacional del Agua – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera Edición. México. 7-43 Pp.
- CNA. 2005. **Resumen del Huracán “Stan” del Océano Atlántico**. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General técnica. Unidad del Servicio Meteorológico Nacional. México. 4 p.
- CNA. 2005. **Resumen del Huracán “Wilma” del Océano Atlántico**. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General técnica. Unidad del Servicio Meteorológico Nacional. México. 5 p.
- CNA. 2006. **El agua en México**. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. 33 p.
- CONAFOR. 2003. **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su Reglamento**. Comisión Nacional Forestal – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, Jalisco, México. 159 p.
- CONAFOR. 2004. **Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas** Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 26-33 Pp.
- CONAFOR. 2005. **Proyecto Servicios Ambientales del Bosque: Desarrollo de mercados locales en servicios ambientales como instrumentos privados para la conservación**. Seminario de Servicios Ambientales. Morelia, Michoacán, México. 44 p.
- CONTRERAS, M., J. 2003. **Futuro prometedor para el mercado de servicios ambientales en México**. Revista Forestal XXI (6) 5:27-28.
- CUSTODIO, E. y RAMON, M. 1983. **Hidrología subterránea**. Segunda Edición. Editorial Omega. Barcelona, España. 299-349 Pp.
- EL UNIVERSAL. 2005. **Aumenta a 219 el número de muertos por Stan**. Octubre 7. p. A6.
- FERREIRO, A. 1994. **Análisis económico y gestión de recursos naturales**. Ed. Alianza, S. A. 376 p

- FREEMAN, A. M. 1994. **Valoración de los Recursos Ambientales**. Recursos para el futuro. Washington, D.C., E.U.
- GONZÁLEZ, V. L. I. 2004. **Ingeniería Geológica**. Ed. Pearson, Prentice Hall. Madrid, España. 264-276 Pp.
- GUROVICH, L. 1985. **Fundamentos y diseño de sistemas de riego**. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición. San José, Costa Rica. Capítulo 6. 143-168 Pp.
- HEINKE, W. y H. GLYNN. 1996. **Ingeniería Ambiental**. 2da. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 395 p.
- HEWLETT, D., J. 1982. **Principles of forest hydrology**. University of Georgia Press. E.U. 25-39 Pp.
- HEYNE, P. 1998. **Conceptos de Economía "El mundo según los economistas"**. Octava Edición. Ed. Prentice Hall, Madrid, España. 42-51 Pp.
- INEGI. 1988. **Síntesis Geográfica de los Municipios del Estado de Tlaxcala**.
- INEGI. 1990. **Perfil Sociodemográfico del Estado de Tlaxcala**. Censo de Población y Vivienda. Aguascalientes, México. 1-9 Pp.
- INEGI. 1995. **Perfil Sociodemográfico del Estado de Tlaxcala**. Censo de Población y Vivienda. Aguascalientes, México. 1-40 Pp.
- INEGI. 2000. **Perfil Sociodemográfico del Estado de Tlaxcala**. XII Censo de Población y Vivienda. Aguascalientes, México. 4-12 Pp.
- INEGI. 2006. **II Censo de Población y Vivienda 2005**. Aguascalientes, México.
En: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/conteos/conteo2005/default.asp?c=6224>
- KRAMER, J. P. 1974. **Relaciones hídricas de Suelos y Plantas**. Una síntesis moderna. Ed. Edutex, S. A. México, D.F. 336-391 Pp.
- LA PRENSA. 2005. **Dañó el meteoro 11 de 19 áreas naturales protegidas: Luege T.** Octubre 24. p. 2.
- LA PRENSA. 2005. **Furia del huracán destrozó en 58 horas el Caribe Mexicano.** Octubre 24. p. 2.
- LEE, R. 1980. **Forest hydrology**. Columbia University Press. New York Guilford, Surrey. 111-129 Pp.

- LEUSCHNER, A. W. 1990. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. John Wiley and sons, Inc. E.U.A. 8 Pp.
- MADEREY, R., L. E. y JIMÉNEZ, R., A. 2005. **Principios de hidrogeografía**. Serie de Textos Universitarios, Núm. 1. Instituto de Geografía, UNAM, México. 100 p.
- MENDEZ, M., J. S. 1997. **Fundamentos de Economía**. Tercera Edición. Ed. McGraw-Hill. México, D.F. 79-151 Pp.
- MILENIO. 2005. **Daños irreversibles en toda la Riviera Maya**. Octubre 24. p 4.
- MONSALVE, S. G. 1998. **Hidrología en la Ingeniería**. Segunda Edición. Ed. Alfaomega. 145-150 Pp.
- MONTESILLO, C. J. L. 2003. **Precio de eficiencia social para el agua de riego en México: el caso de los distritos de riego pertenecientes a las regiones administrativas II, VIII y XII**. Tesis doctoral, CIESTAAM. Universidad Autónoma Chapingo, México. 113-119 Pp.
- NANÍA, S. L. 2002. **Apuntes: La Cuenca y los Procesos Hidrológicos**. Estudios Técnicos Superiores de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. España. 38-42 Pp.
- NARRO, F., E. 1994. **Física de suelos con enfoque agrícola**. Primera Edición. Editorial Trillas. México, D.F. 33-58 Pp.
- OROSCO, P., L. 2003. **Valoración Económica Preliminar de Servicios Hidrográficos en la Cuenca Alta del Río Zahuapan, Tlaxco, Tlaxcala**. Chapingo, México. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Forestal. UACH. 76 p.
- ORTIZ, S. C. A. 1987. **Elementos de Agrometeorología Cuantitativa**. 3ra. Ed. Departamento de Suelos. UACH. 187 – 188 Pp.
- ORTIZ, S. C. A. y ORTIZ, V. B. 1990. **Edafología**. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, México. 394 p.
- PIZARRO, R., *et al.* 2001. **Manejo forestal orientado a la producción de recursos hídricos**. XVIII Jornadas Forestales. Colegio de Ingenieros de Chile. Temuco, Chile. 11 p.
- PNUMA. 2000. **Perspectivas del medio ambiente mundial**. Ed. Mundi -Prensa. 20 p.
En: <http://www.unep.org/Geo2000/ov-es.pdf>
- PUENTE, G. A. 2005. **Evaluación de la demanda por Servicios Ambientales Hidrológicos: El Caso Río Conchos**. Seminario de Servicios Ambientales. Morelia, Michoacán, México. 47 p.

- PRITCHETT, W. L. 1986. **Suelos Forestales: Propiedades, Conservación y Mejoramiento**. Editorial Limusa. Primera Edición. D. F. México. Pp. 193-212.
- RAMÍREZ, R. R. 2005. **La problemática global del agua**. 12 p.
En: <http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua/problemadelagua.shtml>
(07/09/05)
- RAMOS, O. S. 2006. **Mercados de Agua**. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México. 142 p.
- ROWE, L. K. 1983. **Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zeland**. Journal of Hydrology. (66): 143-158.
- SARH-Subsecretaría Forestal. 1989. **Guía Técnica para la aplicación del Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola**. Dirección General Forestal. México, D.F. 48 p.
- SÁNCHEZ, S. F. J. 2001. **Apuntes de Hidrología**. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España. 1-6 Pp.
En <http://web.usal.es/javisan/hidro> (07/09/05)
- SÁNCHEZ, V. A. 1987. **Conceptos Elementales de Hidrología Forestal**. Vol. I. División de Ciencias Forestales. UACH. Chapingo, México. 143 p.
- SEMARNAP. 1998. **Bases científicas para la elaboración de programas de manejo forestal en bosques de coníferas con fines de producción**. Subsecretaría de recursos Naturales. Dirección General Forestal. México, D.F. 141 p.
- SÍNTESIS. 2005. **2 millones de afectados por Stan**. Octubre 9. p.1.
- TARBUCK, E. J. y LUTGENS, F. K. 1999. **Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física**. Ed. Prentice Hall. Madrid, España. 243-265 Pp.
- VÁZQUEZ, S. M. A. 2001. **Políticas públicas ambientales. Una reflexión**. Las políticas públicas y los compromisos de la investigación. División de Conservación de la Biodiversidad. ECOSUR. 3 p.
- VÉLEZ, O. M. V. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia. Unidad de Hidráulica.
<http://www.worldwaterforum4.org.mx/home/genwwf.asp?lan=spa> (25/10/05)
- CINU, 2000. Cambio climático
http://www.cinu.org.mx/temas/des_sost/camclim.htm
- TIERRAMERICA. 2005.
http://www.tierramerica.net/agua_2002/index.shtml

INFOFORHEALTH, 2005

<http://www.infoforhealth.org/pr/prs/sm14edsum.shtml>

ANEXOS

Tabla 1. Valores del Coeficiente global de desarrollo Kg.

Cultivo	Ciclo vegetativo	Coeficiente global Kg
Aguacate	Perenne	0.50 - 0.55
Ajonjolí	3 a 4 meses	0.80
Alfalfa	Entre heladas	0.80-0.85
	En invierno	0.60
Algodón	6 ó 7 meses	0.60-0.65
Arroz	3 a 5 meses	1.00-1.20
Cacahuete	5 meses	0.60-0.65
Cacao	Perenne	0.75-0.80
Café	Perenne	0.75-0.80
Camote	5 a 6 meses	0.60
Caña de azúcar	Perenne	0.75-0.90
Cártamo	5 a 8 meses	0.55-0.65
Cereales de grano pequeño (alpiste, avena, cebada, centeno, trigo)	3 a 6 meses	0.75-0.85
Cítricos	7 a 8 meses	0.50-0.65
Chile	3 a 4 meses	0.60
Espárrago	6 a 7 meses	0.60
Fresa	Perenne	0.45-0.60
Frijol	3 a 4 meses	0.60-0.70
Frutales de hueso y pepita (hoja caduca)	Entre heladas	0.60-0.70
Garbanzo	4 a 5 meses	0.60-0.70
Girasol	4 meses	0.50-0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0.60
Haba	4 a 5 meses	0.60-0.70
Hortalizas	2 a 4 meses	0.60
Jitomate	4 meses	0.70
Lechuga y col	3 meses	0.70
Lenteja	4 meses	0.60-0.70
Maíz	4 meses	0.60-0.70
Maíz	4 a 7 meses	0.75-0.85
Mango	Perenne	0.75-0.80
Melón	3 a 4 meses	0.60
Nogal	Entre heladas	0.70
Papa	3 a 5 meses	0.65-0.75
Palma datilera	Perenne	0.65-0.80
Palma cocotera	Perenne	0.80-0.90
Papaya	Perenne	0.60-0.80
Plátano	Perenne	0.80-1.00
Pastos de gramíneas	Perenne	0.75
Remolacha	6 meses	0.65-0.75
Sandía	3 a 4 meses	0.60
Sorgo	3 a 5 meses	0.70
Soya	3 a 5 meses	0.60-0.70
Tabaco	4 a 5 meses	0.70-0.80
Tomate	4 a 5 meses	0.70-0.80
Trébol ladino	Perenne	0.80-0.85
Zanahoria	2 a 4 meses	0.60

Fuente: Aparicio (2005).

Tabla 2. Porciento de horas de sol mensual de acuerdo a la latitud.

Latitud Norte	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
0°	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.20	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	9.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.40	8.56	9.22	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	8.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
31	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
33	7.15	6.94	8.36	8.78	9.68	9.65	9.82	9.31	8.35	7.94	7.07	6.98
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.77	9.76	9.94	9.37	8.37	7.88	6.97	6.85
36	6.99	6.85	8.35	8.85	9.82	9.82	9.09	8.40	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.10	9.47	8.38	7.80	6.82	6.66
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	7.52
42	6.63	6.65	8.31	9.00	10.14	10.22	10.35	9.62	8.40	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.30	9.06	10.26	10.38	10.49	9.70	8.41	7.63	6.49	6.21
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.80	9.89	8.44	7.51	6.23	5.86
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.90	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.20	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.30	5.74	5.18
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.52	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12.00	11.98	10.55	8.51	7.10	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.51	6.98	5.04	4.22
Latitud Sur												
0°	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.68
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.65	7.95	8.15	8.15	8.68	8.70	9.10
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
25	9.46	8.21	8.60	7.94	7.66	7.20	7.54	7.90	8.11	8.86	9.04	9.58
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.69	7.36	6.85	7.21	7.70	8.96	9.01	9.33	9.96
34	9.92	8.45	8.64	7.64	7.27	6.74	7.10	7.63	8.05	9.06	9.42	10.08

Fuente: Aparicio (2005). (El dato utilizado fue el de Latitud Norte 19°)

Tabla 3. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelo, según Rawls, Brakensiek y Miller (1983). El número indicado es la media, mientras que los valores entre paréntesis corresponden al rango de variación.

Clase de suelo	Porosidad η	Porosidad efectiva θ_e	Altura de succión del frente de mojado ψ cm	Conductividad Hidráulica K cm/h
Arena	0.437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
Franco arenoso	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
Franco	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
Franco limosos	0.501 (0.420-0.582)	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
Franco arcillo- arenoso	0.398 (0.332-0.464)	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15
Franco arcilloso	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.10
Franco arcillo- limoso	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.347-0.517)	27.30 (5.67-131.50)	0.10
Arcilla arenosa	0.430 (0.370-0.490)	0.321 (0.207-0.435)	23.90 (4.08-140.2)	0.06
Arcilla limosa	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427-0.523)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.03

Fuente: Nanía (2002)

ENCUESTA PARA LA VALORACIÓN DE SERVICIOS HIDROGRÁFICOS EN LA
MIROCUEENCA DEL RIO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAX.

No de encuesta. _____

Fecha. _____ Nombre del encuestador. _____

Datos del entrevistado.

1. Edad. _____

2. Sexo. (M) (F).

3. Lugar de residencia.

a). Entidad Federativa _____ Municipio ó Delegación _____

4. Ocupación.

a). Estudiante ()

b). Trabajador () En donde labora. _____

5. Nivel de estudios.

a) Ninguno

b). Primaria. () grado. _____

c). Secundaria. () grado. _____

d) Nivel medio superior. () grado. _____ En. _____

e). Licenciatura. () grado. _____ En. _____

f). Postgrado. () En. _____

6. ¿Su profesión u ocupación se relaciona con los recursos naturales?

a). Si () En que forma. _____

b). No ()

7. Número de integrantes en su familia directa. _____

a). ¿cuántos integran su familia? menores de 18 años. _____ mayores a 18 años. _____

8. ¿cuántas personas lo acompañan en la visita? _____

9. ¿cuál es el gasto total de ésta visita? Incluyendo pasaje, gasolina, peaje, entrada, comida, etc. Total \$. _____

10. Motivo de su visita.

- a). Recreación. ()
- b). Salud. ()
- c). Investigación. ()

11. ¿Conoce alguna otra área boscosa alrededor de la Ciudad de México?

- a). No ()
- b). Sí ()

¿Cuáles? _____

12. ¿con qué frecuencia visita algún bosque? _____ año.

13. ¿En que época del año realiza sus visitas.?

- | | |
|-------------------|--------------|
| a). Primavera () | Verano. () |
| c). Otoño. () | Invierno () |

¿Porqué? _____

14. En su opinión ¿Qué servicios ambientales considera que se obtienen de un bosque, en particular del Desierto de los Leones?. Enumere de mayor a menor los siguientes servicios. (El Núm. 1 es el más importante).

- a). Recreación belleza escénica. ()
- b). Captación de agua. ()
- c). Habitación de flora y fauna. ()
- d). Prevención de erosión. ()
- e). Producción de oxígeno. ()

f). _____ Otros.
(especifique). _____

15. ¿Le gustaría visitar nuevamente el Parque?.

- a). Sí. ()

¿porqué? _____

- b). No. ()

¿porqué? _____

16. ¿Qué actividad le gustaría realizar en su próxima visita?.

- a). Caminar. ()
- b). Descansar. ()
- c). Acampar. ()
- d). Apreciar el paisaje (Plantas y animales). ()

- e). Día de campo con la familia. ()
f). Excursión. ()
g). Cabalgar. ()
h). Otros (Especifique).

17. ¿Qué distancia máxima estaría dispuesto a pagar para visitar el área? _____ Kms.

18. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por visitar otra vez el Parque? (Incluyendo pasaje, peaje, comida, etc.) \$ _____.

19. ¿cuánto estaría usted dispuesto a donar para apoyar la conservación de los recursos naturales? (cabe mencionar que esta pregunta es un supuesto, por lo que realmente usted no va a pagar nada). \$ _____.

20. En caso de no querer donar. ¿cuál es la razón por la que considera que no debe apoyar? _____

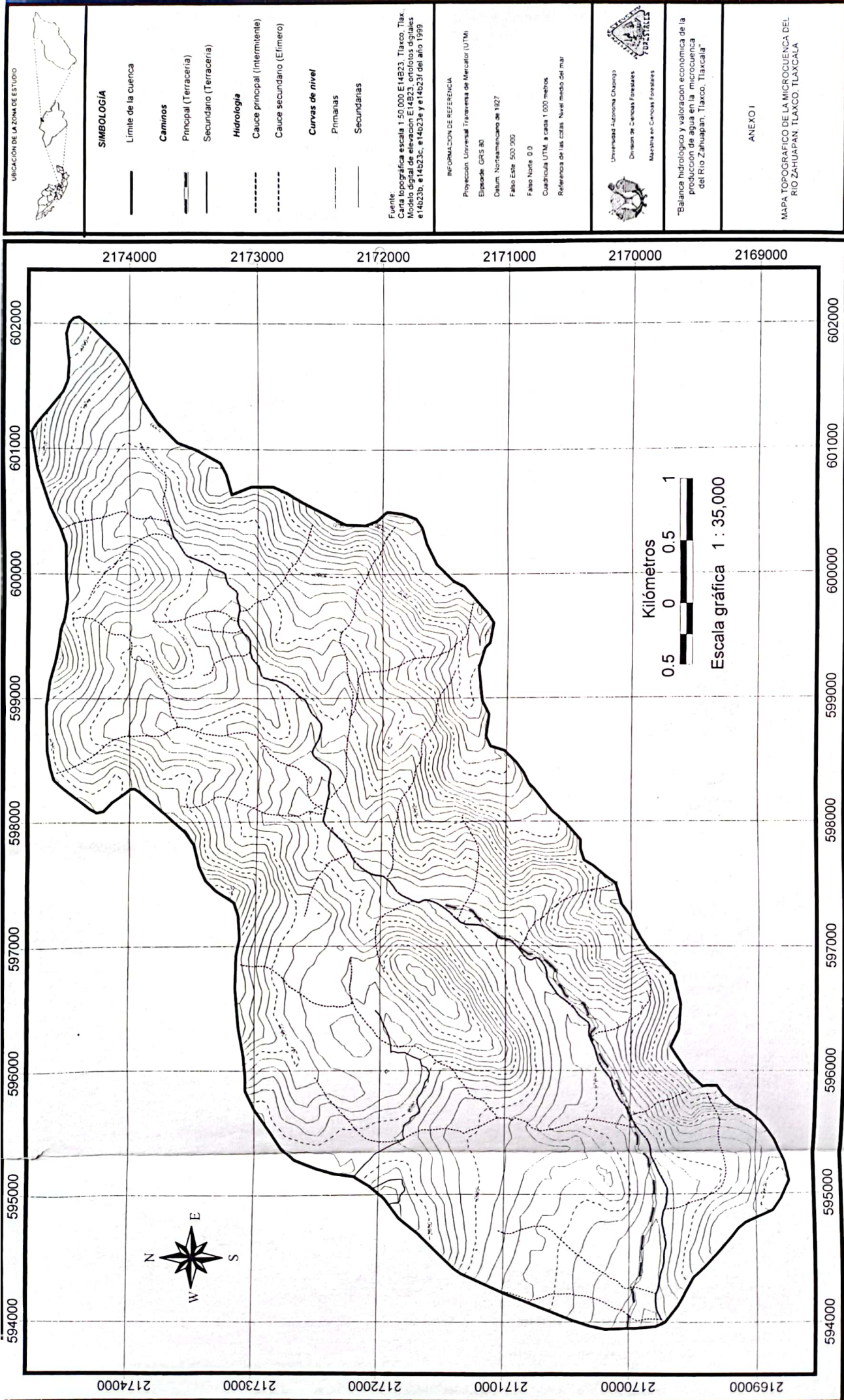
21. ¿Cuál es su ingreso mensual aproximado? (confidencial) \$ _____.



!!!!!! MUCHAS GRACIAS !!!!!!



ANEXOS CARTOGRÁFICOS



UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

SIMBOLOGÍA

— Límite de la cuenca

17 Identificador de rodal

— Caminos

— Principal (Terracería)

— Secundario (Terracería)

----- Hidrología

----- Cauze principal (Intermitente)

----- Cauze secundario (Efímeros)

Curvas de nivel

Primarias

Secundarias

Fuente: Mapa topográfico escala 1:50,000 E14823, Tlaxco, Tlax. Mapa digital de elevación E14823, contornos digitales E14823, E14823, E14823 y E14823 del año 1999

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Escala: GRS 80

Datum: Norteamericano de 1927

Falso Este: 500,000

Falso Norte: 0.0

Cuadrícula UTM: a cada 1,000 metros

Referencia de las costas: Nivel medio del mar

Universidad Autónoma Chapingo

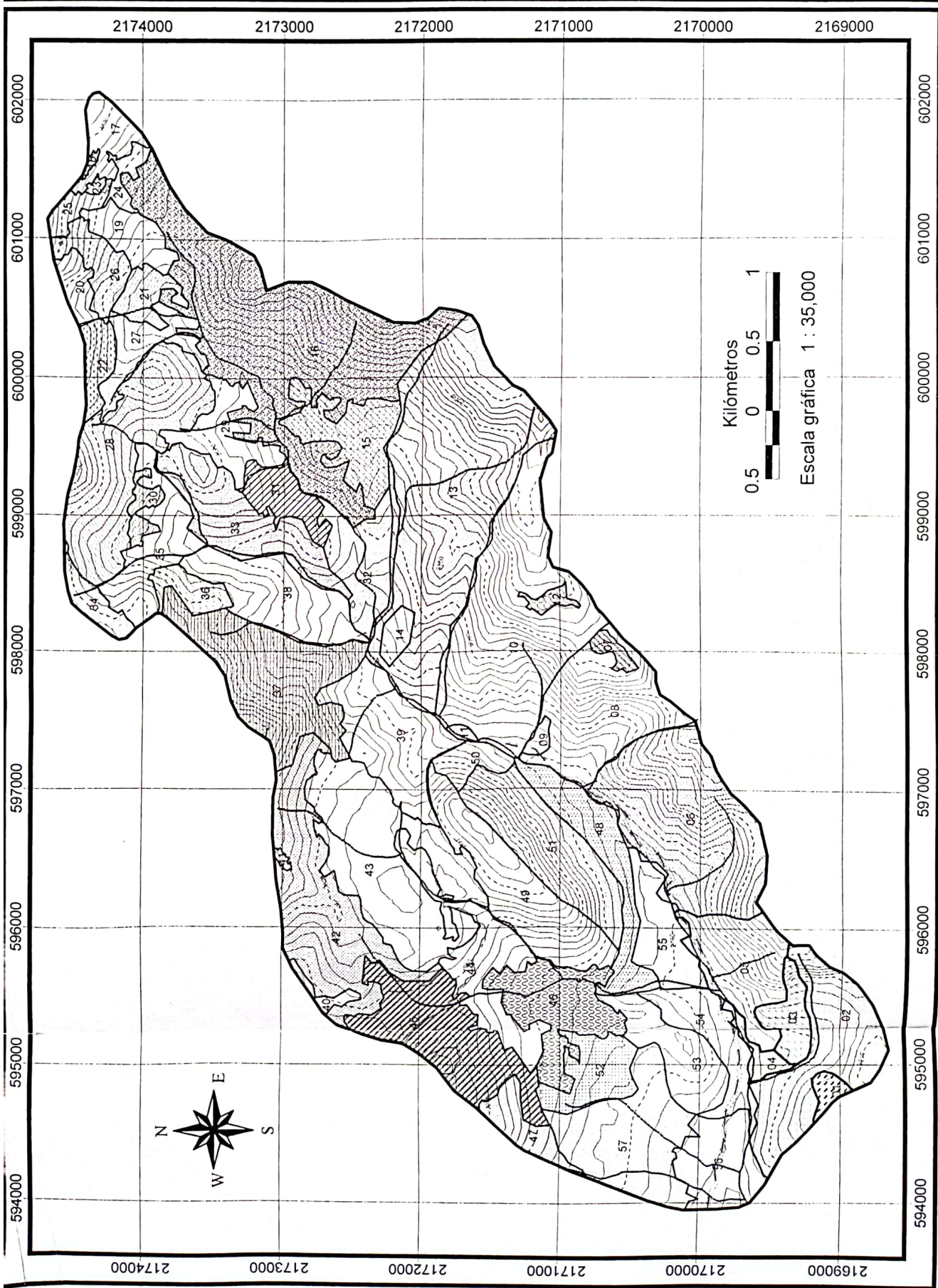
División de Ciencias Forestales

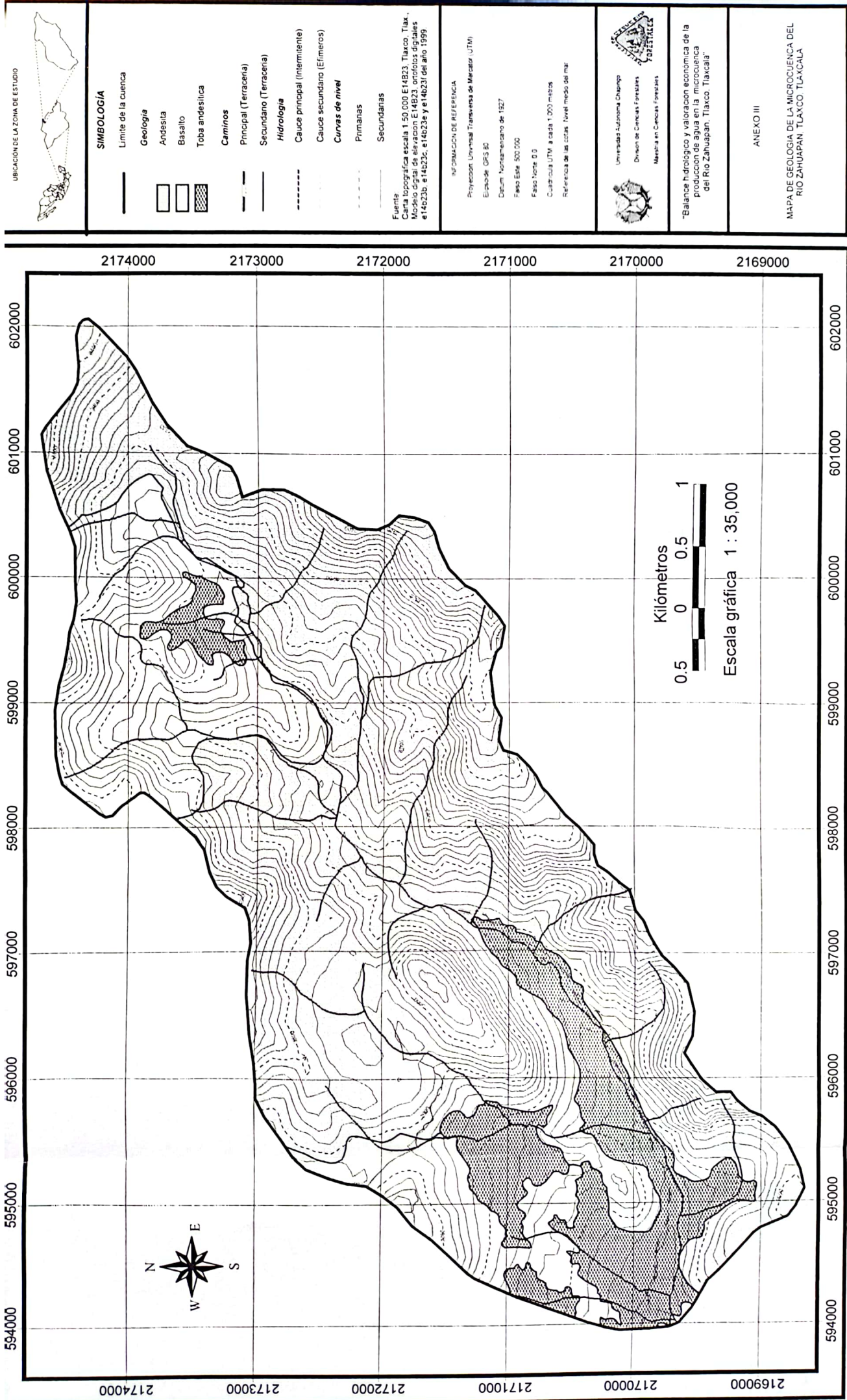
Maestría en Ciencias Forestales

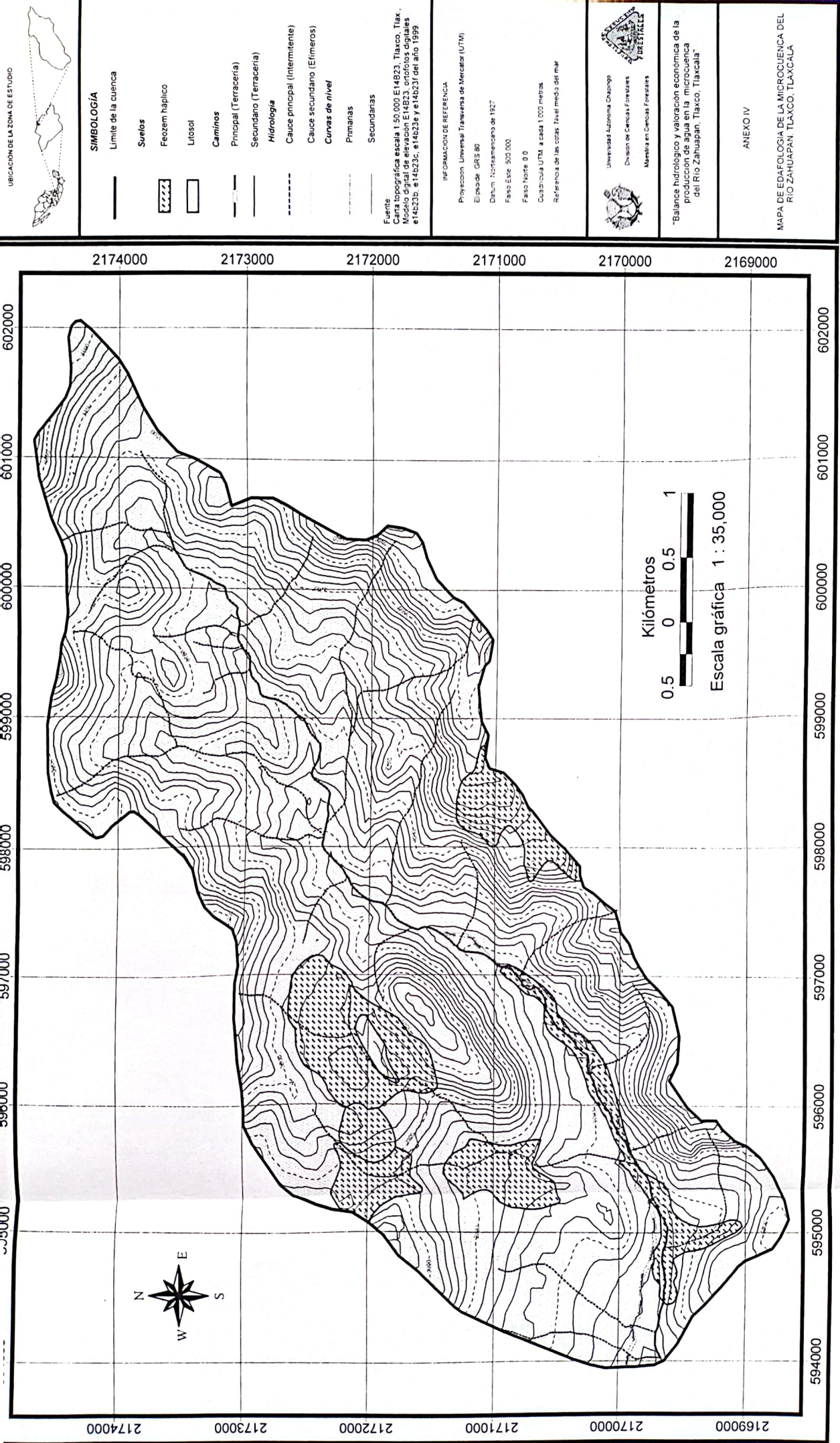
"Balance hidrologico y valoración económica de la producción de agua en la microcuenca del Río Zahuapan, Tlaxco, Tlaxcala"

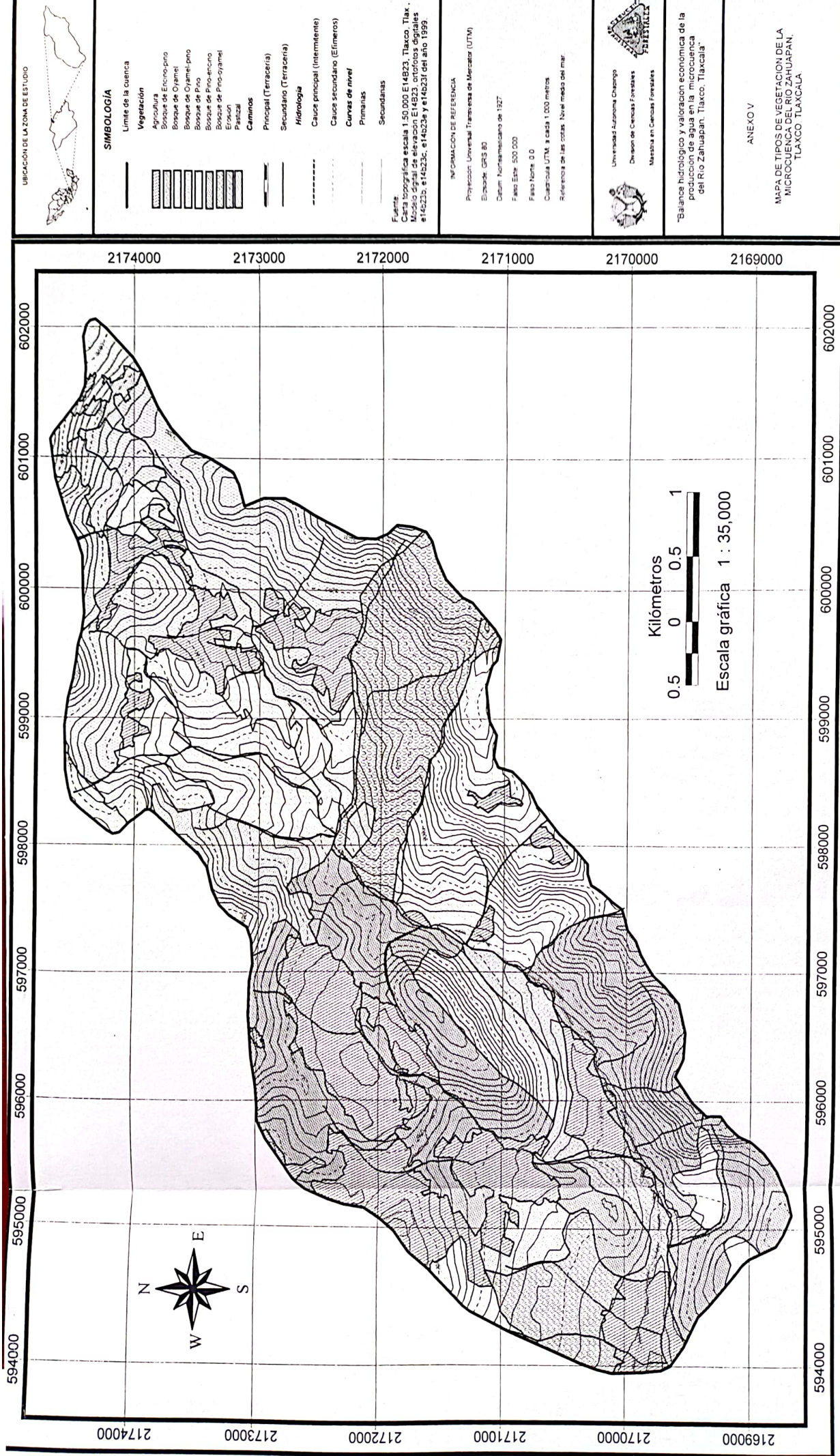
ANEXO II

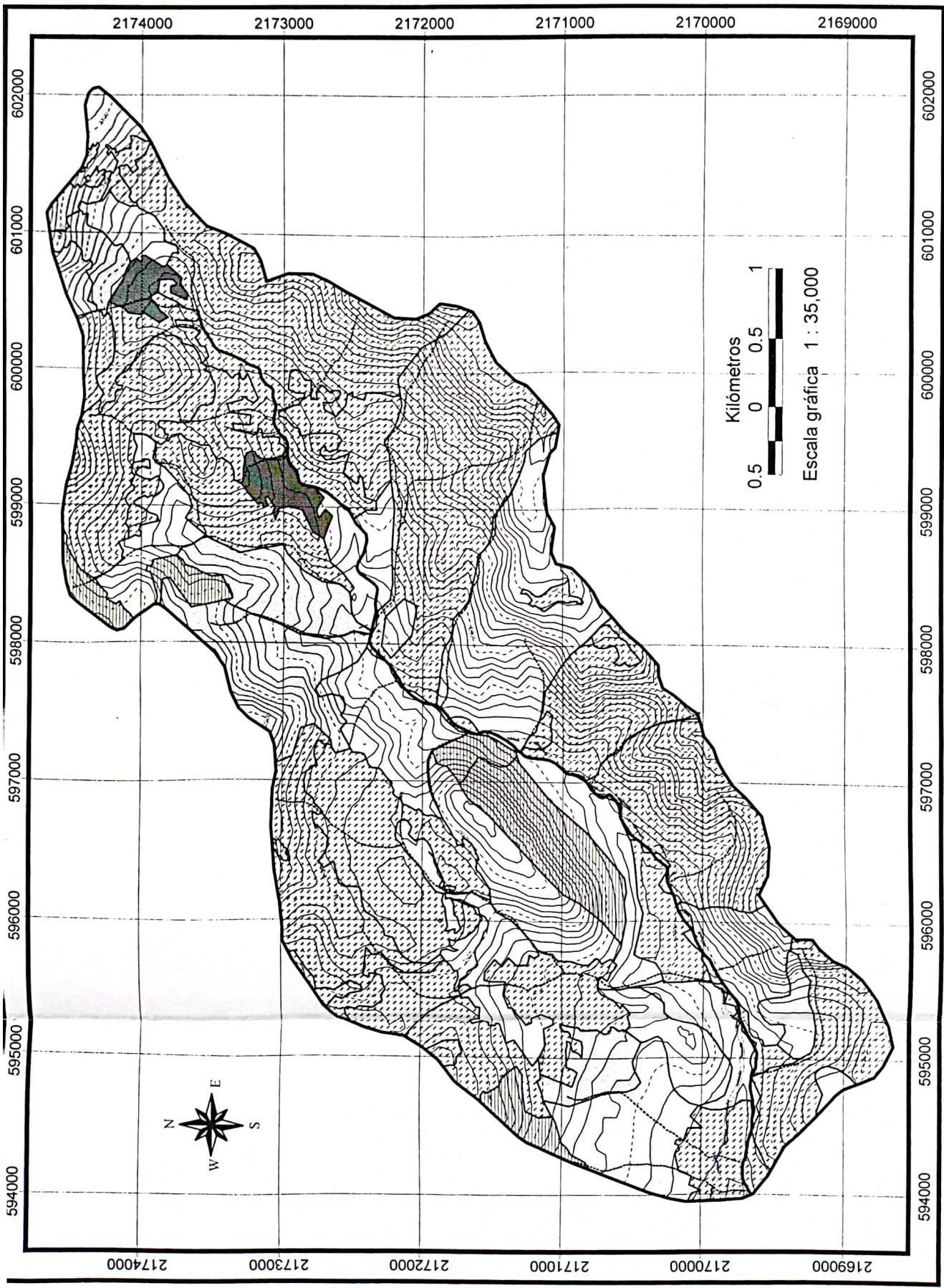
MAPA DE RODALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAXCALA











UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

SIMBOLOGÍA

Limite de la cuenca

Cobertura

- 0 - 15 %
- 15 - 30 %
- 30 - 45 %
- 45 - 60 %
- 60 - 75 %
- 75 - 90 %
- 90 - 100 %

Caminos

- Principal (Terracería)
- Secundario (Terracería)

Hidrología

- Cauce principal (Intermitente)
- Cauce secundario (Elmeroso)

Curvas de nivel

- Primarias
- Secundarias

Fuente:
Carta topográfica escala 1:50,000, E14923, Tlaxco, Tlax.
Carta digital de relieve, E14923, Tlaxco, Tlax.
Carta digital de cobertura, E14923, Tlaxco, Tlax.
E14923, E14923, E14923 y E14923 del año 1999

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Escala de GPS: 60

Datum: North American de 1927

Falso Este: 500,000

Falso Norte: 0.0

Cuadrícula UTM a cada 1,000 metros

Referencia de las cotas: Nivel medio del mar

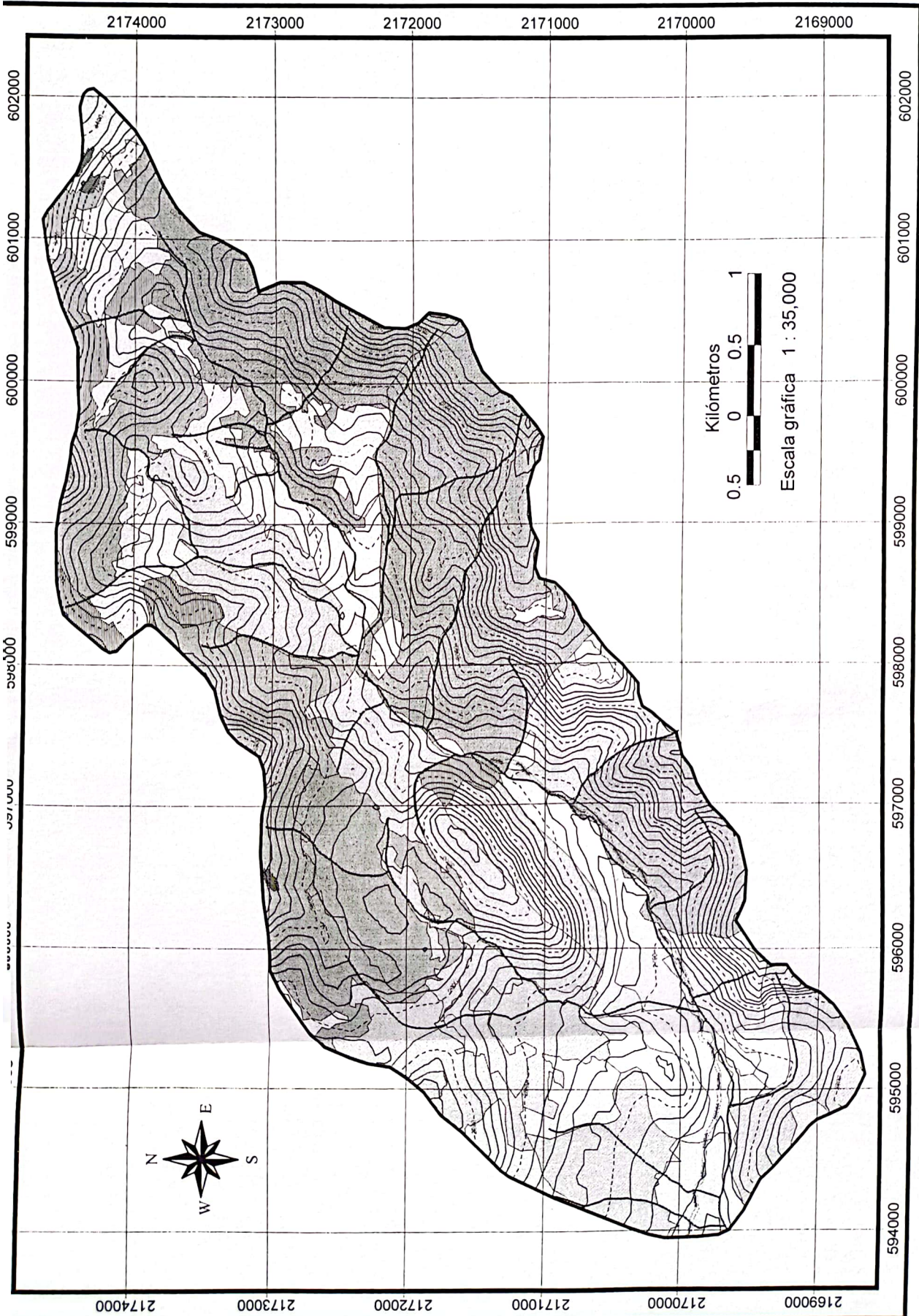
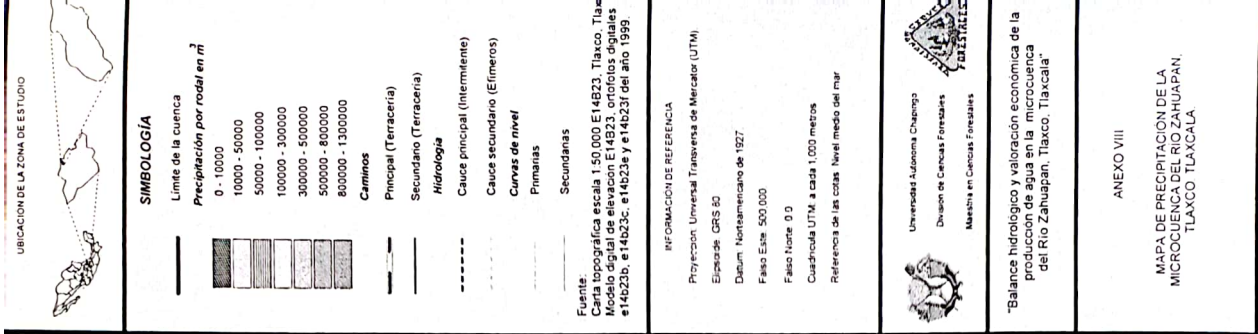
Universidad Autónoma Chapingo

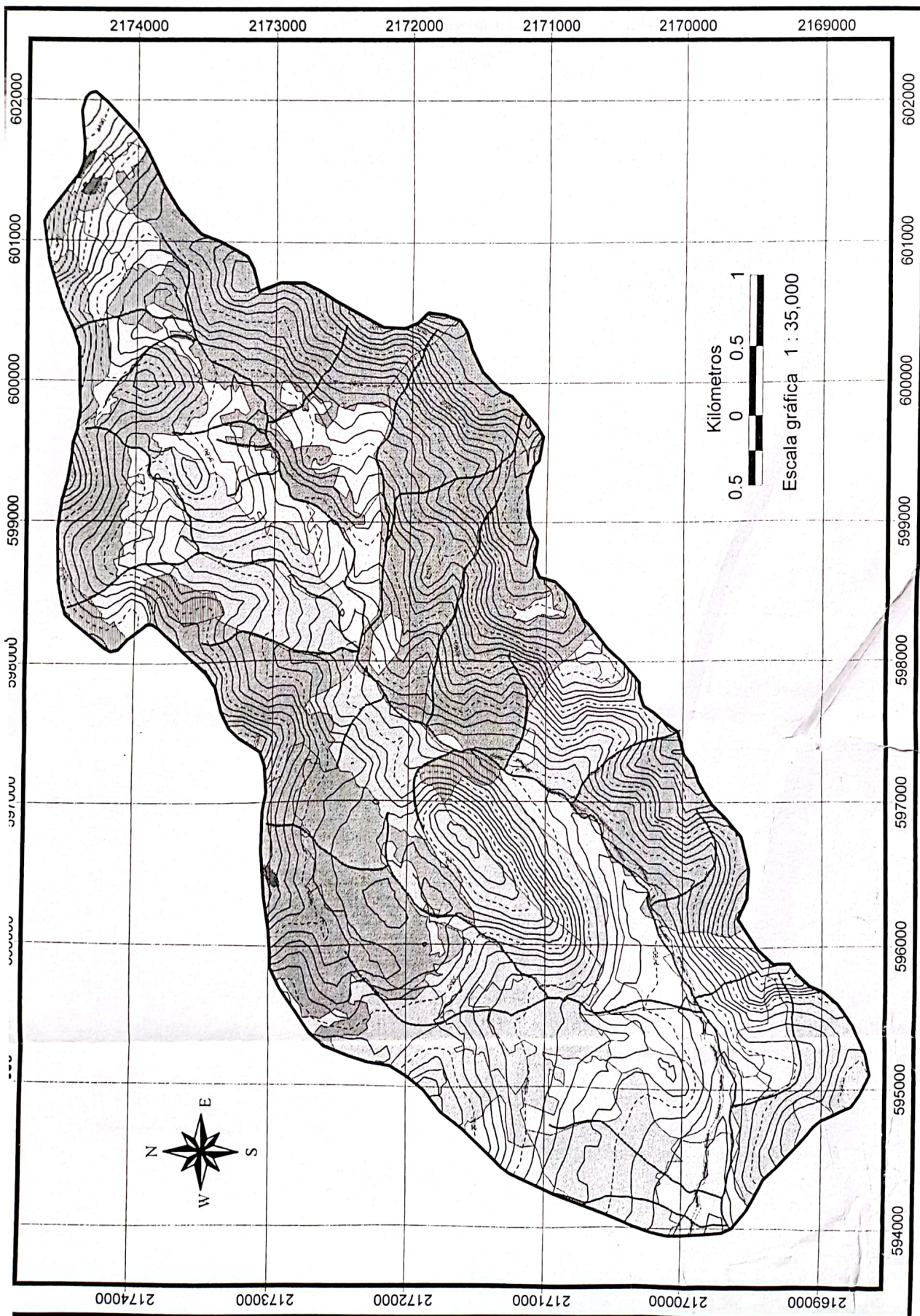
División de Ciencias Forestales

Maestría en Ciencias Forestales

ANEXO VI

MAPA DE COBERTURAS DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAXCALA





UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

SIMBOLOGÍA

Limite de la cuenca
Precipitación por nivel en m²

0 - 10000
10000 - 50000
50000 - 100000
100000 - 300000
300000 - 500000
500000 - 800000
800000 - 1300000

Caminos
Principal (Terracería)
Secundario (Terracería)
Hidrología
Cauce principal (Intermitente)
Cauce secundario (Efímero)
Curvas de nivel
Pirineas
Secundarias

Fuente:
Carta topográfica escala 1:50,000 E14823, Tlaxco, Tlax.
Modelo digital de elevación E14823, ortofotos digitales
E14822b, E14823c, E14823e y E14823f del año 1999.

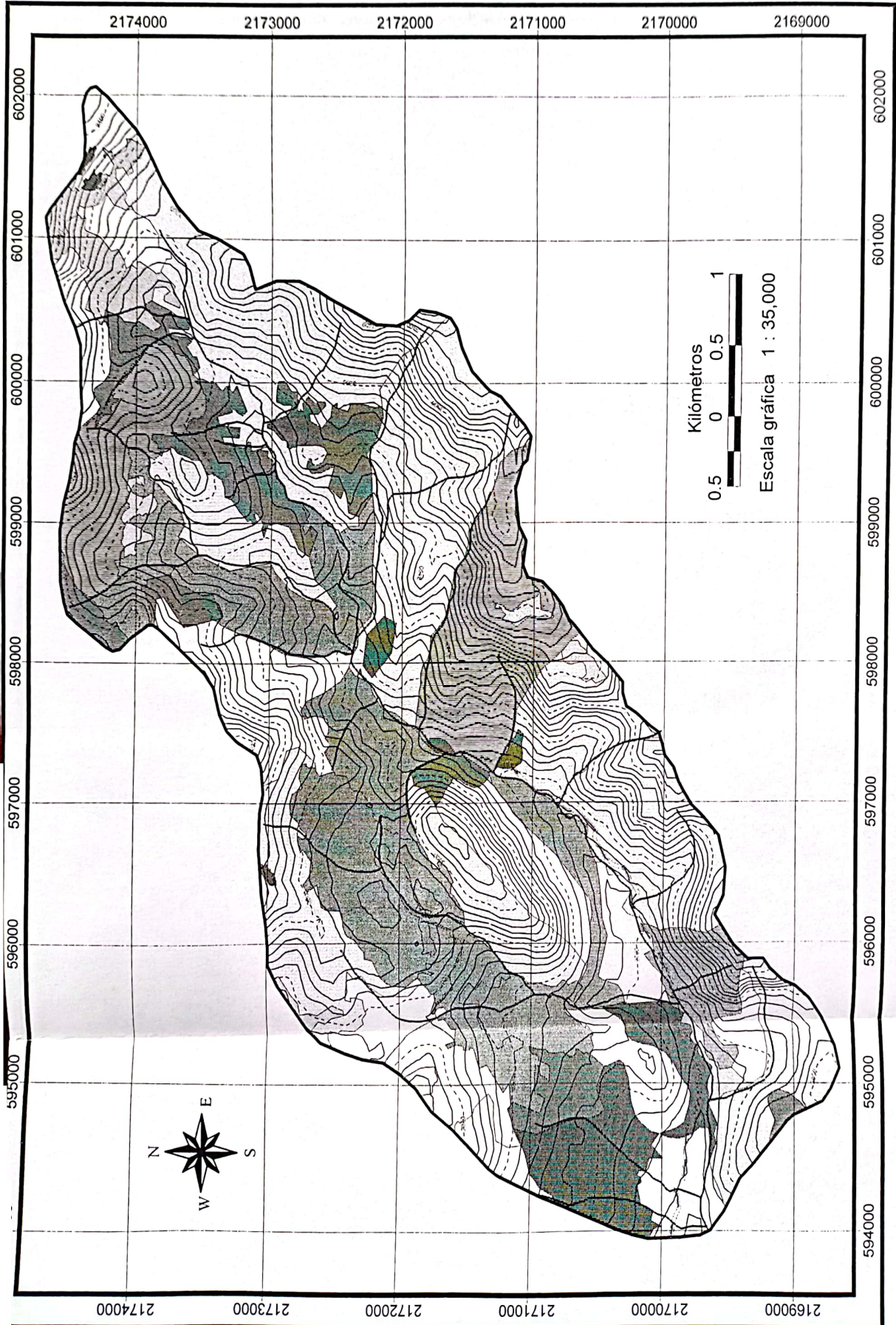
INFORMACIÓN DE REFERENCIA

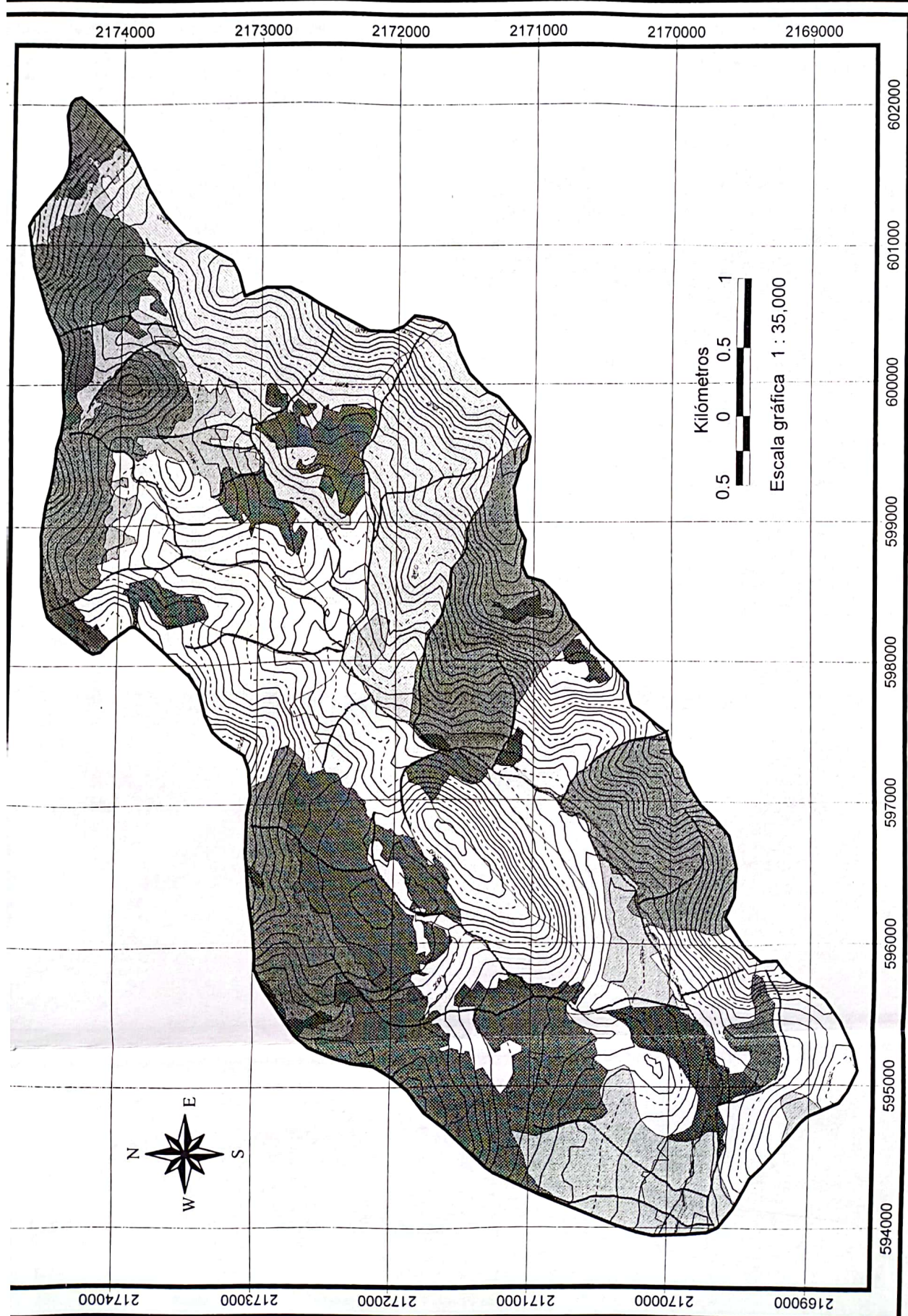
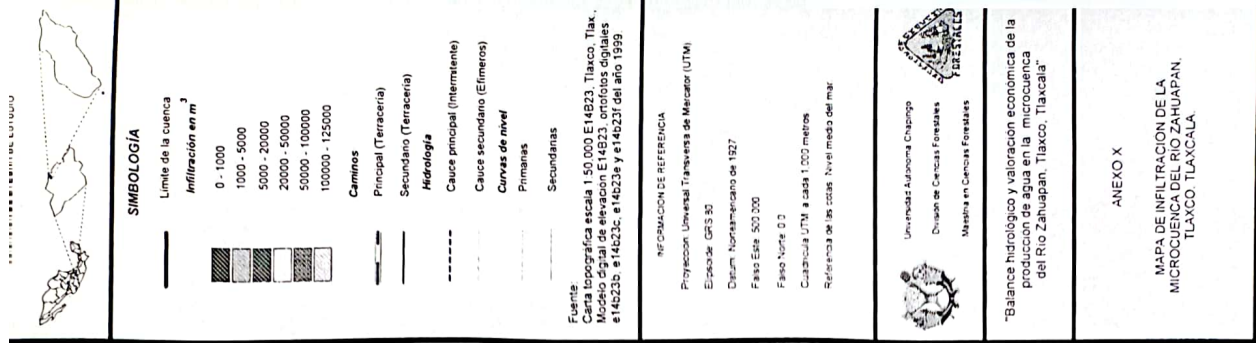
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Escala: GRS 80
Datum: Noramericano de 1927
Falso Este: 500,000
Falso Norte: 0.0
Cuadrícula UTM a cada 1,000 metros
Referencia de las cotas: Nivel medio del mar

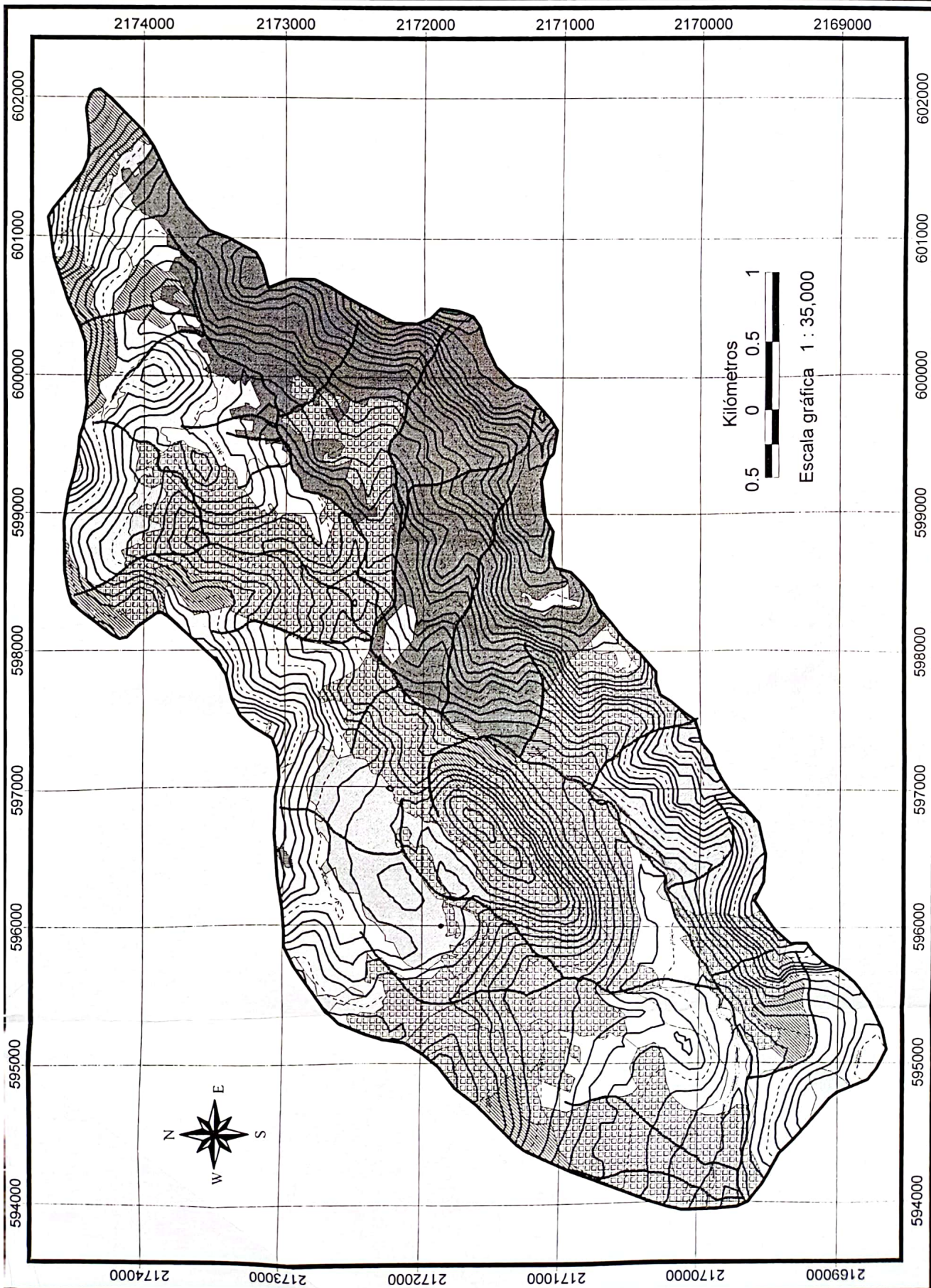
Universidad Autónoma Chapingo
Dirección de Ciencias Forestales
Materia: Ciencias Forestales

ANEXO VIII

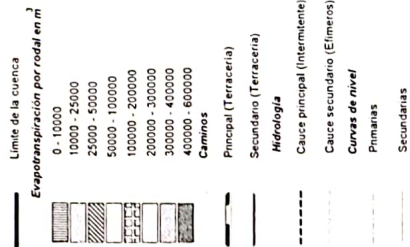
MAPA DE PRECIPITACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCO, TLAXCALA







SIMBOLOGÍA



Fuente:
 Carta topográfica escala 1:50,000 E14B23, Tlaxco, Tlax.
 Modelo digital de elevación E14B23, ortofotos digitales
 e14b23b, e14b23c, e14b23a y e14b23i del año 1999

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Etirado: GRS 80
 Datum: Norteamericano de 1927
 Falso Este: 500,000
 Falso Norte: 0.0
 Cuadrícula UTM a cada 1,000 metros
 Referencia de las cotas: Nivel medio del mar



Universidad Autónoma de Chiapas
 Dirección de Ciencias Forestales
 Maestría en Ciencias Forestales



"Balance hidrológico y valoración económica de la
 producción de agua en la microcuenca
 del Río Zahuapan, Tlaxco, Tlaxcala"

ANEXO XI

MAPA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LA
 MICROCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN,
 TLAXCO TLAXCALA

