



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS MONTECILLO**

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

IMPACTO DE OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN SOBRE LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

JULIO CÉSAR MÁRQUEZ ZÁRATE

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2013

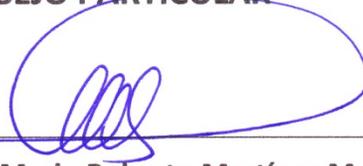
La presente tesis titulada "IMPACTO DE OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN SOBRE LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO" realizada por el alumno JULIO CÉSAR MÁRQUEZ ZÁRATE, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

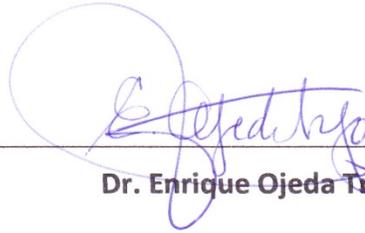
CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. Mario Roberto Martínez Menes

Asesor:



Dr. Enrique Ojeda Trejo

Asesor:



Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso

Asesor:



Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández

Dedicatorias

A Carolina

Qué fácil es viajar en el tiempo con sólo un aroma, una imagen o un sonido e incluso prescindir de estos elementos y sólo cerrar los ojos. Así, cuando quiero estar contigo, cierro los ojos para buscar el punto de la línea del tiempo que en algún momento hemos compartido y cuando lo tengo, cuando encuentro ese punto, abro poco a poco los ojos y aquí estamos, juntos otra vez viajando en el tiempo, nuestro tiempo y sé que has hecho lo mismo para venir. Somos viajeros con ganas de amarnos: dormimos de día, amamos de noche. No vamos hacia delante. ¡No! Nosotros vemos el alma que a veces se pierde —nos perdemos—. Estamos caminando hacia atrás. En espiral hacia el centro del universo: allí es donde vamos...

Contigo comprendí el significado de la frase "si eres muy afortunado, una vez conocerás a la persona que dividirá tu vida en dos épocas: en antes y después de conocerla"... Gracias por caminar conmigo y ser mi más grande apoyo.

A Emilio

Ahora que estás aquí soy más feliz. Tus llantos nocturnos fueron el constante recordatorio de la frase: "pa'tras ni pa'garrar vuelo". Gracias por elegirme como tu Padre y hacerme parte de esta tu aventura.

A mi Mamá

Parte de mí es gracias a tu cuidado, gracias por todas las cosas que no soy. Por tu amor inconmensurable, tus enseñanzas, consejos y regaños. Por todo lo que no puedo expresar con palabras... gracias mil.

A mis hermanos Dany y Micky

Por su compañía y jugar conmigo, los buenos ratos y los malos también y sobre todo, las lecciones enseñadas. Por los momentos de felicidad que hemos compartido... y los no tan felices.

A mi Papá y Tía María Esther

Por no dejarme solo y meter el hombro para mantenerme a flote, incluso levantarme cuando fue necesario. Por su apoyo y amor incondicionales, y por querernos tanto a mí y a mi familia.

Ah! Y a la familia de zarigüeyas que se mudó a casa y que inundan de alegría nuestro hogar...
Gracias también.

Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados, por ser la plataforma que me permitiera alcanzar un logro más en mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para poder realizar mis estudios de Maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico para la realización de esta tesis.

A los integrantes de mi Consejo particular, por su apoyo y formación, su guía y orientación. No me queda la menor duda que además de excelentes académicos, me rodeé de personas de gran calidad y calidez humana.

Dr. Mario, por no dejarme caer y por confiar en mí, incluso cuando yo mismo dejé de hacerlo.

Dr. Enrique, por compartir conmigo su particular visión del mundo y las charlas amenas.

Dr. Demetrio, por su apoyo siempre sincero y sus oportunas observaciones, consejos y correcciones.

Dr. Pedro Arturo, por su paciencia y el tiempo compartido en lo académico y lo personal.

Al personal académico y administrativo del Colegio de Postgraduados que me ayudaron a realizar y concluir los trámites necesarios durante este proceso.

Al Dr. Mateo Vargas, por su consejo en una parte del trabajo estadístico de esta investigación.

Al personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que labora en las oficinas del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y en el Centro Mexicano de Capacitación en Agua y Saneamiento (CEMCAS), que aportó valiosa información para realizar esta investigación:

Hidrobiólogo Oscar Espíndola Serafín, Coordinador de Gestión del Proyecto Lago de Texcoco, por conceder el acceso a la “Biblioteca del Proyecto Lago de Texcoco”.

Ing. Raúl Solís Castro, Subgerente de Desarrollo Agrícola y Forestal, e Ing. Ma. Luz Elena Hernández Frausto de la Coordinación de Riego, Drenaje y Recuperación de Suelos, por facilitar el “Inventario de obras de conservación y reforestación en la Cuenca Tributaria del Lago de Texcoco”.

Ing. Martín Ortíz Montes, Director Técnico, Ing. Ramón López Flores, Subgerente de Hidrología e Ingeniería de Ríos y M. C. José Luis Lucio Medina Ruiz, Jefe de Departamento de Hidrología Operativa y Climatología, quienes concedieron acceso a los Boletines hidrológicos y el Archivo Hidroclimatológico de la Dirección Técnica.

"Our deepest fear is not that we are inadequate. Our deepest fear is that we are powerful beyond measure. It is our light, not our darkness that most frightens us. Your playing small does not serve the world. There's nothing enlightened about shrinking so that other people won't feel insecure around you. We are all meant to shine, as children do. It's not just in some of us; it's in everyone. And as we let our own light shine, we unconsciously give other people permission to do the same. As we're liberated from our own fear, our presence automatically liberates others."

(Marianne Williamson)

CONTENIDO

RESUMEN	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVOS	7
HIPÓTESIS	7
SUPUESTOS	7
3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	8
3.1. OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA.....	8
3.1.1. Generalidades	8
3.1.2. Tipos de obras CONSA	9
3.1.3. Evaluación de obras y prácticas de conservación del suelo y agua (CONSA)	12
3.2. SERVICIOS AMBIENTALES	19
3.2.1. Antecedentes	19
3.2.2. Definición	20
3.2.3. Servicios ambientales hidrológicos	23
3.2.4. Formas para valorar los servicios ambientales	24
3.2.5. Valoración de servicios ambientales hidrológicos	27
3.3. EVALUACIÓN O INDICADORES DE IMPACTO EN CUENCAS.....	33
3.3.1. Cambio de uso de suelo	34
3.3.2. Índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI).....	35
3.4. ACCIONES DE CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	36
3.4.1. Antecedentes	36
3.4.2. Trabajos de conservación	38
4. MATERIALES Y MÉTODOS	41
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
4.1.1. Localización	41
4.1.2. Delimitación de la cuenca	41
4.1.3. Geología	44
4.1.4. Suelos	46

4.1.5.	Orografía y relieve	50
4.2.	SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	50
4.3.	ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMÁTICAS.....	53
4.4.	OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS	53
4.5.	ANÁLISIS DEL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	58
4.5.1.	Cambios del uso del suelo y vegetación para antes y después de las obras	58
4.5.2.	Análisis de NDVI	60
4.6.	ACCIONES DE CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELO Y VEGETACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	61
4.7.	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS	63
4.7.1.	Prueba de F	63
4.7.2.	Prueba de t de Student	64
4.7.3.	Distribución probabilística de escurrimientos máximos instantáneos	65
4.8.	EVALUACIÓN O INDICADORES DE IMPACTO EN CUENCAS.....	66
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	68
5.1.1.	Ubicación y delimitación de la cuenca	68
5.1.2.	Características morfométricas de la cuenca del Río Chapingo	69
5.2.	CONSERVACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	70
5.3.	IMPACTO DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA Y LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL CAMBIO DE USO DE SUELO DE 1974 A 2012	76
5.3.1.	ANÁLISIS DE LOS USOS DEL SUELO UTILIZANDO LA INFORMACIÓN DE INEGI	77
5.3.2.	ANÁLISIS DE LOS USOS DEL SUELO ELABORADOS PARA ESTE ESTUDIO	80
5.3.3.	ANÁLISIS DEL NDVI DE LA CUENCA	88
5.3.3.1.	Cambios del NDVI asociados a los cambios de uso de suelo	88
5.3.3.2.	Variación del NDVI en las unidades de cambio	89
5.4.	IMPACTO DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA Y LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO	91
5.4.1.	Análisis de la variación de la precipitación y escurrimiento medio en ambos periodos	92
5.4.2.	Análisis de la variación de los coeficientes de escurrimiento en ambos periodos	94
5.4.3.	Análisis de la variación de los escurrimientos máximos en ambos periodos	95
5.4.3.1.	Variabilidad temporal de los gastos máximos (m ³ /s) en la cuenca	96
5.4.4.	Análisis de la variación de la degradación específica de la cuenca en ambos periodos.....	99
5.5.	INDICADORES DE IMPACTO DE LOS TRABAJOS DE CONSA EN LA CUENCA DEL RIO CHAPINGO	101
5.5.1.	Cambios en las variables hidrológicas producto del manejo de la cuenca	101
5.5.1.1.	Comportamiento estadístico de las variables hidrológicas producto del manejo.....	101

5.5.1.2.	Variación de los procesos hidrológicos producto del manejo	104
5.5.1.3.	Cambios de las variables hidrológicas en ambos periodos producto del manejo	106
5.6.	BALANCES DE AGUA PARA ANTES Y DESPUES DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN	107
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
7.	FUENTES CONSULTADAS.....	112

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Trabajos efectuados y gastos máximos en la Cuenca Tributaria Oriental del Valle de México.....	15
Cuadro 2. Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y semi-naturales.	25
Cuadro 3. Área protegida para las plantaciones realizadas en la zona oriente del área de influencia del Proyecto Lago de Texcoco	39
Cuadro 4. Tipo y cantidad de obras hidráulicas construidas para el funcionamiento del Programa Hidrológico y Forestal	39
Cuadro 5. Especies y plantación correspondiente a 1981	40
Cuadro 6. Geología en la Cuenca del Río Chapingo.	44
Cuadro 7. Suelos en la Cuenca del Río Chapingo	46
Cuadro 8. Perfil de parámetros físicos y químicos por tipo de suelo.....	48
Cuadro 9. Rangos de pendiente en la cuenca del Río Chapingo.	50
Cuadro 10. Variables morfométricas calculadas mediante el sistema automatizado.	51
Cuadro 11. Condiciones climáticas en la cuenca del Río Chapingo.....	53
Cuadro 12. Comparativo de la delimitación de la Cuenca del Río Chapingo.	68
Cuadro 13. Características morfométricas de la cuenca del Río Chapingo.....	70
Cuadro 14. Reforestación en la cuenca del río Chapingo.	71
Cuadro 15. Especies plantadas en la reforestación de la Cuenca del Río Chapingo.	72
Cuadro 16. Infraestructura hidráulica de la Cuenca del Río Chapingo.	73
Cuadro 17. Comparación de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI (Series I y IV).....	77
Cuadro 18. Comparación de la cartografía de uso de suelo y vegetación elaborada para 1974 y 2012.	80
Cuadro 19. Comparativo de los usos de suelo de la cuenca en 1974 y 2012.....	81
Cuadro 20. Valores NDVI para los usos de suelo en 1979 y 2007 y su diferencia.....	88
Cuadro 21. Valores NDVI por unidades de cambio en 1979 a 2007.	90
Cuadro 22. Precipitación y escurrimiento superficial de la Cuenca del Río Chapingo antes y después de obras.	92
Cuadro 23. Variación del escurrimiento máximo en los dos periodos.	98
Cuadro 24. Producción de sedimentos de la Cuenca del Río Chapingo para antes y después de las obras.	99
Cuadro 25. Degradación de los suelos de la Cuenca del Río Chapingo para antes y después de las obras.	100
Cuadro 26. Prueba de F y t de para precipitación y coeficientes de escurrimiento e infiltración antes y después de obras.	102
Cuadro 27. Pruebas de F y t de Student para el escurrimiento medio, máximo y degradación específica antes y después de obras.	103
Cuadro 28. Estadísticos de precipitación con sus cambios para antes y después de las obras.	104
Cuadro 29. Estadísticos de escurrimientos superficiales con sus cambios para antes y después de las obras.	104

Cuadro 30. Estadísticos de los coeficientes de escurrimientos con sus cambios para antes y después de las obras.	105
Cuadro 31. Estadísticos de coeficiente de infiltración con sus cambios para antes y después de las obras.	105
Cuadro 32. Estadísticos de escurrimientos máximos instantáneos con sus cambios para antes y después de las obras.	105
Cuadro 33. Estadísticos de la degradación específica con sus cambios para antes y después de las obras.....	106
Cuadro 34. Modelos de regresión lineal para las variables hidrológicas para los dos periodos.....	106
Cuadro 35. Balances de agua para algunos años representativos de los dos periodos en la cuenca del Rio Chapingo..	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación temporal (antes y después de las obras) de las variables hidrológicas del río Texcoco.	16
Figura 2. Vínculos entre servicios de los ecosistemas y bienestar humano. Fuente: MEA 2005	22
Figura 3. Servicio web de ortofotos de INEGI.	42
Figura 4. Cortes transversales con “Perfil de Elevación” de Google Earth®: a) Parte baja; b) y c) parte media; d) parte alta.	42
Figura 5. Ubicación de la cuenca del Río Chapingo.	43
Figura 6. Geología de la Cuenca del Río Chapingo.	45
Figura 7. Suelos de la cuenca del Río Chapingo.	49
Figura 8. Datos de entrada para el sistema automatizado de caracterización morfométrica de una cuenca.....	51
Figura 9. Relieve de la Cuenca del Río Chapingo.....	52
Figura 10. Clima de la Cuenca del Río Chapingo.	54
Figura 11. Estación de aforo de la Cuenca del Río Chapingo.	55
Figura 12. Levantamiento de la sección transversal de la estación de aforo del Río Chapingo.....	55
Figura 13. Red de drenaje de la Cuenca del Río Chapingo.	57
Figura 14. Mosaico de fotografías aéreas para identificación de uso de suelo y vegetación en 1974.	60
Figura 15. Imagen de Google Earth® para identificación de uso de suelo y vegetación en 2012.....	60
Figura 16. Mapa de obras de conservación de suelo y agua de (Adame, 1991).	62
Figura 17. Prueba F para varianzas de dos muestras.	63
Figura 18. Prueba t de dos muestras.	64
Figura 19. Calculadora de Análisis de frecuencia de Inundaciones.....	66
Figura 20. Comparativo de la delimitación de la Cuenca del Río Chapingo.....	69
Figura 21. Reforestación en la Cuenca del Río Chapingo: a) Terrazas, b) Cepa, c) Subsoleo y d) Zanja trinchera.....	71
Figura 22. Presas en la Cuenca del Río Chapingo: a) de gaviones destruida, b) de gaviones semidestruida, c) de mampostería, d) de gaviones, e) y f) de mampostería con compuerta.	73
Figura 23. Obras de conservación de suelo y agua en la Cuenca del Río Chapingo.....	75
Figura 24. Cartografía de uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo Serie I escala 1:50,000.	78
Figura 25. Cartografía de uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo Serie IV escala 1:250,000.	79
Figura 26. Uso de suelo y vegetación por fotointerpretación para la Cuenca del Río Chapingo en 1974.	82
Figura 27. Uso de suelo y vegetación por fotointerpretación para la Cuenca del Río Chapingo en 2012	83
Figura 28. Reconversión de zonas degradadas a zonas recuperadas y reforestadas (1974-2012).....	85
Figura 29. Crecimiento de la zona urbana en la Cuenca del Río Chapingo de 1974 a 2012.	86
Figura 30. Establecimiento de minas de extracción de arena en la Cuenca del Río Chapingo después de 1974.	87
Figura 31. Valores NDVI en la cuenca del Río Chapingo de 1979 a 2002.....	89

Figura 32. Valores NDVI para unidades de cambio de 1974 a 2012 y su diferencia.	90
Figura 33. Precipitación y escurrimiento medio anual de la cuenca del Río Chapingo.....	94
Figura 34. Variación de los coeficientes de escurrimiento anual de la Cuenca del Río Chapingo.	95
Figura 35. Gasto máximo instantáneo anual de la Cuenca del Río Chapingo.	96
Figura 36. Variación de los escurrimientos máximos y la precipitación máxima en 24 horas para los dos periodos analizados.	97
Figura 37. Variación de los escurrimientos máximos para los dos periodos analizados.....	98
Figura 38. Variación del escurrimiento máximo en los dos periodos.	98
Figura 39. Variación de la degradación específica de los suelos en los dos periodos.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
AGRUCO	Agroecología Universidad Cochabamba
APEX	Agricultural Policy Environmental Extender
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales
CELT	Comisión de Estudios del Lago de Texcoco
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONSA	Conservación de Suelo y Agua
CP	Colegio de Postgraduados
CSA	Critical Source Areas - Áreas de fuente críticas
DGCSA	Dirección General de Conservación de Suelo y Agua
ENS	Efficiency Nash-Sutcliffe
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GAP	National Gap Analysis Project
GPS	Global Positioning System
HRU	Hydrological Response Units - Unidades de Respuesta Hidrológica
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPR	Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando los Indicadores de Sustentabilidad
IR	Infrared - Infrarrojo
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LANDSAT TM	LANDSAT Thematic Mapper
LANDSAT-ETM+	LANDSAT Enhanced Thematic Mapper Plus
LANDSAT-MSS	LANDSAT Multispectral Scanner
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MDE	Modelo Digital de Elevación
MEA	Millenium Ecosystem Assessment - Evaluación de los Ecosistemas de Milenio
MESMIS	Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando los Indicadores de Sustentabilidad
NASS	National Agricultural Statistics Service
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index - Índice normalizado diferencial de la vegetación
NIR	Near Infrared - Infrarrojo cercano
NRCS	National Resources Conservation Service
OCDE	Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo
PBIAS	Percent bias
ppp	Píxeles por pulgada

PSA	Pago por Servicios Ambientales
PSA-CABSA	Pagos por carbono, biodiversidad y agroforestería
PSAH	Pago por servicios ambientales hidrológicos
RMSE	Root Mean Square Error - Cuadrado Medio del Error
RSR	RMSE-observation standard deviation ratio
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SAS	Statistical Analysis System
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SSURGO	Soil Survey Geographic
STATSGO	State Soil Geographic
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
USLE	Universal Soil Loss Equation - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
UTE-COUSSA	Unidad Técnica especializada-Conservación y Usos Sustentable de Suelo y Agua
UTM	Universal Transversa de Mercator
WEPP	Water Erosion Prediction Project - Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica
WMS	Web Map Service

RESUMEN

En esta investigación se seleccionó la Cuenca del Río Chapingo para cuantificar el impacto que han tenido las acciones de conservación que implementó el Plan Lago de Texcoco en los años 70's para restaurar y recuperar las áreas degradadas por medio de reforestaciones asociadas a obras de conservación de suelo y la construcción de infraestructura hidráulica para el control de azolves y escurrimientos. Para ello, se determinó el cambio de uso de suelo por fotointerpretación de fotografías aéreas para 1974 y una imagen digital de Google Earth® para 2012, encontrando que las áreas degradadas en efecto se redujeron, pero también algunos usos de importancia económica como la agricultura; así mismo, surgieron otros usos como las minas de extracción de arena y la reforestación, que modifican el régimen hidrológico. Se hizo un análisis de valores NDVI sobre imágenes de satélite LANDSAT para determinar cambios en la cobertura y de esta manera poder asociar los cambios de uso de suelo a los cambios en hidrología.

El análisis de variables hidrológicas como servicios ambientales se hizo a partir de datos anuales de precipitación, escurrimiento medio, coeficiente de escurrimiento, escurrimiento máximo y degradación específica, que se dividieron en dos períodos de 1950 a 1974 y de 1975 a 2000 (antes y después de obras, respectivamente). Se hizo un análisis de la estadística descriptiva de los dos conjuntos de datos y posteriormente se hicieron pruebas de F y t de Student para detectar si había diferencias significativas en las varianzas y medias de las poblaciones de datos, respectivamente. Los resultados fueron positivos y, aunados al cálculo de la eficiencia técnica de las obras para reducir escurrimientos, se puede concluir que efectivamente ha habido un impacto positivo en los servicios ambientales de la Cuenca del Río Chapingo, como resultado de las obras y acciones de conservación de suelo y agua implementadas hace casi 40 años.

SUMMARY

The Chapingo River Basin was selected to quantify the impact that conservation actions have had since were implemented by the Plan Lago de Texcoco in the 70's to restore and recover degraded areas through reforestation associated with practices for soil conservation and construction of infrastructure for controlling silt and runoff . To do this, the change in land use by photo-interpretation of aerial photographs for 1974 and a digital image of Google Earth ® for 2012 was determined, finding that indeed, degraded areas were reduced but also some uses of economic importance such as agriculture; also, there were new land uses as mining and reforestation, which modify the hydrological regime. An analysis of NDVI values on LANDSAT satellite images was performed to determine changes in coverage and thus to associate the changes in land use to changes in hydrology.

The analysis of hydrological variables such as environmental services was based on annual data of precipitation, medium runoff, runoff coefficient , peak flow and specific degradation, which were divided into two periods: 1950-1974 and 1975-2000 (before and after works, respectively). An analysis of the descriptive statistics of the two data sets was made and subsequently F test and Student's *t*-test were made to detect whether there were significant differences in the variances and means of data population, respectively. The results were positive and, coupled with the calculation of the technical efficiency of the works to reduce runoff, it can be concluded that indeed there has been a positive impact on environmental services of the Chapingo River Basin as a result of the soil and water conservation practices implemented almost 40 years ago.

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos, definida como la reducción de la capacidad de producir en términos de cantidad y calidad de bienes y servicios, ha sido uno de los principales problemas a nivel mundial originados por el sobrepastoreo (35 %), deforestación (29 %), malas prácticas agrícola (28 %), extracción de leña (7 %) y el resto por el desarrollo urbano que afectan 1,965 millones de hectáreas, de las cuales, el 56 % se origina por la erosión hídrica (GACGC, 1994).

En México existen serios problemas de degradación de suelos; aproximadamente el 64 % de los suelos del país presentan algún nivel de degradación, 13 % son terrenos desérticos o rocosos y zonas abandonadas o improductivas y únicamente el 23 % del territorio nacional tiene suelos que mantienen actividades productivas sustentables o sin degradación aparente. De la superficie degradada, la erosión hídrica afecta 37 % (73 millones de hectáreas) con efectos evidentes como la formación de cárcavas, cuya superficie afectada comprende una extensión de 12 % (24 millones de hectáreas). La erosión laminar (en las capas superficiales) también afecta una superficie de aproximadamente 25 %, en la que todavía es posible desarrollar actividades agropecuarias y forestales (Cardoza et. al 2007).

La erosión de los suelos ha sido reportada en diferentes grados de afectación indicando que sólo en 19.8 % de la superficie la erosión no es manifiesta; en 26.33 % la erosión es leve; en 37.16 % la erosión es moderada; en 12.1 % la erosión es severa y en 4.61 % restante la erosión es muy severa (DGCSA, 1982). Los grados de erosión reportados son cualitativos e indican la erosión al momento del levantamiento, sin embargo, también se han estimado pérdidas de suelo leves (menos de 5 t/ha) en menos del 58 % del territorio nacional, ligeras (5-10%) en 11 %, moderadas (10-50%) en 20% y mayores de 50 t/ha en el resto del país (SEMARNAT-UACH 2002). Así mismo, se han reportado datos de degradación específica de 2.7 t/ha-año a nivel nacional con variaciones de 0.17 hasta más de 7 t/ha-año en diferentes regiones hidrológicas del país (Fernández y Martínez 1985).

La degradación de los suelos de las cuencas del Oriente del Valle de México ha sido reconocida por la gran cantidad de azolves y escurrimientos que descargaban al Lago de Texcoco, afectando el sistema de drenaje y que en épocas de sequía causaban grandes problemas de tolvánicas que afectaban la salud de la población de la Ciudad de México. De acuerdo con los registros hidrométricos, la degradación específica reportada rebasaba las 10 t/ha-año y era provocada por la deforestación, las áreas degradadas y la presencia de cárcavas en la parte media de las cuencas.

Las estimaciones de erosión realizadas por el Colegio de Postgraduados (1982, com. pers.) en la región indican que en las zonas de bosque (pino y oyamel) las pérdidas de suelo eran de menos de 200 kg/ha,

zonas agrícolas de menos de 5 t/ha, en pastizales de menos de 500 kg/ha, en zonas degradadas (tepetates) de más de 15 t/ha y en zonas de cárcavas de más de 100 t/ha, por lo que para atender este problema se creó la Comisión del Lago de Texcoco dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos con la finalidad de recuperar y reducir los problemas ambientales del Ex-Lago de Texcoco y su área de influencia.

La Comisión del Lago de Texcoco inició un programa de conservación del suelo y agua, reforestando las áreas severamente erosionadas de la Cuenca del Río Chapingo, con la finalidad de: 1) controlar el proceso erosivo, 2) retener agua para propiciar la recarga de acuíferos y 3) evitar las constantes tolvánas. Para ello, se realizaron una serie de trabajos, entre los que destacan: obras de control de azolves, plantaciones y la construcción de terrazas en las cuencas (Adame y Gómez, 1999).

Los trabajos se iniciaron en 1973 y tuvieron continuidad hasta inicios de los 80's; se han realizado evaluaciones de las metas físicas alcanzadas, los avances de los programas de reforestación, las reducciones de los escurrimientos superficiales (Cruickshank, 2003) en diferentes épocas sin que se tenga una evaluación actualizada y asociada de las acciones realizadas y su impacto en el cambio del uso del suelo y de la vegetación, así como del crecimiento de las áreas de explotación de las minas de arenas y de la mancha urbana que permitan valorar los cambios en la estructura vegetal y los servicios hidrológicos que han generados las acciones realizadas.

Esta investigación se desarrolló para valorar los servicios ambientales hidrológicos asociados a los trabajos de conservación del suelo y agua realizados en la cuenca del Río Chapingo; el trabajo consistió en analizar los cambios de usos del suelo y vegetación y los impactos de la vegetación y prácticas de manejo del suelo y agua para reducir los escurrimientos superficiales (medios y máximos instantáneos), aumentar la recarga de acuíferos y minimizar las pérdidas de suelo y la producción de sedimentos que llegan al Ex Lago de Texcoco.

Los cambios en los porcentajes de cobertura de la vegetación, las obras de conservación del suelo y agua y las presas de control de control de azolves permitieron valorar que los escurrimientos medios se redujeron en 28.08 mm en promedio, los escurrimientos máximos en más de 48 m³/s, y la degradación específica promedio varió de 23.68 a 1.22 t/ha-año. Estas variables fueron consideradas como los servicios ambientales hidrológicos generados por las acciones de conservación del suelo y agua.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

El interés y entendimiento de la relación entre los recursos naturales, la salud del ambiente y la sociedad son de especial interés en las zonas de desarrollo urbano; nuestro medio natural y la conservación del mismo se están consolidando como pilares del desarrollo sustentable para los gobiernos y las sociedades que integran a éstos.

Cuando se rompe el equilibrio entre ambiente y sociedad, se genera la degradación de los recursos naturales, que llega a tener un gran impacto en el desarrollo regional especialmente en las zonas donde existe una alta concentración de población y un fuerte crecimiento de las áreas urbanas como lo ha sido la Ciudad de México y la zona conurbana.

En la zona oriente de la Ciudad de México se ha presentado un problema de degradación de suelos, producto de la deforestación y el uso de malas prácticas agrícolas en las zonas de laderas, que han causado la erosión de los suelos y la formación de cárcavas por la falta de control de los escurrimientos superficiales que formaron extensas zonas degradadas.

Por esta razón, se han implementado esquemas de manejo y recuperación de los recursos naturales con la finalidad de mantener ecosistemas y áreas de desarrollo rural y urbano en equilibrio o semi-equilibrio, a fin que los bienes y servicios que aportan a los dueños y/o poseedores de la tierra y/o a la sociedad en general no solo mejoren su calidad de vida, sino que contribuyan a mitigar o revertir la degradación del ambiente.

El área de drenaje de la Cuenca del Río Chapingo, que forma parte de los ríos de oriente de la Cuenca del Valle de México, es un claro ejemplo de la degradación de los recursos naturales como consecuencia de actividades agropecuarias y manejo irracional de los bosques, que propiciaron la degradación de suelos y vegetación, dejando como consecuencia pérdida del suelo, presencia de cárcavas con crecimiento en profundidad y amplitud y paisajes donde predominaba la presencia de material parental con un alto grado de degradación, lo que provocaba la producción de una gran cantidad de sedimentos y sales que se depositaban en el Ex-Lago de Texcoco y que en la época de seca (especialmente de febrero a abril) provocaban tolvánicas que causaban problemas de salud a la población de la Ciudad de México.

Considerando esta problemática, el gobierno federal a través de la extinta Secretaria de Recursos Hidráulicos constituyó en los años 70's la Comisión de Aguas del Valle de México e inició el Plan Lago de Texcoco, que consistía en la formación de lagos artificiales en el Ex-Lago de Texcoco para reducir las tolvánicas asumiendo que los cuerpos de agua evitarían el movimiento en suspensión de las partículas de suelo, detritus y sales que se depositan en la superficie del suelo. Para que este Plan tuviera éxito, era

necesario recuperar las zonas degradadas de los ríos de oriente para aumentar la recarga del acuífero y detener los azolves antes que éstos se depositaran en los lagos artificiales que se iban a construir y redujeran su vida útil.

Las primeras acciones de control de la erosión, recuperación de suelos, reforestaciones y construcción de presas de control de azolves iniciaron en la Cuenca del Río Chapingo en 1973, donde se realizó un esquema de manejo forestal, de reforestación con diferentes especies asociadas con diferentes tipos de terrazas destacando la terrazas tipo gradoni, zanjas bordo, subsoleo y ripeo para formar terrazas de banco y recuperar los terrenos tepetatosos que existían en la parte media y alta de la cuenca (Pimentel 1987 y Comisión del Lago de Texcoco).

Las acciones continuaron hasta inicios de los años 80's y a prueba y error se fueron mejorando los trabajos aprovechando las experiencias; se tuvo una etapa de formación de la vegetación forestal (pinos y eucaliptos) y de control de los azolves con presas de gaviones, mampostería, piedra acomodada y de tierra, construidas para aumentar la recarga del acuífero y la acumulación de azolves como ha sido estudiado al paso de tiempo por diferentes investigadores y por empresas que han valorado el impacto de las obras y acciones realizadas, todas ellas estudiadas desde diversas perspectivas y también se han colectado datos de algunas variables, de modo tal que existe información previa a este trabajo que permite tener un punto de referencia y comparación, así como antecedentes suficientes para contrastar los resultados que se obtengan en este estudio.

Después de 40 años se tiene un efecto acumulativo de los beneficios que se han logrado con las acciones realizadas, como los cambios de uso del suelo, la formación de suelo, la consolidación de la zonas de terrazas para uso agrícola, la reducción de la zonas degradadas, los cauces naturales protegidos con la vegetación espontánea y las propias reforestaciones que han logrado servicios ambientales hidrológicos que deben ser valorados en su exacta dimensión y analizados con las prácticas de conversión de las zonas de reforestación a zonas agrícolas, la corta de los árboles de las reforestaciones, las deforestaciones de las especies plantadas y la falta de atención y valoración de los trabajos por los propios dueños o poseedores de los terrenos, por el crecimiento de las zonas de minas sobre las zonas previamente trabajadas y por el acelerado crecimiento de la mancha urbana en la parte media y baja de la cuenca del Río Chapingo.

En este estudio se pretende valorar el impacto de las obras y prácticas de conservación de los recursos naturales que se han realizado en la Cuenca del Río Chapingo, de modo que se caractericen cuantitativamente los servicios ambientales hidrológicos a partir de la información hidrométrica disponible, además de cuantificar los cambios de uso de suelo y de la vegetación existente en la zona de estudio con sistemas de información geográfica, en el marco del objetivo previsto por el Plan Lago de Texcoco.

OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua sobre los servicios ambientales hidrológicos de la Cuenca del Río Chapingo.

Específicos

- Integrar un Sistema de Información Geográfica (SIG) con los componentes ambientales para antes y después de las obras de conservación de suelos.
- Caracterizar morfométrica e hidrológicamente la cuenca bajo estudio.
- Cuantificar los cambios en vegetación y usos del suelo.
- Evaluar el efecto de las obras o acciones en los servicios ambientales hidrológicos (control de escurrimientos medios, máximos y degradación específica).

HIPÓTESIS

Las acciones de conservación de suelo y agua impactan positivamente los servicios ambientales hidrológicos.

SUPUESTOS

La información hidrométrica y de precipitación utilizada es confiable

La información reportada por la Comisión de Aguas del Valle de México está actualizada y es confiable.

3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1. OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA

3.1.1. Generalidades

Cardoza et al. (2007) definen a la degradación del suelo como la disminución de la capacidad presente o futura para sustentar vida vegetal, animal y humana, por causas naturales o antropogénicas y se divide en ligera, moderada, severa y extrema según su intensidad, que se calcula como porcentaje del área degradada sobre la superficie total. En contraparte, la conservación de suelos, es el conjunto de prácticas y obras para controlar los procesos de degradación y mantener la productividad potencial de los suelos.

La degradación del suelo va en aumento con efectos negativos en los ecosistemas naturales, el ciclo hidrológico, el cambio climático, así como en la economía de los dueños o poseedores de dichos recursos. Louwagie *et al.*, (2009) han identificado seis procesos de degradación que están estrechamente ligados a las actividades agrícolas: erosión por agua, viento y labranza; disminución del carbono orgánico del suelo; compactación; salinización y sodificación; contaminación; y disminución de la biodiversidad del suelo. La erosión es un problema natural, pero se intensifica y acelera por actividades humanas como la deforestación para propósitos agrícolas, cambios en las condiciones hidrológicas, sobrepastoreo y/o técnicas de cultivo inapropiadas. El uso de tierra y prácticas de cultivo no sustentables, incluyendo la intensificación mal planeada y el abandono de tierras también tienen un impacto adverso en los recursos naturales.

La conservación de los recursos naturales es importante para ser considerada en una iniciativa de desarrollo sustentable y dentro de éste, el manejo y conservación del suelo y agua es de especial importancia. En años recientes ha habido una amplia investigación que confirma la creciente carencia de agua para propósitos de consumo humano e irrigación. La razón principal es la deforestación continua y la contaminación de las cuencas hidrográficas que almacenan y producen agua en las tierras altas en América Latina (World Vision, 2004).

La conservación del suelo promueve el uso de obras y prácticas que reducen la pérdida de cantidad y calidad del suelo a través del tiempo. Las obras y prácticas de conservación generalmente son aquellas que reducen el impacto de los agentes erosivos en los procesos de remoción y transporte de las partículas del suelo y mantienen los niveles de materia orgánica y calidad de los suelos para producir bienes y servicios.

Ningún sistema de manejo para conservación del suelo y agua es apropiado para todas las situaciones debido a diferencias en los tipos de suelo, topografía, tipo de operaciones de cultivo y clima;

consecuentemente, el desafío de los productores y de los técnicos es encontrar e implementar prácticas de conservación mejor adaptadas a sus predios (Saskatchewan Ministry of Agriculture, 2008).

3.1.2. Tipos de obras CONSA

El uso sustentable de la tierra debe estar basado en un balance entre competencias técnica, social y económica y las consideraciones ambientales. La falta de un enfoque multi-objetivo acerca de la planeación del uso del suelo ha producido un enfoque unilateral para la utilización de los recursos que no toma en cuenta la interdependencia de factores ambientales, de producción y sociales. Las consecuencias han sido problemas de degradación de suelo y agua resultado de la erosión del suelo, prácticas inapropiadas de manejo de tierras y conflictos en el uso de suelo. La conservación de suelo y agua es la parte más importante de la planeación del uso del suelo, y se debe insertar dentro del contexto completo de la planeación del uso del suelo para el desarrollo de las tierras.

Los programas de conservación de suelo y agua deben ser vistos como el desarrollo y aplicación de los sistemas de uso del suelo que conservan o mejoran la productividad del suelo. Deben identificarse y eliminarse los factores responsables del uso de suelo perjudicial antes de la adopción de nuevos sistemas de uso. Para justificar los proyectos de conservación de suelo dentro de los programas de planeación del uso de suelo, es necesario hacer un análisis de la sustentabilidad en términos económicos con la relación costo/beneficio, la aceptación por parte de los dueños y poseedores de los terrenos y su eficiencia para reducir los procesos erosivos (Pla, 2002).

Para determinar la combinación de técnicas más apropiadas al sitio de interés se deben considerar aspectos como la magnitud de la operación, la disponibilidad de infraestructura, maquinaria y recursos humanos y la organización del trabajo. Por esta razón, el uso de obras y prácticas de conservación deben combinarse para tener una mayor eficiencia en la conservación del suelo y agua, en el mejoramiento de la calidad del suelo y en el incremento en la productividad de la tierra. La reforestación de índole gubernamental requiere de grandes extensiones de tierra porque de otra manera, la preparación del terreno, la construcción de vías de comunicación, el control de incendios, el aprovechamiento forestal y la industrialización resultarán con indicadores económicos negativos. Usualmente, la construcción de terrazas no se realiza a gran escala en tierras públicas; frecuentemente, este tipo de obras se realiza por agricultores asistidos técnica y financieramente por el gobierno. Al respecto, este tipo de obras han sido ampliamente criticadas debido a su alto costo; el resultado muestra un costo por hectárea que prácticamente ningún agricultor puede pagar por sí mismo, aunque este tipo de acciones es por demás justificable cuando la densidad de población y la intensidad del cultivo alcanzan ciertos niveles de desarrollo, además que el gobierno puede acelerar el desarrollo creando incentivos o subsidios (FAO, 1989).

Es importante la información sobre la interrelación entre obras y prácticas de conservación de suelo y de reducción de escurrimientos, debido a que la heterogeneidad de la topografía del país e incluso dentro de una misma unidad de producción, junto con diversificación de cultivos, hace que para los productores sea eficiente combinar varias prácticas dentro de un esquema general de conservación. En tales contextos, los subsidios pueden tener un efecto mayor que el esperado sobre las actividades complementarias (y, a la inversa, un efecto menor que el esperado sobre las prácticas que son sustitutas) (Lichtenberg 2001).

Las estrategias de planeación del uso del suelo deben basarse en el adecuado manejo integrado de suelo, agua y cultivos para incrementar la productividad agrícola sustentable, tomando en cuenta que el uso inapropiado del suelo normalmente está sujeto a cuestiones políticas y socio-económicas locales. El marco de planeación para lograr el uso sustentable del suelo debe considerar la complejidad de los problemas y procesos ambientales derivados de la degradación de tierras, de la escala local a regional y de nacional a global. Esta comprensión es esencial para desarrollar enfoques realistas para la aplicación efectiva de prácticas de conservación de suelo y agua para prevenir la degradación de tierras y para el logro del uso sustentable de tierras. Cualquier planificación debe permitir su refinamiento conforme se acumule experiencia por el adecuado monitoreo del sitio y debe conciliar lo que se debe hacer, basado en factores biofísicos, con lo que se puede hacer, basado en condiciones socio-económicas, y la capacidad e interés de los usuarios de la tierra (Pla, 2002).

FAO (2000) señala nueve principios generales que se deberían considerar como lineamientos básicos para desarrollar estrategias para los sistemas de manejo de suelos:

1. Aumentar la cobertura de suelos.
2. Aumentar la materia orgánica del suelo.
3. Aumentar la infiltración y retención de humedad.
4. Reducir el escurrimiento.
5. Mejorar las condiciones para el desarrollo radicular.
6. Mejorar la fertilidad química y la productividad.
7. Reducir los costos de producción.
8. Reducir la contaminación del suelo y del ambiente.
9. Proteger las parcelas.

Para cumplir con estos principios hay que mejorar los sistemas de labranza del suelo y el uso y manejo de la vegetación para desarrollar una estructura estable del suelo, ya que la erosión y la pérdida de agua no sólo se combaten con las obras mecánicas, sino con ambas alternativas en combinación; de esta manera se logra que el agua de lluvia no escurra sobre la superficie, sino que se infiltre en el suelo.

Las causas principales de la degradación del suelo es la deforestación asociada a los cambios de uso de suelo y actividades agropecuarias que representan 51.3 % del área degradada, las prácticas agrícolas inadecuadas, el riego excesivo, la quema de residuos de cosecha, el exceso de labranza y la falta de

prácticas de conservación de suelo y agua. Las consecuencias de la degradación del suelo son la erosión y sedimentación en lagos, ríos y lagunas; la disminución en la captación de agua y recarga de acuíferos; las inundaciones; la reducción del potencial productivo por la pérdida paulatina de fertilidad de suelos y los impactos negativos en la biodiversidad, cuyos efectos resultantes son la pobreza y la migración de la población rural. Por ello, es importante considerar acciones de protección, conservación y restauración de suelos integradas al manejo de los recursos naturales que contribuyan a mantener y mejorar la condición del suelo, encaminado a la producción sustentable. Debido a esta situación, las instituciones gubernamentales y de enseñanza e investigación del país han generado conocimiento e información que permite implementar acciones y programas que reviertan y reduzcan la degradación de los suelos. Al respecto, la CONAFOR recomienda que para llevar a cabo un programa integral de conservación y restauración de suelos se utilicen prácticas vegetativas, agronómicas y mecánicas que aparecen en su “Manual de Obras y Prácticas para Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales (Cardoza *et al.*, 2007):

Obras para el control de erosión en cárcavas	Presas	Presa de malla de alambre electrosoldada o ciclónica
		Presa de morillos
		Presa de ramas
		Presa de piedra acomodada
		Presa de geocostales
		Presa de llantas
		Presa de mampostería
		Presa de gaviones
	Obras en taludes	Cabeceo de cárcavas
		Estabilización de taludes
Obras para el control de erosión laminar	Terrazas	Protección y conservación de caminos
		Terrazas de muro vivo
		Terrazas de formación sucesiva
	Zanjas	Terrazas individuales
		Barreras de piedra en curvas a nivel
		Zanjas trinchera (tinas ciegas)
		Sistema de zanjas-bordo
		Zanjas derivadoras de escorrentía
		Bordos en curvas a nivel
		Roturación
Prácticas vegetativas	Cortinas rompevientos	
	Enriquecimiento de acahuales	
	Sistemas agroforestales	
		Acomodo de material vegetal muerto

Por otro lado, la SAGARPA (2012) ha generado información técnica sobre obras y prácticas de conservación de suelo y agua que se encuentra disponible en línea; cabe resaltar que no sólo se trata de prácticas mecánicas, sino también agronómicas y vegetativas, a nivel de cuenca y/o parcela, con las que se integró un catálogo de 11 tipos de obras principales para el uso sustentable del agua, 12 tipos de obras complementarias a la obra principal, 21 tipos de obras complementarias al proyecto integral y 22 tipos de prácticas vegetativas y agronómicas complementarias al proyecto integral.

Del mismo modo, FAO (2000) enumera algunas prácticas para la conservación del suelo y agua como:

- Cobertura del suelo
- Cultivos en contorno
- Abonos verdes
- Barreras físicas para el control y encauzamiento de la escorrentía
- Control de cárcavas
- Métodos de captación de agua de lluvia in situ e irrigación

En México se han utilizado la mayor parte de este tipo de obras y prácticas de conservación con el apoyo de los programas del gobierno federal, estatal y municipal y con la aprobación de los productores para conservar o recuperar los suelos que han estado sometidos a los procesos erosivos. De esta forma, se han establecido programas de conservación de suelos en zona agrícolas utilizando prácticas agronómicas (manejo de residuos de cosecha, abonos verdes, aplicaciones de abonos orgánicos), o mecánicas (surcado al contorno, terrazas y cauces de desviación o de regulación de escurrimientos). Para las zonas de agostadero y pastizales se han establecido prácticas de manejo de la vegetación, rotación de potreros y control del pastoreos para tener la biomasa o forraje para el ganado, que se han complementado con el establecimiento de obras de captación de agua de lluvia o de desviación de escurrimientos y programas de recuperación de suelos donde se realizan subsoleos, tinas ciegas, zanjas y bordos de contención de los escurrimientos.

Los trabajos de conservación del suelo y agua realizados se han evaluado principalmente desde la perspectiva del cumplimiento de las metas propuestas, y ocasionalmente se ha evaluado la eficiencia y eficacia para lograr los objetivos propuestos con indicadores de eficiencia técnica, impacto en la productividad, mejoramiento de la calidad del suelo o servicios ambientales alcanzados.

3.1.3. Evaluación de obras y prácticas de conservación del suelo y agua (CONSA)

La evaluación de obras y prácticas de conservación de suelo y agua puede hacerse de varios modos y desde diversas perspectivas, de acuerdo a los indicadores que se quieran medir, ya sean cualitativos o cuantitativos.

La erosión del suelo en tierras agrícolas ubicadas en pendientes plantea un grave problema para el ambiente y la producción. En áreas con suelos altamente erosionables es crucial la aplicación de medidas de conservación de suelo y agua para sostener rendimientos agrícolas y prevenir o reducir la degradación de tierras (Bühlmann *et al.*, 2010).

La evaluación de los procesos de degradación de suelo y agua debe permitir el diseño de estrategias de manejo y usos de suelo productivos y sustentables que garanticen la protección de ambiente, prevenga los efectos de diferentes combinaciones de clima, suelo, pendiente y manejo, incluyendo eventos extraordinarios con bajos periodos de retorno. Para ello, se requiere cambiar la mayoría de las evaluaciones actuales empíricas, subjetivas y cualitativas por evaluaciones cuantitativas basadas en procesos hidrológicos, conservación y mejoramiento de la calidad del suelo, reducción de los escurrimientos superficiales y aumento de la infiltración del agua que pueda ser aprovechada por los cultivos para una producción sustentable. Las evaluaciones deben tomar en consideración que la degradación del suelo no sólo causa problemas en el sitio, sino que puede causar serios problemas fuera del sitio. Un enfoque hidrológico facilita una evaluación más integral a ambos niveles (Pla, 2002).

Delgadillo y Delgado (2003) analizaron y evaluaron los indicadores de sustentabilidad de la implementación de actividades de conservación de suelos en la comunidad de Chullpa K'asa, Bolivia, a través de una comparación transversal entre los sistemas que siguen prácticas de conservación y los que no lo hacen. Para ello utilizaron el Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando los Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), y aplicaron la metodología de Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando los Indicadores de Sustentabilidad (IPR), propuesta y utilizada por AGRUCO (Agroecología Universidad Cochabamba), para complementar y profundizar el estudio. El MESMIS fue seleccionado por ser una herramienta metodológica idónea para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de manejo de recursos naturales, con énfasis en los pequeños agricultores y su contexto local. Conjuntamente se optó por la IPR como proceso metodológico que tiene el papel de generar conocimientos y/o revalorizar los conocimientos locales desde la perspectiva de los actores sociales (locales y externos), para la comprensión de la realidad en un determinado contexto espacial y temporal, encaminado hacia la búsqueda de opciones para el desarrollo rural sostenible (AGRUCO 1998). El MESMIS enfatizó en los aspectos materiales y cuantitativos, la aplicación del enfoque HCL y la IPR de AGRUCO permitió complementar el estudio y evaluar el caso en forma integral, con énfasis en los aspectos socioculturales y en el uso de indicadores cualitativos.

Cotler *et al.* (2013) evaluaron la efectividad de las prácticas de conservación de suelos en el Centro de México en términos de indicadores de calidad del suelo y de indicadores sociales de la aceptación y ejecución de las mismas. Cuantitativamente evaluaron variables físicas y químicas del suelo como

indicadores de la recuperación de la habilidad del suelo para mantener la productividad forestal y regular el ciclo hidrológico (funciones que busca recuperar el programa gubernamental de conservación y restauración de suelos forestales); los indicadores utilizados fueron porosidad total, carbono orgánico total y nitrógeno total (determinación simultánea), pH y contenido de humedad; también incluyeron la textura del suelo no como un indicador, sino como un parámetro contextual para la interpretación de resultados. Al mismo tiempo y para obtener los indicadores cualitativos, se realizó una entrevista semi-estructurada a los representantes de los núcleos agrarios de los sitios de estudio para evaluar la percepción, aceptación, ejecución y adopción de las prácticas de conservación de suelos. Después de cuatro años de medidas de conservación de suelos como zanjas, terrazas individuales o disposición de material vegetal en áreas de propiedad común, los indicadores del suelo como densidad, carbono total, nitrógeno total y pH en nueve sitios y 54 parcelas no mostraron diferencias en las propiedades del suelo involucradas en productividad y regulación hidrológica, en comparación con los grupos de control (suelos sin acciones de conservación). Los resultados sugieren que las prácticas de conservación no están mejorando ninguna de esas funciones en relación a las propiedades *in situ* pero no se realizó un análisis de los cambios en los regímenes hidrológicos que se presentaron en el área de estudio que también es un objetivo de los programas de regulación hidrológica y de conservación de suelos. Los indicadores sociales revelaron que el programa de conservación de suelo sólo fomenta la participación a través de estímulos económicos sin considerar que el interés no financiado puede jugar un rol importante, por lo que el grado de adopción y réplica de estas medidas es bajo.

El USDA-NRCS (2011) realizó una evaluación de las obras de conservación en tierras de cultivo en la región de los "Grandes Lagos"; el estudio se diseñó para evaluar los efectos de las prácticas de conservación a escala regional y proporcionar una mejor comprensión de cómo las prácticas de conservación beneficiaron el ambiente y determinar cuáles son los retos pendientes. El estudio evaluó el grado de uso de prácticas de conservación en la región de 2003-2006, los beneficios y efectos ambientales de las prácticas de conservación en uso y se propusieron los tratamientos de conservación necesarios para la región considerando las ganancias potenciales que podrían obtenerse con tratamientos de conservación adicionales. Para evaluar los efectos en campo de las prácticas de conservación, se usó un modelo de procesos físicos a escala de campo llamado APEX (Agricultural Policy Environmental Extender), que simula las labores de labranza día a día, erosión hídrica y eólica, pérdida o ganancia de carbono orgánico del suelo y los límites de las pérdidas en campo de suelo, nutrientes y plaguicidas. También se usó el modelo HUMUS (the Hydrologic Unit Model for the United States) para simular cómo la reducción de las pérdidas de suelo en campo han reducido los caudales, las cargas de sedimentos, nutrientes y plaguicidas dentro de la Región de los Grandes Lagos; así mismo, se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular

cargas de fuentes no puntuales de otros usos de la tierra que no sean tierras de cultivo y para transitar los caudales de una cuenca a otra. Los resultados de la modelación mostraron que se redujo el escurrimiento superficial, la erosión eólica, la producción de sedimentos, la pérdida de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, y plaguicidas, lo que se tradujo en una mejora considerable en la calidad del agua de los arroyos y ríos de la región.

Cruickshank (2003) reportó la cosecha de agua en las cuencas de oriente del Ex Lago de Texcoco, producto de los trabajos de reforestación en las más de 179 mil hectáreas de la Cuenca Tributaria Oriental del Valle de México, que influyen en el mejoramiento del ambiente, la producción de oxígeno, la formación que suelos y que, asociados con las obras y prácticas de conservación de suelos (terrazas, subsoleo y la construcción de presas de control de azolves escalonadas, zanjas trincheras y pozos de absorción), aumentan la infiltración del agua en el suelo para recargar acuíferos. Para cumplir los objetivos se reforestaron más de 16 mil hectáreas y se construyeron 1,308 presas, lo que indica que se trabajó con reforestación en un 10% del área de drenaje de las cuencas de oriente con lo que se logró una disminución promedio del 54% del escurrimiento medio anual, con eficiencias que variaron de 23.2% a 80.3% y una reducción promedio de los escurrimientos máximo de 55.8 a 20.9 m³/s, lo que permitió diferentes eficiencias de las obras y prácticas para reducir los escurrimientos máximos de 36.6 a 87.3% lo que muestra las bondades de las obras para cosecha de agua (Cuadro 1).

Cuadro 1. Trabajos efectuados y gastos máximos en la Cuenca Tributaria Oriental del Valle de México.

Cuenca	Área (Km ²)	Área reforestada (ha)	Presas construidas	Disminución del escurrimiento (%)	Qmáx (m ³ /s)		Eficiencia (%)
					1943-1980	1981-1988	
San Juan Teotihuacán	491	3,511.33	32	23.17	42.6	21.2	50.2
Papalotla	210	3,406.35	107	63.56	124	59.8	51.8
Xalapango	59.1	686.27	68	57.27	28.7	14	51.2
Coxcacoaco	61.5	1,294.37	43	39.86	54.9	34.8	36.6
Texcoco	31.2	1,135.27	64	67.98	65	14.4	77.8
Chapingo	21.4	652.49	182	72.15	57.5	7.6	86.8
San Bernardino	17	590.53	217	80.30	79	10	87.3
Santa Mónica	55.8	983.27	129	59.41	63.1	14.8	76.5
Coatepec	49.8	1,431.37	119	47.28	9.3	7.4	20.4
San Francisco	151.5	2,609.23	347	35.97	43.9	16.8	61.7
La Compañía	293.5	537.95	-	-	14.4	5.9	59.0
Amecameca	350	-	-	-	86.6	44.2	49.0
	1,791.8	16,837.8	1,308	54.7	55.8	20.9	62.5

Fuente: Elaborado con información de Cruickshank 2003.

Adame y Martínez (1999) evaluaron el impacto de las obras de rehabilitación de suelos en algunas variables hidrológicas, antes y después de manejo por medio de un análisis estadístico de datos anuales de los escurrimientos superficiales, escurrimientos máximos instantáneos, el coeficiente de escurrimiento, producción de azolves y degradación específica, encontrando una disminución significativa cercana al 80 %.

La información se agrupó en dos períodos: de 1946-1977 y de 1978-1990, antes y después del proyecto, respectivamente. Para ambos períodos, estos investigadores calcularon los estadísticos descriptivos básicos de las variables hidrológicas valoradas en el procedimiento de medias (MEANS) del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS), que consistió en obtener la media, la desviación estándar, y el valor máximo y mínimo, con el objeto de contrastar y conocer la variación de los variables el periodo de estudio. Posteriormente se efectuó una prueba de medias usando para ello la técnica estadística *t* de Student. El valor absoluto de *t* se comparó con el valor de la distribución *t* de Student de dos colas, con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y con un 5 % de nivel de significancia (Figura 1).

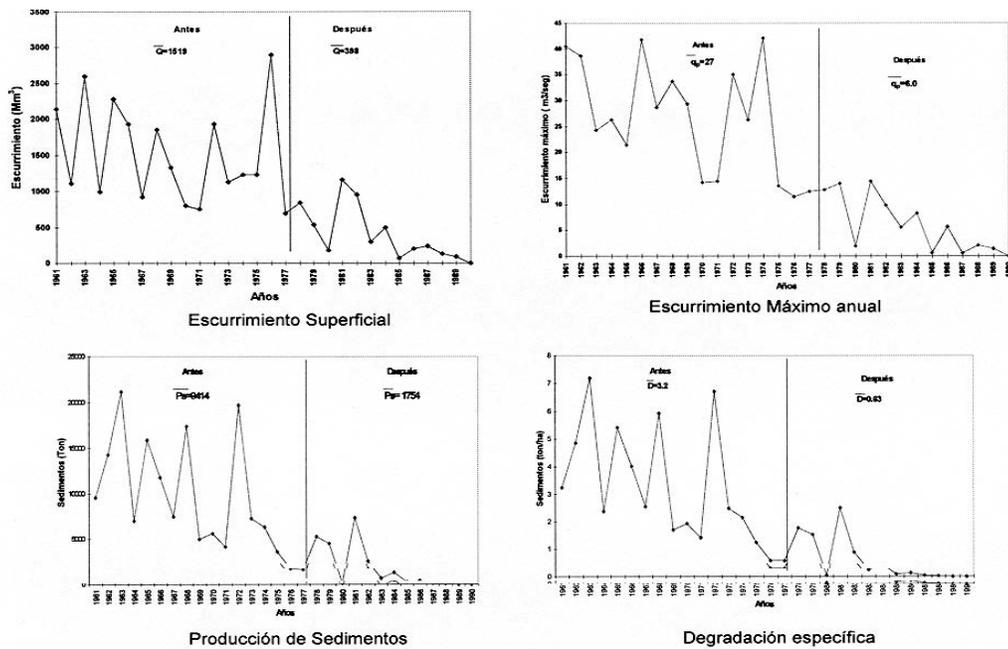


Figura 1. Variación temporal (antes y después de las obras) de las variables hidrológicas del río Texcoco.

Lajiao et al. (2012) recomiendan la identificación de Áreas Fuente Críticas (CSA por sus siglas en inglés), caracterizadas por erosión severa y alta producción de sedimentos y que deben ser consideradas prioritarias para su conservación; identificarlas y evaluar la efectividad de obras de conservación es una cuestión clave en el sitio, especialmente en el manejo de cuencas. El objetivo del estudio fue evaluar la efectividad de las prácticas de conservación ubicadas en las CSA usando el modelo SWAT. La identificación de CSA se basó en la erosión anual promedio de cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU por sus siglas en inglés). Se diseñaron prácticas de conservación de suelo apropiadas para las CSA y se estableció un escenario con prácticas de conservación para toda la cuenca como el esquema de contraste homólogo y luego se comparó con el resultado de las prácticas de conservación focalizadas en las CSA. El resultado muestra que SWAT puede simular con precisión la producción de sedimentos en el área de estudio. Las CSA se ubicaron

principalmente en áreas de cultivo con pendientes y en barrancos escarpados, coincidentes con la distribución del uso de suelo y pendientes. Las CSA identificadas cubrieron 20 % de las HRU y contribuyeron en promedio con 44 % de producción de sedimentos. Las obras de conservación focalizadas en las CSA tuvieron una mayor efectividad en la reducción de los sedimentos ($24,115 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$) que las prácticas de conservación que cubrían toda la cuenca entera ($20,290 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$). Así, las prácticas de conservación focalizadas en las CSA son más efectivas que las prácticas de conservación generalizadas. Concluyeron que las obras de conservación que se enfocan en las CSA sí incrementan la efectividad en la reducción de sedimentos. Focalizar la ubicación de las prácticas de conservación basadas en el concepto de CSA ayudará al control de la calidad del agua en cuencas.

Existen también evaluaciones que implican factores sociales, muy importantes también, como lo es la adopción y/o ejecución de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua y cómo influye la tenencia de la tierra en la adopción de estas prácticas.

Bayard *et al.* (2006) investigaron los factores que influyen en la adopción y manejo de obras de conservación de suelos en Fort-Jacques, Haití. Los resultados mostraron que las características personales de los granjeros, factores institucionales (como agrupaciones locales), conocimiento previo sobre conservación de suelo, ingresos per cápita y el tamaño de la granja influyen en la adopción de actividades de conservación de suelos. La educación, ingresos familiares per cápita, participación en grupos locales, la interacción del ingreso familiar per cápita y la edad de los granjeros influyen en el manejo de muros de piedra.

Kassie *et al.* (2008) realizaron un trabajo cuyo objetivo era clarificar cuestiones acerca de los incentivos a los agricultores para adoptar las obras y prácticas de conservación de suelo y agua mediante la estimación de la variación en el rendimiento por hectárea obtenida por la utilización de curvas a nivel en las tierras altas del noroeste de Etiopía. Los principales problemas que encontraron fue que estos programas a menudo no toman en cuenta los beneficios de los programas de conservación de suelo y agua, ya que se consideran como programas de apoyo sociales que en lugar de aumentar los ingresos de los agricultores, los reducen. Otro aspecto importante fue que el costo de construcción y mantenimiento de estas tecnologías puede ser muy alto. No hicieron un análisis de costo-beneficio completo porque encontraron que los beneficios brutos en todos los modelos fueron negativos; además, los agricultores no obtuvieron incrementos en el rendimiento por el uso de las tecnologías. Debido a este hecho, profundizaron para evaluar si el tipo de cultivo o la permanencia de las obras influyeron en las diferencias de rendimiento y si hay maneras de modificar la tecnología para aumentar la productividad y, por tanto conciliar los objetivos sociales y privados.

Neef (2001) examinó el impacto que tiene la tenencia de la tierra con la adopción de medidas de conservación de suelo y determinó la influencia de las inversiones a largo plazo en la seguridad de la tenencia de la tierra. La investigación tuvo un análisis cuantitativo y cualitativo, analizando los datos con pruebas paramétricas y no paramétricas y con herramientas de estadística descriptiva; la seguridad de la tenencia de la tierra influye porque quienes no son dueños de la tierra no tienen permitido la plantación de árboles, o bien, la agricultura está en conflicto con la política gubernamental de reforestación. Soule *et al.* (2000) usaron un modelo de adopción logit con datos de 914 productores de maíz de EUA para analizar la influencia de la tenencia de la tierra en la adopción de prácticas de conservación; la conclusión del estudio es que es menos probable que los arrendatarios usen labranza de conservación respecto de los propietarios Ferrer y Nieuwoudt (1998) analizaron la heterogeneidad en decisión de conservación de suelos de 53 granjeros de caña de azúcar en KwaZulu-Natal, utilizando un análisis de componentes principales y regresiones múltiples. Labranza mínima y construcción de terrazas de desagüe fueron los métodos más usados, mientras que el uso de labranza de conservación es menos común. Los resultados indican que las demandas de obras de conservación de suelos por parte de los granjeros, dependen de las ventajas que le ofrecen las prácticas de conservación de suelos y las interacciones entre prácticas son importantes para explicar sus elecciones. La variación intra-granja en el uso de métodos de conservación de suelos es relativamente pequeño en comparación con su variación inter-granja. Programas de educación, difusión de información y mejora de las habilidades técnicas de los granjeros para la conservación de suelos tienen implicaciones para la adopción global de la conservación de suelos, mientras que los tipos de información proporcionada, programas de seguros contra incendios y los subsidios para la conservación de suelos tienen implicaciones para la combinación de prácticas adoptadas.

La relación costo-efectividad de las prácticas de conservación de suelo y agua puede incrementarse en gran medida si se establece previamente un objetivo de equilibrio y si se usa la planeación multi-objetivo como base para la toma de decisiones. Para ello, se debe tomar en cuenta que aunque los principios generales para el control de la degradación del suelo son los mismos en todos lados, no hay soluciones pre-fabricadas a la degradación de tierras que puedan aplicarse universalmente y que cada situación requiere estrategias de planeación adaptadas a sus propias circunstancias y condiciones locales (Pla 2002).

Adame *et al.* (2000) realizaron una evaluación económica *ex post* de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua construidas en la cuenca del Río Texcoco. Se cuantificaron los costos erogados en la construcción de terrazas, de presas de control de azolves y en las reforestaciones. El costo total calculado fue cercano a 5.4 millones de pesos de 1996. Los beneficios económicos generados por el proyecto se diferenciaron dentro y fuera de la cuenca. Los beneficios dentro de la cuenca fueron: a) la recarga del

acuífero con 19.8 millones de metros cúbicos de agua infiltrada, y b) la producción adicional de maíz (*Zea mays* L.) en 349.2 ha de terrazas construidas. El beneficio fuera de la cuenca fue la disminución de la producción de sedimentos, estimada en 6,383 m³. El total de beneficios ascendió a casi 8.1 millones de pesos de 1996. Con los datos de costos y beneficios anuales, mediante la técnica del flujo de efectivo se obtuvo una Relación Beneficio-Costo de 1.05, Valor Actual Neto de \$205,457.00 y Tasa Interna de Rentabilidad de 12 %. Se concluyó que el proyecto resultó rentable, pues además de recuperar la inversión, se obtuvo un rendimiento anual real de 12 %.

Pimentel *et al.* (1995) examinaron las formas en que la erosión reduce la fertilidad del suelo y la productividad de cultivos, evaluaron los costos ambientales y económicos de la erosión del suelo y compararon varias técnicas y prácticas agrícolas que reducen la erosión y ayudan a conservar los recursos suelo y agua.

Lichtenberg (2001) utilizó datos de mediciones en granjas combinados con información sobre precios unitarios de construcción de siete prácticas de conservación de suelo y reducción de escurrimientos para estimar modelos de demanda para cada una de esas prácticas.

Jackson-Smith *et al.* (2010) examinaron las fortalezas y debilidades de utilizar los registros oficiales del USDA-NRCS sobre la participación en el programa de conservación como un indicador de patrones espaciales y temporales de implementación y mantenimiento de Mejores Prácticas de Manejo (BMP por sus siglas en inglés). Las entrevistas de campo con participantes del programa de conservación revelaron limitaciones potenciales con los registros oficiales con respecto a:

- 1) Documentación de la incidencia exitosa de BMP,
- 2) Naturaleza de las BMP implementadas,
- 3) Calendarización y ubicación de las BMP implementadas y
- 4) Información del uso y mantenimiento a largo plazo de las BMP implementadas.

Los resultados sugieren que los registros oficiales deberían ser verificados en campo antes de ser usados como indicadores de uso de BMP. Los hallazgos también apuntan a una mayor necesidad de desarrollo de sistemas más robustos y precisos para el seguimiento y mantenimiento de BMP durante el tiempo.

3.2. SERVICIOS AMBIENTALES

3.2.1. Antecedentes

Si bien es cierto que el concepto **servicios ambientales** es relativamente reciente y permite un enfoque más integral para interactuar con el entorno, la realidad es que la sociedad humana se ha beneficiado de dichos servicios desde sus orígenes, la mayoría de las veces sin tomar conciencia de ello. La subsistencia y el

desarrollo de la sociedad estriban en el aprovechamiento de los recursos naturales, pero el frenesí consumista por conquistar y poseer, aunado a los agresivos modos de apropiación y explotación, han conducido a la extinción de especies animales y vegetales, así como un deterioro del medio natural, irreversible en muchos casos (SEMARNAT, 2004).

Hemos llegado a este punto crítico fundamentalmente por la inadecuada valoración que la sociedad hace de los ecosistemas naturales y la forma en que éstos contribuyen a la supervivencia y bienestar de la misma; padecemos de una “subvaloración persistente” de los servicios aportados por la biodiversidad, los ecosistemas, la naturaleza y el ambiente, ya que dichos servicios ambientales y los ecosistemas que los proveen son “bienes comunes”, por cuyo aprovechamiento no se paga, lo que lleva a su sobreexplotación e incluso a destruir definitivamente el flujo sostenido de estos servicios ambientales (FAO, 2009).

El campo del estudio de los servicios ambientales y sus aplicaciones para la toma de decisiones ha venido tomando un fuerte impulso. A pesar de nuestro creciente entendimiento acerca de qué son los servicios, de qué factores biofísicos y sociales dependen, cómo benefician a las personas y cómo podemos asegurar su provisión, aún queda mucho por hacer; es necesario profundizar acerca de la relación entre los componentes, condiciones y procesos de los ecosistemas y los diversos servicios que proporcionan (Balvanera y Cotler, 2007a).

3.2.2. Definición

Las primeras referencias sobre la función y los servicios ambientales datan de mediados de los 60's y principios de los 70's (De Groot, *et al.*, 2002). A partir de entonces han aparecido una gran cantidad de publicaciones sobre el beneficio que los ecosistemas naturales proveen a la sociedad (Daily, 1997; Costanza, *et al.*, 1997; de Groot, *et al.*, 2002 y Lobo, 2001).

Es común encontrar el término de servicios ambientales como sinónimo de servicios ecosistémicos. El marco de referencia de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, (MEA, por sus siglas en inglés, 2005) hace mención explícitamente al término servicios ecosistémicos (o servicios de los ecosistemas) y en ningún caso a servicios ambientales (Madrigal y Alpízar, 2008). Según Balvanera y Cotler (2007b), los términos servicios ecosistémicos y servicios ambientales pueden utilizarse indistintamente, aunque difieren en su contexto. La utilización del primero enfatiza el hecho de que es el ecosistema (el conjunto de organismos, condiciones abióticas y sus interacciones) el que permite que los seres humanos se vean beneficiados, mientras que el término de servicios ambientales es utilizado principalmente por tomadores de decisión y otorga más peso al concepto de ambiente en el cual no se especifica las interacciones necesarias para proveer dichos servicios.

En SEMARNAT (2004) se usa el término indistintamente, y en este estudio utilizaremos el primero por conveniencia, ya que en el *argot* es más común escucharlo de esa manera, por lo que es necesario tener en cuenta la diferencia entre bienes ambientales y servicios ambientales. Los primeros son productos tangibles de la naturaleza, como madera, frutos, agua, suelo, plantas medicinales, de los que la sociedad obtiene beneficios directamente; en cambio, los servicios ambientales son beneficios intangibles cuya utilización (si la hay) es indirecta, como captura de carbono, regulación del clima, belleza escénica, control de la erosión, y otros.

Existen muchas definiciones del término “servicios ambientales”; en palabras simples, la MEA (2005) dice que son todos los beneficios que las poblaciones humanas obtienen de los ecosistemas (Figura 2). Sanjurjo (2001) dice que los servicios ambientales son el conjunto de condiciones y procesos naturales que ofrecen los ecosistemas por su simple existencia y que la sociedad puede utilizar para su beneficio (reconociendo a su vez que la obtención de dichos beneficios implica costos ambientales). De Groot *et al.* (2002) comparte esta perspectiva ecosistémica y considera que en el estudio de los servicios es necesario destacar el subconjunto de funciones del ecosistema. Burstein *et al.* (2002) considera a los servicios ambientales como “la retribución por la mitigación del deterioro, restauración y/o incremento, en forma consciente, de los procesos ecológicos esenciales que mantienen las actividades humanas a través de la producción de alimentos, la salud, la generación de energía eléctrica, el mantenimiento del germoplasma con uso potencial para el beneficio humano, el mantenimiento de valores estéticos y filosóficos, la estabilidad climática, la generación de nutrientes y en general el aprovechamiento de los recursos naturales”. Finalmente, SEMARNAT (2004) e INE (2005) los definen como los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición de la sociedad por el simple hecho de existir, de manera natural o por medio de su manejo sustentable; esta es la perspectiva con la que se abordarán los objetivos de este estudio.



Figura 2. Vínculos entre servicios de los ecosistemas y bienestar humano. Fuente: MEA 2005

De todo lo anterior, se desprende que los servicios ambientales se basan en los componentes y procesos que integran los ecosistemas, siendo éstos algunos como:

- La regulación del clima y el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales.
- La generación de oxígeno.
- La captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes.
- La polinización de plantas y el control biológico de plagas.
- La belleza del paisaje y la recreación.
- La provisión de agua en calidad y cantidad suficientes.
- El control de la erosión, así como la protección, conservación y recuperación de suelos.
- La protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y las formas de vida.
- La degradación y el reciclaje de desechos orgánicos.

En años recientes, ante el acelerado deterioro del medio natural y gracias a un mayor y mejor entendimiento de las redes de la vida y de los beneficios que los ecosistemas y sus funciones representan para la sociedad, se ha vuelto imperativa la necesidad de buscar instrumentos que promuevan el mantenimiento a largo plazo de los servicios ambientales y que permitan dar un paso más hacia el tan necesario desarrollo sustentable (SEMARNAT, 2004).

3.2.3. Servicios ambientales hidrológicos

Uno de los servicios ambientales vitales que ha influido en el éxito o fracaso de las sociedades es el abastecimiento de agua potable debido a su importancia tanto para el consumo humano como para la producción de alimentos. Sin embargo, el aumento de las áreas urbanas, la deforestación y el cambio de uso de suelo han provocado una disminución significativa en la calidad y cantidad de dicho servicio, (Maderey y Carrillo, 2005), por lo que se perfila como uno de los retos ambientales futuros más importantes para el ser humano (Manson, 2004; IPCC, 2007). De los muchos servicios ambientales que las cuencas proporcionan, los servicios hidrológicos constituyen algunos de los más valiosos hablando económica y socialmente (Salszman et al. 2001).

En México podemos definir a los servicios ambientales hidrológicos de acuerdo con lo estipulado en la Ley de Aguas Nacionales (LAN Art.3-Fracc. XLIX, 2012) como los beneficios de interés social que se generan o se derivan de las cuencas hidrológicas y sus componentes, tales como regulación climática, conservación de los ciclos hidrológicos, control de la erosión, control de inundaciones, recarga de acuíferos, mantenimiento de escurrimientos en calidad y cantidad, formación de suelo, captura de carbono, purificación de cuerpos de agua, así como conservación y protección de la biodiversidad.

Los beneficios que los bosques implican a nivel local, regional e incluso a nivel mundial, derivan de su valor como fuente de abastecimiento de agua, centros de diversidad biológica, origen de diversos productos maderables y no maderables, sitios de recreación y estabilizadores del suelo ante procesos erosivos. Para el caso de los servicios ambientales hidrológicos, los bosques se han asociado con diversos servicios ambientales al nivel de cuenca hidrológica, ya que éstas conectan y abarcan ecosistemas terrestres, de agua dulce y costeros, llevando a cabo una amplia variedad de valiosos servicios ambientales, destacando según García *et al.*, 2007; Manson, 2004; Pattanayak, 2004; Posthel y Thompson, 2005:

- | | |
|---|--|
| 1) Regulación de los flujos de agua (control de inundaciones), | 5) Regulación del nivel freático, |
| 2) Conservación de la calidad del agua (purificación/filtración), | 6) Abasto de agua para uso agrícola, industrial, y doméstico |
| 3) Control de la erosión y sedimentación, | 7) Conservación de hábitats acuáticos |
| 4) Reducción de la salinización del suelo, | |

La inadecuada valoración de los servicios ambientales en las decisiones acerca del uso y manejo de cuencas está reduciendo los beneficios netos que las sociedades obtienen de ellas. Los cambios en uso de suelo disminuyen la habilidad de las cuencas para llevar a cabo su trabajo ecológico. La progresiva pérdida de estos servicios amenaza con dañar a los humanos por la disminución en la calidad del agua potable, costos de agua más altos que pueden afectar a las poblaciones más pobres en particular, menor productividad de

cultivos y menor producción hidroeléctrica por la reducción de flujos en la temporada seca (Posthel y Thompson, 2005).

3.2.4. Formas para valorar los servicios ambientales

De acuerdo con Cardoza *et al.* (2007), los recursos naturales son fundamentales para el desarrollo humano, sin embargo y a pesar de la situación actual de los mismos y que la sociedad es más consciente de ello, no se ha realizado una valoración suficiente para su conservación; el suelo, por ejemplo, por factores naturales y antropogénicos se deteriora y erosiona, disminuyendo así su productividad y repercute directamente en la pérdida de vegetación, reducción de los rendimientos de los cultivos y captación de agua. Estos niveles de degradación se han alcanzado por la falta de atención y regulación en su uso, además que las repercusiones sociales, económicas y ambientales no han sido valoradas en su totalidad.

Los beneficios que se generan por la presencia de los bosques y selvas se obtienen principalmente de los procesos y funciones biológicas propias del ecosistema que, además de influir directamente en el equilibrio ecológico, generan beneficios específicos tanto para las personas y las comunidades que habitan los ecosistemas como para la sociedad global en general (INE, 2005).

Ante el progresivo y preocupante deterioro ambiental, existe cada vez mayor interés por encontrar esquemas que permitan estimar y asignar valores objetivos a los bienes y servicios que los ecosistemas prestan a la sociedad, pues sólo de esta forma las acciones de conservación y restauración de la naturaleza surtirán el efecto deseado (SEMARNAT, 2004).

La valoración de los servicios ambientales se presenta como una opción muy viable para apoyar la conservación y el desarrollo sustentable (SEMARNAT 2004). La idea es que quienes se benefician de los servicios del ecosistema paguen *quid pro quo* (algo a cambio de algo) de manera directa y contractual a quienes manejan la tierra para garantizar la conservación y restauración de los ecosistemas (Wunder, 2007).

Actualmente hay mucha información sobre el valor socio-económico de los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas naturales y semi-naturales, pero mucha de ella está dispersa en la literatura académica, reportes de agencias gubernamentales e internet; además, aparece a escalas de análisis incompatibles y se clasifica diferente según cada autor, por lo que es necesario un marco estandarizado para su evaluación integral, con el fin de hacer posible un análisis económico ecológico comparativo. Por ello, De Groot *et al.* (2002) presentaron un marco y tipología conceptual para describir, clasificar y valorar las funciones, bienes y servicios de los ecosistemas en una manera clara y consistente. En el Cuadro 2 se muestra una clasificación para las posibles 23 funciones de los ecosistemas que proporcionan un número mucho mayor de bienes y servicios.

Cuadro 2. Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y semi-naturales.

Funciones	Procesos y componentes del ecosistema	Ejemplos de bienes y servicios
Funciones de Regulación	<i>Mantenimiento de procesos ecológicos esenciales y sistemas de soporte vitales</i>	
1. Regulación de gases	Rol de los ecosistemas en ciclos bio-geoquímicos (ej. balance de CO ₂ /O ₂ , capa de ozono, etc.)	1.1. Protección UV-b por O ₃ (prevención de enfermedades) 1.2 Mantenimiento de (buena) calidad del aire. 1.3 Influencia en el clima (ver también función 2).
2. Regulación climática	Influencia en el clima de la cobertura del suelo y de los procesos biológicos	Mantenimiento de un clima favorable (temperatura, precipitación, etc.) para, por ejemplo, asentamientos humanos, salud y otras.
3. Prevención de perturbaciones	Influencia de la estructura de los ecosistemas para amortiguar perturbaciones ambientales	3.1 Protección contra tormentas (arrecifes). 3.2 Prevención de inundaciones (bosques y humedales)
4. Regulación hídrica	Rol de la cobertura del suelo en la regulación del escurrimiento y descarga de ríos	4.1 Irrigación natural y drenaje 4.2 Medios de transporte
5. Abasto de agua	Filtración, retención y almacenamiento de agua dulce	Provisión de agua para uso consuntivo
6. Retención de suelo	Rol en la retención del suelo de la matriz de raíces de la vegetación y biota del suelo	6.1 Mantenimiento de tierra arable 6.2 Prevención de daños por erosión/sedimentación
7. Formación de suelo	Intemperismo de rocas, acumulación de materia orgánica	7.1 Mantenimiento de la productividad en la tierra arable. 7.2 Mantenimiento de suelos productivos naturales
8. Regulación de nutrientes	Rol de la biota en almacenamiento y reciclaje de nutrientes	Mantenimiento de suelos saludables y ecosistemas productivos
9. Tratamiento de desechos	Rol de la vegetación y biota en la remoción o desglose de compuestos y nutrientes	9.1 Control de la contaminación/desintoxicación 9.2 Filtración de partículas de polvo 9.3 Abatimiento de contaminación por ruido
10. Polinización	Rol de la biota en el movimiento de gametos florales	10.1 Polinización de especies de plantas silvestres 10.2 Polinización de cultivos
11. Control biológico	Control de poblaciones por medio de relaciones trófico-dinámicas	11.1 Control de plagas y enfermedades 11.2 Reducción de herbivoría (daño a cultivos)
Funciones de hábitat	<i>Proporcionar hábitats (espacio apropiado para vivir) para especies silvestres de plantas y animales</i>	
12. Refugio	Espacio apropiado para vivir para plantas y animales silvestres	Mantenimiento de diversidad biológica y genética (y así, la base para la mayoría de otras funciones)
13. Semillero	Hábitat apropiado de reproducción	Mantenimiento de especies cosechadas comercialmente
Funciones de producción	<i>Provisión de recursos naturales</i>	
14. Alimento	Conversión de energía solar en plantas y animales comestibles	14.1 Cacería, colecta de peces, frutos, etc. 14.2 Granjas y acuicultura de subsistencia a pequeña escala
15. Materias primas	Conversión de energía solar en biomasa para construcción humana y otros usos	15.1 Construcción y fabricación (maderas y pieles) 15.2 Energía y combustible (materia orgánica, madera combustible) 15.3 Forraje y fertilizantes (hojarasca)
16. Recursos genéticos	Material genético y evolución en plantas y animales silvestres	16.1 Mejorar la resistencia de cultivos a patógenos y plagas 16.2 Otras aplicaciones (cuidado de la salud)
17. Recursos medicinales	Variedad en sustancias (bio)químicas en, y otros usos medicinales de la biota natural	17.1 Medicamentos y productos farmacéuticos. 17.2 Herramientas y modelos químicos 17.3 Organismos de prueba y ensayos
18. Recursos ornamentales	Variedad de biota en ecosistemas naturales con (potencial) uso ornamental	Recursos para la moda. Artesanías, joyería, mascotas, culto, decoración y recuerdos
Funciones de información	<i>Ofrecer oportunidades para el desarrollo cognitivo</i>	
19. Información estética	Características atractivas del paisaje	Disfrute del paisaje (rutas escénicas, alojamientos)

Funciones	Procesos y componentes del ecosistema	Ejemplos de bienes y servicios
20. Recreación	Variedad de paisajes con usos recreativos (potenciales)	Viajes a ecosistemas naturales para ecoturismo, deportes de exterior, etc.
21. Información cultural y artística	Variedad de características naturales con valores artísticos y culturales	Uso de la naturaleza como tema en libros, películas, pintura, folclor, símbolos nacionales arquitectura, etc.
22. Información espiritual e histórica	Variedad de características naturales con valores espirituales y culturales	Uso de la naturaleza para propósitos religiosos o históricos (valor patrimonial de las características y ecosistemas naturales)
23. Ciencia y educación	Variedad de la naturaleza con valores científicos y educacionales	Uso de los sistemas naturales para excursiones escolares, etc. Uso de la naturaleza para investigación científica
Fuente: Tomado de De Groot <i>et al.</i> (2002).		

Se desconocen los patrones espaciales de provisión de los servicios, y por lo tanto las prioridades de conservación para su mantenimiento (Chan *et al.*, 2006); también debe tenerse en cuenta que tradicionalmente se ha asignado un valor a los bienes o productos ambientales que consumimos, lo que no ha sucedido con los servicios que obtenemos del entorno. Ello explica por qué el valor económico de dichos servicios es subestimado y los ecosistemas que los proporcionan son, en general, sobreexplotados y degradados (SEMARNAT, 2004).

Los trabajos realizados para valorar los servicios ambientales (*i. e.* Costanza *et al.*, 1997; Avila-Foucat, 2007; Sanjurjo e Islas, 2007; Wunder *et al.*, 2007) tienen el objetivo de mostrar a la sociedad los beneficios que se obtienen de los ecosistemas a través de un sistema de medición monetario. Los enfoques de la valoración y las herramientas disponibles para hacerlo son múltiples (Avila-Foucat, 2007; Sanjurjo e Islas, 2007) e implican una elevada complejidad, incluyendo el entendimiento de los múltiples componentes y procesos involucrados en el ecosistema, y la valoración de algunos o todos esos componentes; estos beneficios a las sociedades no se limitan a aspectos monetarios.

En la búsqueda de nuevos marcos conceptuales, nuevas metodologías y acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos y sus implicaciones para la toma de decisiones, es fundamental el intercambio de experiencias, perspectivas, éxitos y fracasos entre los interesados en el tema (Balvanera y Cotler, 2007a).

A pesar de la gran variedad de estas estrategias e instrumentos, el más popular y exitoso a la fecha es el que implica esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA) (Wunder *et al.*, 2007).

Wunder (2005) define al Pago por Servicios Ambientales (PSA) como “transacciones voluntarias mediante las cuales un servicio ambiental bien definido (o un uso de la tierra que promueva la provisión de ese servicio) es comprado por (al menos) un comprador a (al menos) un proveedor si y solo si el proveedor asegura la provisión continua del servicio (continuidad)”.

Desde el año 2003, en México se han diseñado e implementado un conjunto de programas de pago por servicios que incluyen pago por servicios hidrológicos (PSAH) y pagos por carbono, biodiversidad y agroforestería (PSA-CABSA), los cuales beneficiaron, hasta 2007, a 1,448 ejidos, comunidades rurales y pequeños propietarios, cubriendo un total de 683,000 ha (INE-TCCCR-CONAFOR, 2007).

3.2.5. Valoración de servicios ambientales hidrológicos

Dado que hay varias formas de valorar los servicios ambientales, en esta sección se abordarán las herramientas que permiten evaluar los servicios ambientales hidrológicos a escala de cuenca, a través de análisis hidrológicos a través del tiempo o de modelos matemáticos computarizados llamados modelos hidrológicos.

El análisis hidrológico consiste en analizar la información reportada por las estaciones hidrométricas y meteorológicas establecidas en las cuencas a través del tiempo para establecer las relaciones de precipitación - escurrimiento superficial - escurrimientos máximo anual y producción de sedimentos para antes o después de las obras y prácticas de conservación del suelo y agua. De esta forma, se pueden comparar los estadísticos básicos (mínimos, máximos, medios, desviación estándar y coeficientes de variación) de las variables hidrológicas de antes y después las obras para que los cambios positivos y/o negativos se asocien a las acciones realizadas, definiendo así, si existen diferencias estadísticamente significativas de la información hidrológica de ambos periodos. Los cambios obtenidos de las variables hidrológicas deberán estar asociados a las acciones realizadas y deben ser reconocidas como indicadores de impacto.

La modelación matemática de la hidrología de cuencas se emplea para abordar una amplia gama de problemas ambientales y de recursos hídricos. El término “hidrología de cuencas” se define como la rama de la hidrología que trata de la integración de procesos hidrológicos a nivel de cuenca para determinar la respuesta de ésta (Singh & Woolhiser, 2002). Las herramientas matemáticas de simulación que permiten al usuario comparar el efecto de varios escenarios de manejo son valiosas para identificar estrategias de manejo para alcanzar metas deseadas (Cho *et al.*, 2010).

Los enfoques hidrológicos son esenciales para evaluar la efectividad de las prácticas de conservación de suelo y agua y los servicios ambientales hidrológicos que proporcionan. Esto también permite combinar las características de clima con las de suelos, paisaje y tipos de uso de suelo. Al integrarse con información económica de uso de suelo a través del tiempo y usando modelación, la información generada puede ser usada en la planeación y selección de prácticas de conservación de suelo y agua basadas en probabilidades de éxito, niveles de riesgo y sustentabilidad a largo plazo (Pla, 2002).

La modelación hidrológica incluye ciertos desafíos como la adquisición de datos de sensores remotos, modelos de elevación digital del terreno, marcadores químicos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), representaciones topográficas, escalamiento de las ecuaciones hidrológicas de conservación, variabilidad espacial de rugosidad hidráulica, infiltración y precipitación, escala temporal y espacial, calibración de los modelos y vinculación con modelos de calidad del agua (Singh & Woolhiser, 2002). Hay varios aspectos a considerar al compilar conjuntos de datos SIG para su uso en modelación hidrológica a nivel de cuenca, especialmente cuando se usa el modelo como una herramienta de evaluación ambiental o como un sistema de respaldo de decisiones para el manejo de los recursos suelo y agua (Heathman *et al.*, 2009).

Los modelos deben basarse en relaciones causa-efecto bien establecidas para predicción, y ser suficientemente flexibles para tener la capacidad de incluir una amplia variedad de situaciones suelo-clima-cultivos-socioeconómicas, y mejorarse constantemente conforme se conozca más sobre la influencia de características específicas de los terrenos y el clima sobre los procesos de degradación. Es deseable desarrollar modelos que puedan mostrar resultados de interacciones entre recursos de la tierra, procesos de degradación, medidas de conservación y productividad durante los próximos años. La combinación de SIG y ese tipo de modelos ofrece la oportunidad de evaluar impactos ambientales de diferentes prácticas de conservación de suelo y agua y presenta un marco lógico para integrar el monitoreo subsecuente. (Pla, 2002). Los enfoques basados en factores permiten la aplicación usando un SIG y facilitan un escenario de modelación sencillo en áreas con datos limitados (Bühlmann *et al.*, 2010).

La integración de SIG y modelos hidrológicos proporciona al usuario la habilidad de simular procesos a escala de cuenca dentro de un ambiente espacialmente digitalizado basado en computadoras. El tipo de suelo y uso de suelo son capas de datos SIG esenciales usadas en una amplia gama de actividades gubernamentales y del sector privado, incluyendo inventario de recursos, manejo de tierras, ecología del paisaje y modelación hidrológica (Heathman *et al.*, 2009).

El análisis en sí, por modelos, SIG u otros, no aporta información nueva y cuando está basado en enfoques empíricos desarrollados por diferentes condiciones, para sustituir datos locales no disponibles, puede llevar a imprecisiones y errores de interpretación. En general, existe una necesidad de coleccionar información básica de manera más eficiente sobre los terrenos y sus usos para poder hacer una evaluación y modelación apropiadas (Pla, 2002). Evaluaciones, monitoreo y cartografía precisos a escala local son importantes para la planeación de la conservación, control de erosión y manejo de recursos naturales (Lal, 2001).

Se requiere una metodología para una adecuada caracterización y predicción cuantitativa de los procesos hidrológicos del suelo afectados para evaluar los problemas actuales y evaluar los impactos ambientales potenciales de diferentes medidas de conservación de suelo y agua. Además de las medidas bajo

condiciones precisas de laboratorio, útiles para entender los procesos hidrológicos, tienen que ser cuantificadas a alguna escala en campo (Pla, 2002).

En general, la calibración y construcción de un modelo, así como el procesamiento de datos ha recibido gran atención, mientras que la validación del modelo, la propagación del error y análisis de incertidumbre, riesgo y confiabilidad no se han tratado a fondo (Singh & Woolhiser, 2002).

Cuando los enfoques hidrológicos se aplican a una serie de escenarios de uso de suelo y sus impactos ambientales y cambio climático, los resultados pueden ser usados por tomadores de decisiones para la futura planeación y ordenación del uso de suelo. Este enfoque considera extrapolaciones fundamentadas y proporciona una base científica sólida que deja poco espacio a interpretaciones subjetivas, conduciendo a alternativas para diferentes usos de suelo y manejo para propósitos agrícolas y no agrícolas. Modelar los procesos hidrológicos ha probado ser una herramienta muy confiable para evaluación y predicción de los procesos de degradación de tierras para guiar estrategias de planeación para prácticas de conservación y manejo de suelo y agua bajo condiciones muy diferentes de clima, topografía, suelos, cultivos y manejo (Pla, 2002).

A pesar de que el uso de un modelo hidrológico puede facilitar la simulación los estudios en cuencas enfocados a los efectos programas de conservación, es importante que los usuarios sean prudentes al elegir los datos de entrada. La inadecuada parametrización de las propiedades del suelo y uso de suelo, ya sea por los datos de entrada o por el procesamiento de los datos en el modelo, conduce a la malinterpretación de los resultados; si los resultados de la modelación se basan en datos de entrada inadecuados, se complicaría la adecuada evaluación de los beneficios de las prácticas de conservación (Heathman ,2009).

Los enfoques basados en la evaluación de procesos hidrológicos bajo diferentes escenarios de cambio climático, propiedades del suelo y manejo del suelo y cultivos, con el uso de modelos prácticos y flexibles y programas de computadora, ayudaría a seleccionar o desarrollar paquetes tecnológicos más apropiados para reducir la degradación del suelo y agua y controlar su creciente impacto ambiental negativo y su efecto sobre la productividad de cultivos, degradación de ecosistemas y sobre eventos catastróficos derivados (Pla, 2002).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés) de Wischmeier y Smith (1978) es la herramienta de modelación más utilizada para evaluación espacial de riesgo de erosión; Renard *et al.* (1997) modificaron USLE para crear una Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE por sus siglas en inglés) para aplicaciones más amplias mediante la introducción de mejores medios de cálculo de los factores de la erosión del suelo. Así, ha habido un gran avance en el desarrollo de modelos hidrológicos,

para distintas regiones alrededor del mundo y con distintos propósitos, lo cual se expresa de manera más extensa y clara en trabajos como los de Singh & Woolhiser (2002) y Borah & Bera (2003).

Bühlmann *et al.* (2010) evaluaron el potencial de las medidas locales de conservación usando un enfoque de modelado espacial para proporcionar respaldo en la toma de decisiones para la planeación de usos sustentables de la tierra en Faizabad, Tayikistán. Establecieron un diseño de muestreo para realizar un análisis comparativo entre unidades bien conservadas y otras unidades de campo, con el objetivo de estimar factores que determinarían la erosión hídrica de acuerdo con RUSLE. El estudio mostró que la evaluación de la erosión y conservación en un área con cobertura vegetal no homogénea requiere la integración de cobertura vegetal a nivel de parcelas, que puede derivarse con efectividad de imágenes de satélite de alta resolución, proporcionando una base útil para la planeación de la conservación relacionado a las parcelas. Las evaluaciones de campo mostraron que 25.7 % del total de tierras de cultivo tiene medidas de conservación (terrazas, agroforestería y forrajes herbáceos perennes) y que estas acciones de conservación podrían reducir las pérdidas de suelos en un 11% para el surcado al contorno, el 16% utilizando plantas forrajeras, el 53% utilizando zanjas de drenaje, el 63% con agroforestería y hasta el 93 % con agroforestería combinada con terrazas. De hecho, la ejecución del escenario para diferentes tasas de erosión tolerables mostró que las medidas más costosas, intensivas y tecnológicamente avanzadas conducirían a una mayor reducción de pérdida de suelo. Sin embargo, dadas las condiciones económicas en Tayikistán, parece aconsejable respaldar la difusión de medidas de bajo costo y trabajo extensivo.

Cho *et al.* (2010) evaluaron los efectos en la calidad del agua de escenarios alternativos de prácticas de conservación usando la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT por sus siglas en inglés) en la cuenca experimental Little River. Simularon el efecto en la calidad del agua de dos conjuntos de prácticas de conservación en tierras altas, uno enfocado a la erosión y el otro a los nutrientes; también simularon el impacto de búfer de la vegetación riparia y finalmente, evaluaron tres diferentes escenarios de manejo implementando las prácticas de conservación en tierras altas. Para ello, utilizaron un enfoque aleatorio, considerando el orden de corrientes y las cargas de fuentes no puntuales de contaminantes por subcuenca como criterio de priorización; el estudio mostró que este último enfoque fue el mejor para aumentar la calidad del agua. Esta mejora en la calidad del agua fue no lineal, mientras que los otros esquemas establecidos tuvieron una respuesta lineal. La implementación total del conjunto de prácticas de conservación enfocadas a erosión resultó en las mayores reducciones de las cargas de sedimentos (54.7 %) y fósforo total (55.9 %) de las tierras altas. Las prácticas de conservación enfocadas en la reducción de nutrientes redujeron la carga total de nitrógeno en un 10.3 %. En general, la vegetación riparia buffer ofreció la reducción integral de cargas de fuentes no puntuales de contaminantes (20.5 % para sedimentos,

19.5 % para fósforo total y 7 % para nitrógeno total). Los resultados de la simulación indican que al tiempo actual, la cobertura vegetación riparia fue la que más contribuyó en la reducción de fuentes no puntuales de contaminantes en la cuenca del río Experimental.

Lee (2004), realizó la evaluación del riesgo de erosión del suelo y su verificación utilizando SIG y sensores remotos en Boun, Corea. Se colectaron y procesaron datos topográficos, de precipitación, suelo y uso de suelo y se estructuraron en una base de datos espacial usando SIG y datos de sensores remotos para aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés), de modo que se pudieran analizar y mapear las áreas que habían sufrido erosión de suelo. El uso de suelo se clasificó a partir de imágenes de satélite LANDSAT TM; el mapa de erosión de suelo se verificó usando los datos de localización de deslizamientos de tierra, que fueron identificados en el área de Boun a partir de interpretación de fotografías aéreas y recorridos de campo. Se concluyó que la integración de USLE con SIG permitió modelar el potencial por erosión de suelo, además que es un enfoque que permitió la integración de datos representativos de manera simple y relativamente rápida para aplicar USLE en una plataforma SIG y determinar cuantitativamente la pérdida de suelo y predecir el riesgo de erosión en un área grande. En esta investigación se aplicó una herramienta de conservación para modelar la erosión potencial del suelo, dadas las condiciones físicas y biológicas únicas en el área de Boun, Corea y fue posible predecir la pérdida de suelo a nivel de parcela y, en combinación con SIG, transformar esto en un mapa de erosión a escalas de reconocimiento.

Heathman *et al.* (2009) evaluaron el uso de diferentes combinaciones de sistemas de clasificación de suelo (el "Soil Survey Geographic", SSURGO y el "State Soil Geographic", STATSGO) y de uso de suelo (el "National Agricultural Statistics Service", NASS y el "National Gap Analysis Project", GAP) en Estados Unidos de América y sus efectos sobre el gasto modelado usando SWAT2005. El desempeño del modelo SWAT se probó en la cuenca "Cedar Creek" en el noreste de Indiana prediciendo los gasto diarios, mensuales y anuales y los resultados se calibraron usando el "Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient" (ENS), R^2 , el cuadrado medio del error (RMSE por sus siglas en inglés), la proporción del RMSE a la desviación estándar de los datos medidos (RSR) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Se encontró que el rango del error relativo (ej. PBIAS) y valores de ENS para la predicción del gasto sin calibrar en este estudio fueron similares a otros que han sido reportados en la literatura. Los valores simulados de gasto variaron de ligeras sobreestimaciones de ~ 5 % a subestimaciones del 25 al 41 % dependiendo de la combinación de los datos de entrada de suelo y uso de suelo. En general, los conjuntos de datos NASS-SSURGO dieron el mejor desempeño del modelo para gastos mensuales tendiendo un valor ENS de 0.58, R^2 de 0.66, RSR de 0.65 y PBIAS de 21.93. El desempeño más pobre del modelo se obtuvo usando los conjuntos de datos GAP-SSURGO, que tuvieron

valores ENS de -2.58, R^2 de 0.49, RSR de 1.89 y PBIAS de 27.92. Los resultados del estudio indican que en el uso del modelo SWAT, varios factores relacionados con los datos de entrada del SIG pueden afectar las simulaciones de gasto y consecuentemente, la evaluación de la calidad del agua. Además del efecto de las fuentes de datos SIG en las salidas del modelo, hay evidencia en este estudio de que la interacción, pre-procesamiento y conjunción de las combinaciones únicas de capas SIG de entrada dentro de SWAT también influye la salida del gasto simulado. En general, los resultados del estudio indican que el uso de diferentes capas SIG de uso de suelo tiene un efecto mayor en las estimaciones del gasto que las diferentes capas de tipo de suelo. Basados en sus resultados, el modelo SWAT mostró la mayor variación en las estimaciones de gasto al usar diferentes conjuntos de datos de uso de suelo, atribuyendo que una porción significativa de incertidumbre asociada con la modelación del gasto se debe a la incertidumbre en estimaciones de los parámetros de entrada, incluyendo suelos, uso de suelo y clima. Se debe hacer notar que aunque el modelo SWAT es sensible a las propiedades del suelo, la escala y extensión de la información de suelo no tiene un efecto sustancial en los resultados de la modelación del gasto de la cuenca de estudio.

Williams *et al.* (2010) evaluaron la aplicabilidad del modelo “Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica” (WEPP por sus siglas en inglés) para cuantificar procesos hidrológicos y de erosión en las tierras de cultivo semi-áridas de la meseta de Columbia. Se monitorearon dos cabeceras de cuencas manejadas con labranza convencional (LC) o no labranza (NL) de 2001 a 2007 en las tierras de cultivo del noreste de Oregón. El modelo WEPP se parametrizó primeramente con datos de campo, incluyendo datos de manejo y clima. Se observaron los parámetros de cultivos (biomasa sobre el nivel del suelo y rendimiento de cultivo), componentes del balance de agua (contenido volumétrico de agua en el suelo, evapotranspiración [ET] y escurrimiento superficial), y pérdida de suelo para subsecuentemente usarlos para ejecutar simulaciones con WEPP. Este conjunto de datos permitió evaluar no sólo las rutinas de WEPP para escurrimiento y erosión, sino también para el crecimiento de cultivos que influye en gran medida en la erosionabilidad y conductividad hidráulica de las capas superiores del suelo. Análisis gráficos y pruebas de bondad de ajuste indicaron que WEPP generó estimaciones satisfactorias para el contenido volumétrico de agua en el suelo y rendimiento de cultivos en NL y LC y producción de biomasa por encima del nivel del suelo en NL. Los valores de ET simulada con WEPP fueron comparables con los determinados usando datos observados de precipitación y agua en el suelo. Los valores anuales observados de escurrimiento y erosión de ambas cuencas fueron bajos (NL: 0.1 mm, 2.5 kg·ha⁻¹; LC: 0.9 mm, 72.0 kg·ha⁻¹). En promedio, sólo 0.3 % y 0.03% de la precipitación total se convirtió en escurrimiento durante los seis años de estudio para LC y NL, respectivamente. El escurrimiento y erosión estimados fueron similares con las observaciones de campo después de que se calibró efectivamente la conductividad hidráulica superficial (K_{eff}) y la erosionabilidad en surcos (K_r). Con la calibración mínima, el modelo WEPP fue capaz de representar exitosamente la hidrología,

transporte de sedimentos y crecimiento de cultivos para LC y NL durante años por debajo de la precipitación normal, clima templado y poco escurrimiento.

3.3. EVALUACIÓN O INDICADORES DE IMPACTO EN CUENCAS

Uno de los temas principales de la sustentabilidad es la definición de criterios e indicadores que permitan la caracterización del estado de los recursos, la población y la economía y, por ende, del territorio (Palacio *et al.*, 2004). El objetivo de los indicadores es proveer una base empírica y numérica para conocer los problemas, calcular el impacto de nuestras actividades en el ambiente y evaluar el desempeño de las políticas públicas. Los indicadores hacen más sencilla la valoración al simplificar fenómenos complejos y traducirlos en términos numéricos. Las mediciones ayudan a los tomadores de decisiones y a la sociedad a definir objetivos y metas. Cuando se les observa a lo largo del tiempo, deben ser capaces de comunicar información específica sobre el progreso e indirectamente evidenciar la eficiencia de los programas y políticas diseñadas para promover la sustentabilidad (Rodríguez, 2002).

La OCDE (Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo) (1993) definió que “los indicadores son datos estadísticos o medidas de una cierta condición, cambio de calidad o cambio en el estado de algo que está siendo evaluado. Proporcionan información y describen el estado del fenómeno objeto de estudio, pero con un significado que va más allá de aquel que está directamente asociado con un parámetro individual”, por lo que un indicador puede definirse, de manera general como “un parámetro o valor que señala o provee información o describe el estado de un fenómeno dado, por lo que conlleva dos funciones básicas: a) reducir el número de mediciones y parámetros que normalmente se requieren para reflejar una situación dada, y b) simplificar el proceso de comunicación con el usuario” INEGI (2000).

El indicador es una expresión práctica, sintética y específica, que señala una condición, característica o valor determinado en el tiempo (¿cuándo?), en la cantidad (¿cuánto?) y en la calidad (¿de qué tipo?). Los indicadores pueden ser cualitativos y cuantitativos, dependiendo de la naturaleza de lo que se requiere evaluar, estos deben ser medibles y verificables objetivamente, deben permitir el reconocimiento del éxito, fracaso o avance de la intervención. Mediante la definición correcta de los indicadores se asegura que los objetivos del proyecto sean claros y precisos, ya que justamente sirven para demostrar, con la evidencia correspondiente, los logros obtenidos y poder consecuentemente monitorear los avances. Al identificar y seleccionar los indicadores para una línea de base, es necesario tener en cuenta que éstos son índices que permiten describir, medir y evaluar los cambios, efectos e impactos de las actividades realizadas por la

intervención de un plan, programa, proyecto o actividad. Además, deben permitir valorar las condiciones iniciales o de base del proyecto y cuantificar los cambios producidos en el tiempo (Faustino *et al.*, 2006).

Para este trabajo, los indicadores seleccionados serán variables hidrológicas como precipitación, escurrimiento medio, coeficiente de escurrimiento, escurrimiento pico y degradación específica, algunas de las cuales se miden en la estación hidrométrica y la estación meteorológica y otras se calculan, observando su cambio para los dos diferentes periodos considerados, obteniendo la diferencia entre la variable antes y después de obras. Así mismo, se evaluará la eficiencia técnica según la fórmula de Mancilla *et al.* (2009) y por último, se incluirá el indicador de cambio de uso de suelo al catalogar y cuantificar los usos existentes antes y después de obras.

3.3.1. Cambio de uso de suelo

Vitousek (1994) identificó el cambio de uso de suelo como el impacto humano predominante en los sistemas naturales, siendo la urbanización quizá el agente de cambio de uso de suelo más severo por su permanencia y disimilitud con los hábitats naturales.

El cambio en el uso de suelo y vegetación, o en general el cambio de tipos de cobertura del terreno es, en mayor medida, consecuencia de la interacción de las actividades humanas con el medio natural. Dichos cambios indican el impacto de las actividades económicas y el desarrollo de las comunidades humanas sobre el territorio y sus recursos, y permiten identificar problemas relativos a la sustentabilidad de las actividades humanas. La identificación espacial y la cuantificación de los cambios contribuyen a la caracterización del territorio y a la ubicación de áreas de atención prioritarias, así como al establecimiento de políticas correctivas y a la formulación de planes de acción respectivos para el mejor manejo de los recursos (Palacio *et al.*, 2004).

De acuerdo con la UACH (2004), el cambio incontrolado de uso del suelo propició una gran degradación de los recursos naturales en las partes medias y altas de las cuencas del oriente del Valle de México, que se ha convertido en caótico en las últimas décadas. Los principales cambios de uso del suelo son los siguientes:

- a. La tala permanente en las estribaciones de la Sierra Nevada, afectando incluso a parques nacionales como el Ixta-Popo y áreas protegidas como Zoquiapan.
- b. La explotación de minas para materiales de construcción, que quita la vegetación existente y genera acelerados procesos de erosión y arrastre de materiales.
- c. El cambio de áreas agrícolas y forestales en zonas urbanas y fraccionamientos, realizando además construcciones dentro de los lechos de arroyos y en barrancas, generando contaminación de aguas negras por drenaje a cielo abierto y basura en los cauces de toda la cuenca. Este fenómeno se ha

agravado en los últimos años particularmente en el sur de la cuenca hacia los municipios de Texcoco, San Vicente Chicoloapan, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Los Reyes-La Paz y Chalco.

La evaluación del uso del suelo es uno de los parámetros más importantes para la planificación del uso de los recursos naturales. El conocimiento de la información del uso de suelo es esencial para un apropiado manejo, planificación y monitoreo de los recursos naturales; de esta manera, los sensores remotos son una fuente viable para reunir información de calidad sobre el uso de suelo a escalas local, regional y global de la tierra (Yacouba *et al.*, 2009).

3.3.2. Índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI)

Una de las aplicaciones más importantes de la teledetección es el seguimiento de los procesos que ocurren en la Tierra, porque permite conocer los procesos vegetales y edáficos de plazo mediano o largo. El análisis de la degradación forestal y la detección del cambio del uso de la tierra constituyen los principales ejemplos de aplicación de esta técnica. Las imágenes obtenidas en diferentes años pueden entonces ser comparadas siempre y cuando hayan sido captadas en el mismo período del año; se reduce así al mínimo la expresión de variables como la calidad de la luz, la geometría de la observación y, en el caso de los ecosistemas vegetales, las diferencias de comportamiento de la comunidad a lo largo del año (Singh, 1986; citado por Chuvieco, 1998).

De acuerdo con Yacouba *et al.* (2009), la detección del cambio de uso de suelo por sensores remotos es la técnica que se utiliza para la evaluación de los recursos donde imágenes de distintas fechas se comparan para determinar el tipo y cantidad del cambio que ha ocurrido.

El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) arroja valores estimados del «verdor» de la vegetación que resultan del análisis de datos obtenidos mediante imágenes de satélite. Se parte de la premisa de que el NDVI representa un indicador de la salud vegetal porque la degradación de la vegetación del ecosistema, es decir la reducción de su verdor, quedaría reflejada en el valor más reducido del NDVI. Por consiguiente, determinando la relación entre la magnitud de un indicador de varios ecosistemas forestales y el NDVI es posible hacer el seguimiento de los procesos de degradación de la vegetación (Meneses-Tovar, 2011). Este índice utiliza el contraste de las características de dos bandas de una imagen satelital: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectancia de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).

El NDVI se utiliza en todo el mundo para hacer seguimiento de sequías, supervisar y predecir la producción agrícola, ayudar en la predicción de las zonas con riesgo de incendio y cartografiar la desertificación. El NDVI

es muy utilizado en el seguimiento de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación y otros factores (Lillesand 2004).

La reflexión diferencial en las bandas roja e infrarroja (IR) le permite supervisar la densidad e intensidad del crecimiento de la vegetación verde utilizando la reflectividad espectral de la radiación solar. Las hojas verdes suelen presentar una mejor reflexión en el rango de longitudes de onda cercanas al infrarrojo que en el rango de longitudes de onda visibles. Cuando las hojas presentan falta de agua, o bien están enfermas o muertas, se vuelven más amarillas y se reflejan bastante menos en el rango de longitudes de onda cercanas al infrarrojo. Las nubes, el agua y la nieve presentan una mejor reflexión en el rango visible que en el rango de longitudes de onda cercanas al infrarrojo, mientras que la diferencia es casi nula para las rocas y el terreno desnudo. El cálculo del NDVI crea una imagen de banda única que básicamente representa el verdor. Los valores negativos representan nubes, agua y nieve, mientras que los valores cercanos a cero representan rocas y tierra desnuda.

La ecuación del NDVI documentada y predeterminada es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)}$$

Donde:

IR = valores de píxel de la banda infrarroja

R = valores de píxel de la banda roja

Este índice genera valores entre -1.0 y 1.0 que básicamente representan el verdor y donde cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0.1) corresponden a áreas desnudas, con rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0.2 a 0.3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0.6 a 0.8)

3.4. ACCIONES DE CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.4.1. Antecedentes

Briseño *et al.* (1982) y Cruickshank (1998) mencionan que uno de los afluentes del Ex-Lago de Texcoco en la parte oriente (sierras Tláloc y Telapón) es el Río Chapingo, cuya cuenca es el objeto de estudio de esta investigación.

Los trabajos de conservación realizados en la Cuenca del Río Chapingo desde los años 70's son parte de los programas de recuperación de áreas degradadas de la Comisión de Estudios del Lago de Texcoco, después

por el Plan Lago de Texcoco, luego por la Comisión del Lago de Texcoco y el actualmente Proyecto Lago de Texcoco.

De acuerdo con Cruickshank (1998), la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) realizó un estudio sobre las condiciones hidrológicas y ecológicas del Lago de Texcoco y para ello creó la Comisión de Estudios del Lago de Texcoco (CELT) que estableció una serie de programas, acciones, proyectos y obras de rescate para recuperar los suelos degradados, reducir la cantidad de azolves y de sales que llegan al Lago de Texcoco y disminuir las tolvaneras provocadas por los vientos convectivos y los vientos rasantes Noroeste y Sursureste que transportaban detritos fecales humanos y se depositaban en la ciudad de México y zonas aledañas, afectando seriamente la salud de sus habitantes (Briseño *et al.* 1982) e INEISA (1990). Los objetivos de la Comisión eran:

- Aprovechar al máximo las aguas que se puedan captar en la zona para fines agrícolas, industriales, recreativos y otros que se consideran asimismo convenientes para el Valle de México y las zonas aledañas.
- Crear lagos artificiales.
- Desarrollar en el área de influencia del Lago de Texcoco áreas forestadas, agrícolas, industriales y para habitación popular, así como vías de comunicación y los demás servicios correspondientes.
- Determinar las medidas que deban adoptarse para disminuir las tolvaneras en el Valle de México, que en parte se originan dentro del Lago de Texcoco.

La estrategia era construir cuatro lagos artificiales que serían alimentados por las corrientes de los ríos de oriente y se identificó que los posibles afluentes que los abastecerían de agua eran corrientes intermitentes, con avenidas no controladas y con gran cantidad de sedimentos producto de la degradación de los suelos provocada por la acelerada deforestación, el crecimiento de la mancha urbana y los cambios de uso del suelo (de bosque a agrícola). Los programas realizados que se iniciaron a partir de 1973 buscaban controlar el proceso erosivo, reforestar áreas severamente erosionadas e incrementar la retención de agua para recarga de acuíferos.

Los beneficios atribuibles al proyecto del Rescate Hidroecológico del Ex-Lago de Texcoco fueron: mejorar las condiciones ambientales, conservar la biodiversidad, recuperar especies de fauna y flora que estaban en proceso de extinción, la siembra de árboles en las zonas montañosas y el establecimiento de obras de conservación de suelos como terrazas, zanjas, y roturaciones que disminuyeron la erosión del terreno, el deslave de los suelos, la producción de sedimentos y la reducción de escurrimientos debido al aumento de la infiltración de agua de lluvia en el terreno y la recarga y recuperación de los acuíferos (Cruickshank 1998).

3.4.2. Trabajos de conservación

Los trabajos realizados en la Cuenca del Río Chapingo son un ejemplo de la recuperación de los terrenos degradados, la conservación de los suelos que estaban en proceso de degradación y que favorecían el proceso erosivo, el control de las avenidas máximas y la reducción de la cantidad de partículas transportadas por las corrientes. Los trabajos se agruparon en un programa de reforestación y de control de corrientes a través de la construcción de presas.

El programa de reforestación incluía una etapa de preparación del terreno con obras de conservación de suelo y agua para hacer del mismo un programa más eficiente (INEISA, 1990). Se utilizaron varios métodos de preparación del terreno, los cuales son agrupados y descritos según Pimentel (1987) como sigue:

Técnicas manuales

Suavizado de taludes: Consiste en modificar la pendiente natural del terreno mediante el uso de pico y pala, haciéndola uniforme y buscando el “perfil de reposo del material”.

Zanjas trinchera: Construcción de zanjas de 0.4 m de ancho y 0.4 m de profundidad, siguiendo curvas a nivel a lo largo de 5 a 7 m, dejando un tramo del terreno ciego (sin excavar) de 0.5 a 1 m. El material producto de la extracción se utilizaba para formar un bordo compactado con pala, de forma trapezoidal, sobre el cual se realizaba la plantación. Los bordos tenían 0.5 m de base, 0.3 m de corona y 0.3 m de altura. La separación de las zanjas estaba en función de la pendiente, de forma que de 10 a 20 % la separación fue de 8 m, pendientes de 21 a 35 % la separación fue de 6 m y pendientes mayores deben estar separadas cada 5 m (Pedraza, 1987). Sin embargo, Pimentel (1987) recomienda separaciones entre 3 y 5 m.

Sistema Gradoni: Consiste en la formación de terrazas de 0.6 a 0.8 m de ancho en forma de gradas, siguiendo curvas a nivel con contrapendientes fuertes (> 50%).

Prácticas mecánicas

Para estas actividades se requiere el uso de maquinaria pesada, por lo que en aquel entonces se utilizaron máquinas de más de 200 H. P. como Caterpillar D6, D7 o su equivalente.

Subsoleo total: Roturación del terreno hasta 0.7 m de profundidad, siguiendo curvas a nivel separadas 0.5 m en líneas de 50 a 60 m. Se interrumpe por la formación de un bordo de 1 m de altura con pendiente menor a 0.5 % hacia un cauce protegido. Se recomienda para terrenos con pendiente menor a 30 % y superficie no muy irregular.

Subsoleo a nivel: La roturación del terreno se realizó a 0.4 m de profundidad siguiendo curvas a nivel con 2 m de separación; la finalidad fue mejorar la condición física del terreno previo a la plantación, puesto que

en los lugares donde existía afloramiento de tepetate las raíces de los árboles plantados tenían problemas para su establecimiento.

Terraza de absorción: considera el movimiento de grandes volúmenes de suelo con maquinaria pesada; la pendiente longitudinal prácticamente fue cero, porque como su nombre lo indica, el objetivo de la terraza era retener e infiltrar el agua de lluvia tanto como fuera posible y para ello se construían “tapones” en las orillas de la terraza, para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua. El espacio entre terrazas variaba de 5 a 15 m en función de la pendiente.

Terrazas canal: Son zanjas bordos con pendiente longitudinal de 0.4 a 0.5 % para drenar el exceso de agua hacia los cauces naturales o protegidos. Se recomienda intercalar una de estas cada 5 terrazas de absorción para evitar el daño a la integridad de los trabajos en caso de eventos máximos o extraordinarios.

Las obras de protección de la zona Oriente del área de influencia del Proyecto Lago de Texcoco se realizaron en el periodo 1973-1976 de acuerdo a Pedraza *et al.* (1987) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Área protegida para las plantaciones realizadas en la zona oriente del área de influencia del Proyecto Lago de Texcoco

Año	Área (ha)	Cuencas
1973	440	Texcoco y Chapingo
1974	446	Chapingo y San Bernardino

Fuente: Pedraza *et al.* (1987)

Briseño *et al.* (1982) señala que el “Programa Hidrológico Forestal” consistía en la construcción de obras hidráulicas, obras de control de erosión y el establecimiento de especies vegetales; para 1982, se ejecutaba el “Programa Forestal y de la Fauna” en la parte Oriental de la Cuenca del Valle de México y sus objetivos eran recargar los acuíferos para el abastecimiento de agua potable a la población rural y urbana; controlar escurrimientos para evitar el desbordamiento de los ríos; prevenir la erosión de las cuencas tributarias del Ex-Lago de Texcoco, y otros. Para cumplir esos objetivos se implementaron acciones de restauración forestal, complementadas con la corrección de cauces y la construcción de obras hidráulicas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tipo y cantidad de obras hidráulicas construidas para el funcionamiento del Programa Hidrológico y Forestal

Tipo de obra	Cantidad
Muros y gaviones metálicos	308
Muros y mampostería	111
Muros mixtos	31
Muros de tierra	2,256
Muros secos	459
Muros de palos y ramas	50

Fuente: Dirección de Estudios y Proyectos, Comisión del Lago de Texcoco, 1981

El Programa Forestal y de la Fauna fue creado para resolver el problema de degradación de los suelos con los siguientes objetivos:

- Controlar la erosión hídrica en la zona Oriente de la Cuenca del Valle de México,
- Restaurar la ecología de la zona mediante prácticas de reforestación y forestación,
- Contribuir a mejorar el nivel de vida en la zona (Briseño *et al.* (1982).

Para el logro de dichos objetivos se realizaron obras de terraceo, subsoleo y zanjas-trinchera en áreas deforestadas y en lugares que tuvieran indicios de la existencia de bosque; en las zonas con terrazas y zanjas-trinchera se llevó a cabo un programa de reforestación o forestación, según fuera el caso, en el que se utilizaban especies nativas e introducidas que se adaptaran a las condiciones de la zona (Cuadro 5).

Cuadro 5. Especies y plantación correspondiente a 1981

Especie	Cantidad de plantas
<i>Cupressus lindleyi</i>	288,271
<i>Casurina equisetifolia</i>	167,605
<i>Eucalyptus globulus</i>	379,925
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	18,045
<i>Pinus montezumae</i>	587,186
<i>Pinus pseudostrobus</i>	444,400
<i>Pinus oaxacana</i>	108,050
<i>Pinus michoacana</i>	133,020
Total	2'126,020
Fuente: Programa Forestal y de la Fauna de la Comisión del Lago de Texcoco, 1981	

Asimismo, cada año se realizaban obras para el control de azolves para reducir la velocidad de los escurrimientos, como presas de gaviones, de mampostería, de muros secos, mediante curvas de nivel y otras (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Para 1982 se habían construido 741 presas, 1,289,759 metros lineales de terrazas y se subsolaron 2,928,748 metros lineales. A partir de 1973 se plantaron especies como *Pinus sp*, *Cupressus sp*, *Eucalyptus Casuarina*, y *Acacia sp*. (Briseño et al. 1982).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para realizar la caracterización morfométrica y del medio biofísico de la cuenca del río Chapingo, se colectó información documental y cartográfica digital y/o impresa, misma que se procesó y homogeneizó en la Proyección UTM con datum WGS84, para que los mapas resultantes tuvieran este sistema de coordenadas.

La información cartográfica utilizada fue la división política que se obtuvo del Marco Geoestadístico 2010 v.5.0, el modelo digital de elevaciones (MDE) del Continuo de Elevaciones Mexicano 2.0 (escala 1:50,000 con resolución de píxel de 30 m) y curvas de nivel (escala 1:50,000) a 20 m de equidistancia, el sistema de drenaje de la Red Hidrográfica escala 1:50,000 edición 2.0 y la información de clima a escala 1:1,000,000; todo lo anterior obtenido de INEGI, como la fuente principal de información cartográfica en el país.

Las capas de geología y suelos se obtuvieron de Ojeda (2001), quien a su vez las digitalizó a partir de las cartas temáticas impresas E14B21 y E14B31, escala 1:50,000 (INEGI 1978). Para el inventario de obras y prácticas de conservación de suelo y agua se utilizó información de la CONAGUA (2012, com. pers.) y de Adame (1991). La mayor parte de la información documental y cartográfica recopilada y generada se utilizó para valorar los cambios en el medio biofísico de la cuenca especialmente en el uso del suelo y vegetación para antes y después de las acciones de conservación y recuperación de suelos realizados.

4.1.1. Localización

El área de estudio de esta investigación es la Cuenca del Río Chapingo, que se encuentra en el Municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 5) (INEGI 2010). Esta cuenca pertenece a la Región Hidrográfica 26-Pánuco, Subregión hidrológica Valle de México, en la zona conocida como Cuenca Oriental del Valle de México, integrada por 13 cuencas en total (CONAGUA 2007). La cuenca del Río Chapingo tiene una superficie de 1,923.42 ha, se localiza entre las coordenadas extremas de 19.4929° N, 98.8855° W y 19.4228° N, 98.7615° W y altitudes de 2,250 a 3,580 msnm.

4.1.2. Delimitación de la cuenca

La delimitación del parteaguas de la cuenca del Río Chapingo se realizó utilizando el MDE de INEGI y el módulo Automatic Watershed Delineation de la extensión ArcSWAT v. 2009.93.7b para ArcMap 9.3. Debido a la escala y resolución del MDE, la delimitación de la cuenca no considera las modificaciones que el terreno ha sufrido por las actividades humanas, por lo que el parteaguas obtenido se modificó manualmente con ayuda de las ortofotos del servicio WMS (Web Map Service) de INEGI (Figura 3), las curvas a nivel reportadas por el MDE y la herramienta "Perfil de Elevación" de Google Earth® (Figura 4).

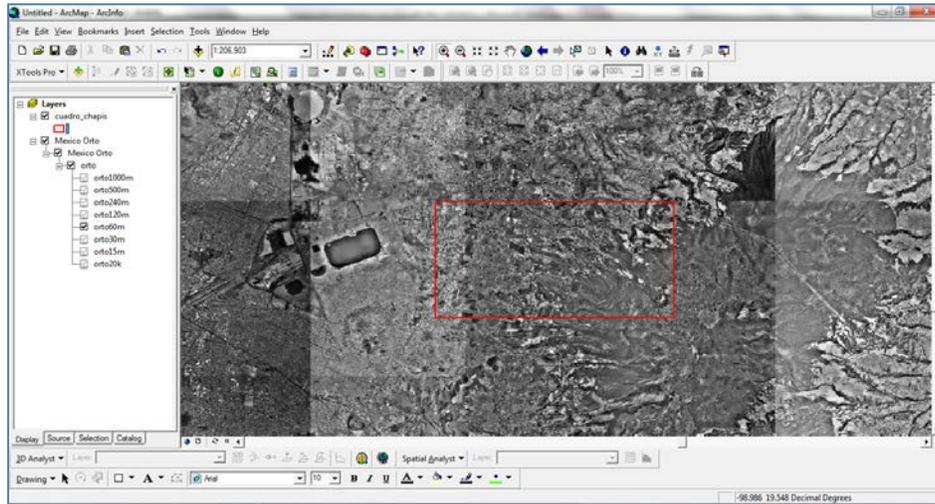


Figura 3. Servicio web de ortofotos de INEGI.

La modificación del parteaguas, especialmente en la parte media y baja de la cuenca, se realizó digitalizando en pantalla con ayuda de ortofotos y perfiles de elevación de secciones transversales de la cuenca, aunado a criterios cartográficos, topográficos (curvas de nivel) y de reconocimiento de la zona utilizando un GPS (Global Positioning System); a partir de esta corrección se obtuvieron el parteaguas y área definitivos de la cuenca que se utilizaron en este trabajo.

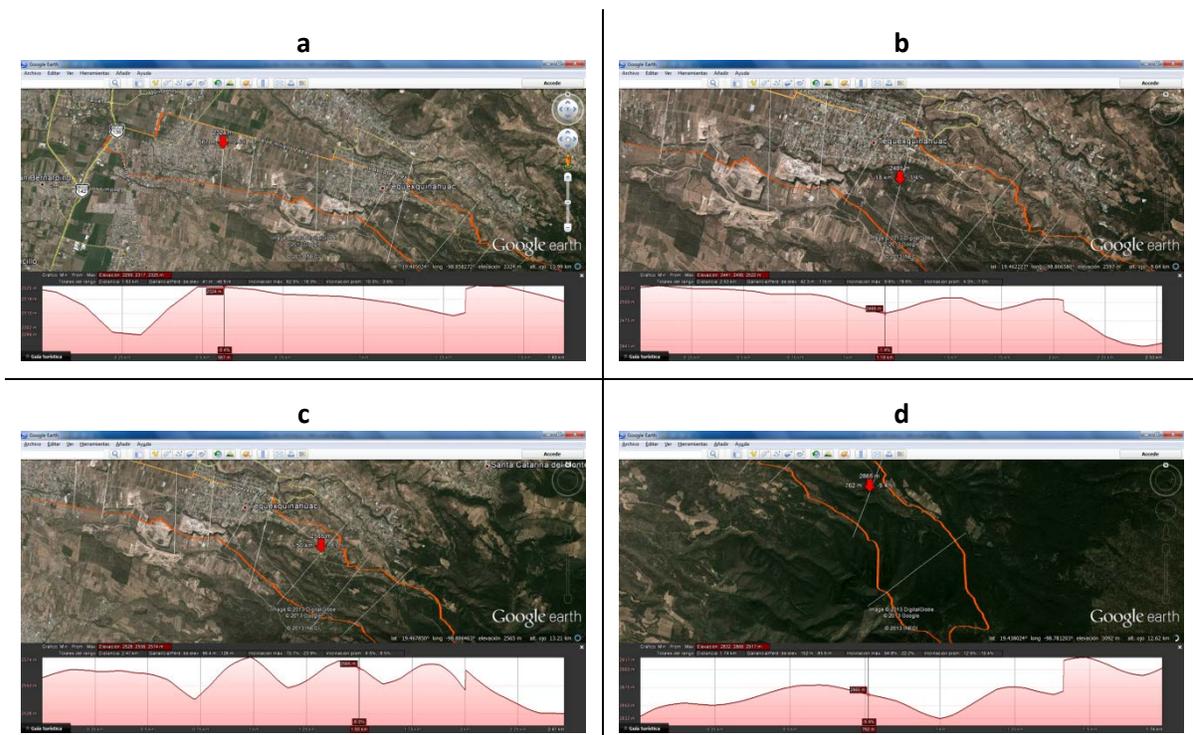


Figura 4. Cortes transversales con “Perfil de Elevación” de Google Earth®: a) Parte baja; b) y c) parte media; d) parte alta.

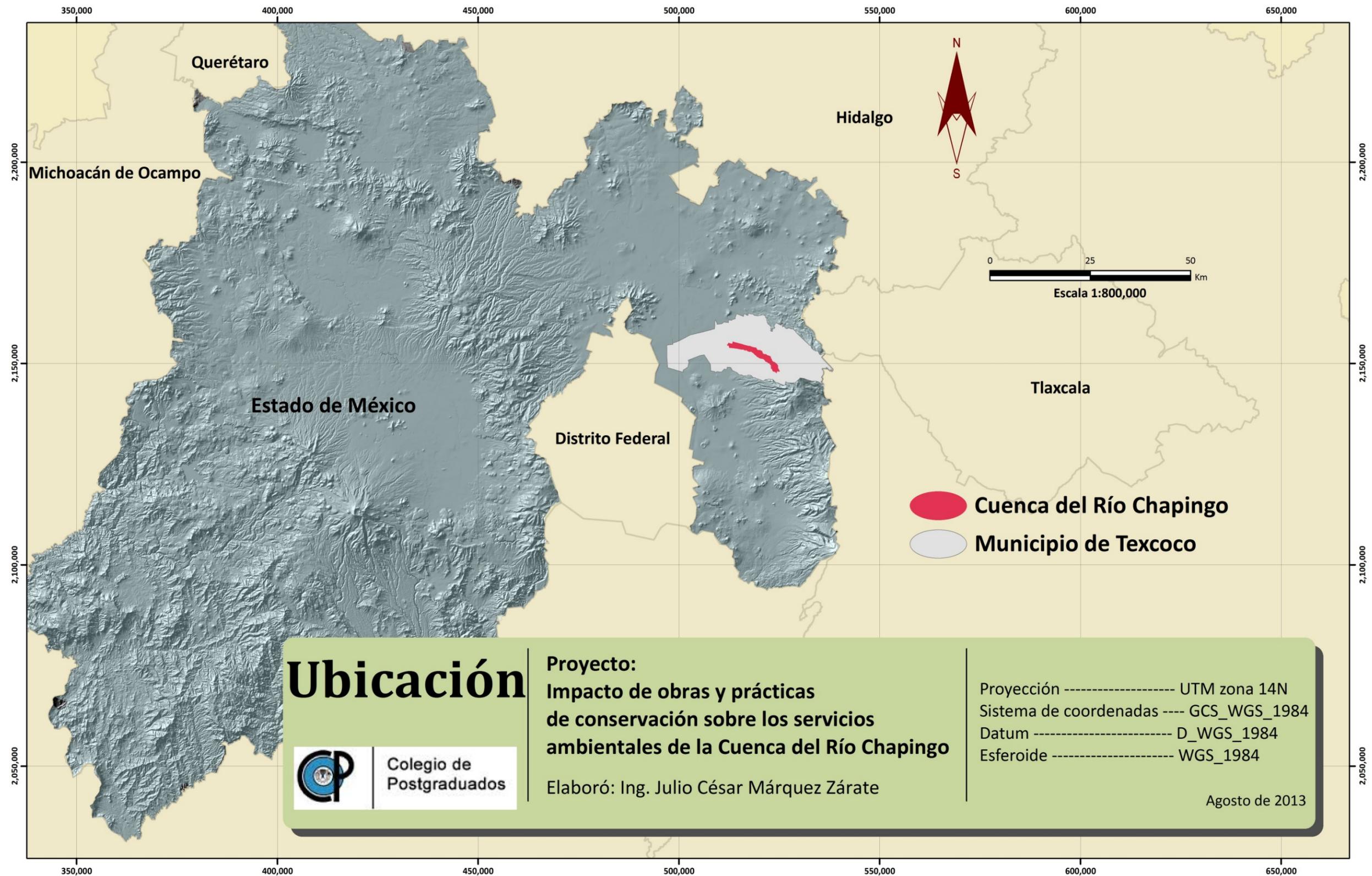


Figura 5. Ubicación de la cuenca del Río Chapingo.

4.1.3. Geología

La Cuenca del Río Chapingo se localiza en el eje Neovolcánico, que está conformado por materiales de tipo ígneo y donde se reportan dos tipos de rocas: andesitas y brecha sedimentaria. El 75 % del área está ocupada por brechas sedimentarias (deposiciones de cenizas volcánicas poco cementadas), que se encuentran principalmente en la parte baja y media de la cuenca y en menor proporción en la parte más alta. El Cuadro 6 y Figura 6 muestran las unidades geológicas presentes en la zona de estudio de acuerdo con Ojeda (2001).

Cuadro 6. Geología en la Cuenca del Río Chapingo.

CLAVE	ENTIDAD	CLASE	TIPO	ERA	SISTEMA	ha	% Área
Q(al)	Suelo	-	Aluvial	Cenozoico	Cuaternario	57.74	3.0
Q(la)	Suelo	-	Lacustre	Cenozoico	Cuaternario	23.03	1.2
Ts(A)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Andesita	Cenozoico	Neógeno	390.59	20.3
Ts(bs)	Unidad cronoestratigráfica	Sedimentaria	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno	1,452.07	75.5
TOTAL						1,923.42	100

Los datos anteriores los reporta INEGI en su carta geológica escala 1: 50,000, sin embargo, el trabajo de Vanegas (2009) reporta que esta área cuenta con la presencia de depósitos estratificados de cenizas volcánicas, algunas de las cuales se encuentran endurecidas en los denominados tepetates, lo cual se confirmó en los recorridos de campo.

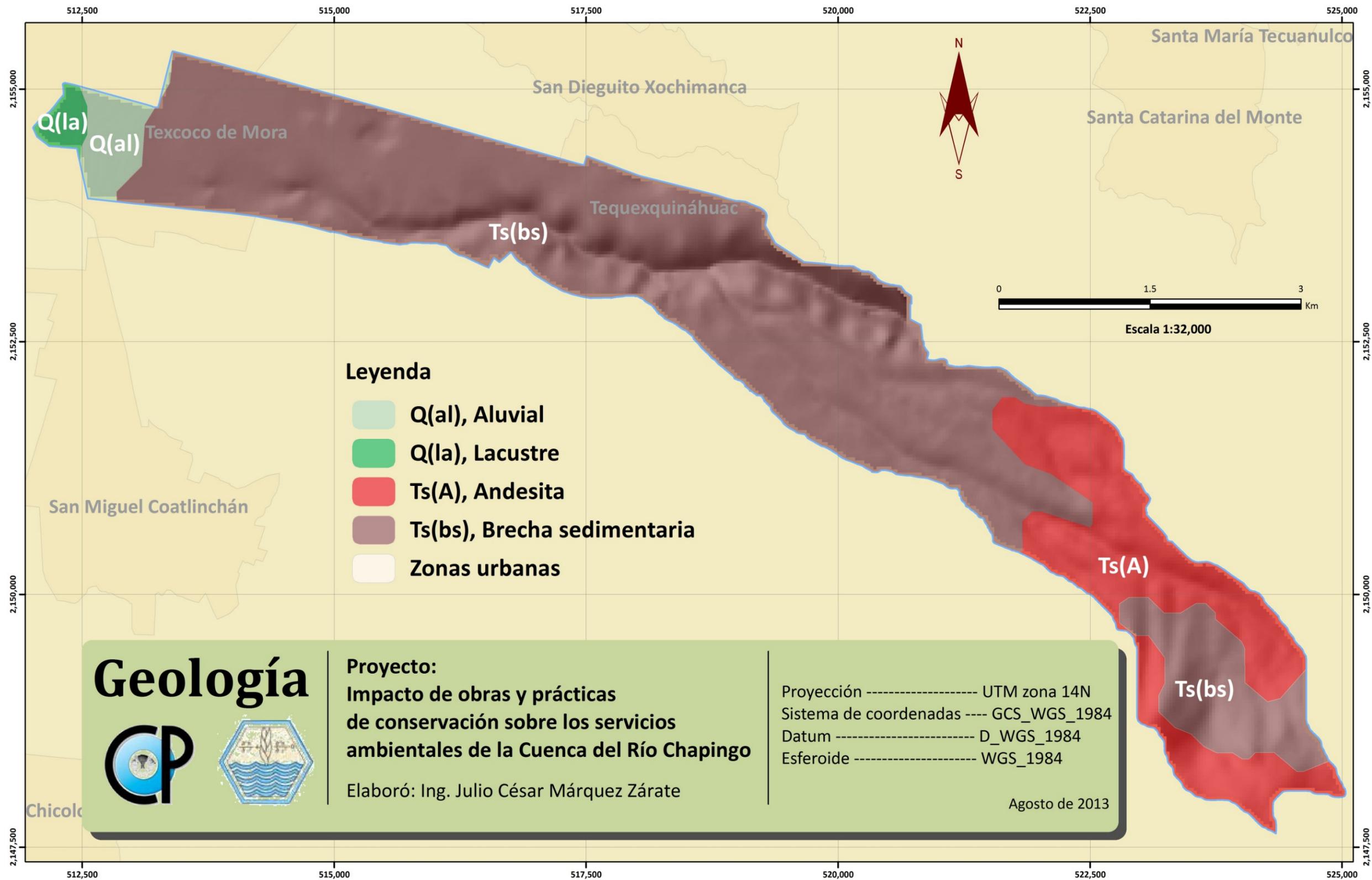


Figura 6. Geología de la Cuenca del Río Chapingo.

4.1.4. Suelos

Los suelos predominantes en la Cuenca del Río Chapingo son los Feozem que cubren un 42.2% de la superficie total, seguidos de los Cambisoles con un 32.1% y los litosoles con un 16.8% y el resto son los andosoles y litosoles (Ojeda, 2001). Los suelos de la parte media de la cuenca fueron sometidos a procesos erosivos, lo que propicio se perdiera la capa de suelo y aparecería el material parental quedando terrenos degradados o tepetatosos como son conocidos regionalmente (Cuadro 7 y Figura 7).

Cuadro 7. Suelos en la Cuenca del Río Chapingo

Unidades de Suelo	Fase	Clave	Ha	% Área
Cambisol dístrico	Sin restricción	(BdSr)	330.90	17.2
Cambisol éútrico	Dúrica	(BeD)	186.98	9.7
Cambisol éútrico	Sin restricción	(BeSr)	18.24	0.9
Cambisol húmico	Sin restricción	(BhSr)	81.54	4.2
Feozem háptico	Dúrica	(HhD)	325.94	16.9
Feozem háptico	Dúrica profunda	(HhDP)	424.55	22.1
Feozem háptico	Sin restricción	(HhSr)	100.30	5.2
Litosol	Dúrica	(ID)	270.36	14.1
Litosol	Sin restricción	(ISr)	51.12	2.7
Andosol mólico	Sin restricción	(TmSr)	81.75	4.3
Vertisol crómico	Sin restricción	(VcSr)	21.29	1.1
Vertisol pélico	Sin restricción	(VpSr)	30.44	1.6
TOTAL			1,923.42	100%

Una breve descripción de las principales unidades de suelos que se localizan en la Cuenca del Río Chapingo se muestra a continuación:

- Los suelos **Feozem** cubren una superficie de 850 ha se localizan en la parte media y baja de la cuenca se caracterizan por ser de profundidad variable, ricos en materia orgánica con texturas que varían de medias a gruesas son de color oscuro y se utilizan para la producción de cultivos y en las parte de ladera han estado sometidos a proceso erosivos y a formación de cárcavas por el manejo que se le dieron a estos suelos.
- Los suelos **Cambisoles** se localizan en la parte media y alta de la cuenca donde domina la vegetación forestal, cubren una superficie de 617 ha y tienen una profundidad variable dominando las parte someras donde aparecen vestigios de rocas subyacentes, son ricos en materia orgánica, son de

textura media con buena estructura y cuando se reduce su cubierta vegetal son muy susceptibles a los procesos erosivos.

- Los suelos **Litsoles** se localizan en las laderas cercana del parteaguas de la parte media de la cuenca, cubren una superficie de 321 ha. Se caracterizan por ser suelos someros de poca profundidad limitada por el material parental, su fertilidad es variable, la textura es generalmente de gruesa a media y son muy susceptibles a los procesos erosivos.
- Los suelos **Andosoles** se localizan en la parte alta de la cuenca, cubren una superficie de 81 ha son de textura media, sin estructura, de escasa profundidad y muy susceptibles a los procesos erosivos cuando se realizan los cambios de uso del suelo.
- Los suelos **Vertisoles** se localizan en la parte baja de la cuenca cubriendo una superficie de 30 ha. Se caracterizan por ser suelos profundos de color negro con texturas finas donde dominan las arcillas, se utilizan para la agricultura y últimamente se han destinado para el desarrollo de áreas urbanas.

La información de las características físicas y químicas de cada tipo de suelo se obtuvieron de diferentes trabajos de investigación realizados anteriormente en la cuenca del Río Chapingo para antes y después de las acciones de conservación y recuperación de suelos, y fue reportada por Fernández-Reynoso (2008) como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Perfil de parámetros físicos y químicos por tipo de suelo.

Suelos	Fases	Clave	Capas	Z (m)	BD (t/m ³)	U (m/m)	FC (m/m)	SAN (%)	SIL (%)	WN (g/t)	pH	SMB (cmol/kg)	CBN (%)	CAC (%)	CEC (cmol/kg)	ROK (%)	WNO3 (gm ³)	AP (g/t)	RSD (t/ha)	BDD (t/m ³)	SC (mm/hr)	WP (g/m ³)	SALB
Cambisol éútrico	Sin restricción	(BeSr)	1	0.30	1.31	0.200	0.330	34.3	29.1	210	8.6	29.9	1.07	0.0	34.8	10.0	5.0	9.8	0.64	1.40	2.40	10	0.13
			2	0.65	1.30	0.220	0.352	33.0	27.3	130	7.9	9.0	0.25	0.0	12.3	10.0	5.0	0.6	0.38	1.57	2.06	10	
			3	0.85	1.28	0.246	0.377	30.7	25.1	118	8.0	9.5	0.11	0.0	12.8	13.0	5.0	0.0	0.10	1.56	1.79	10	
			4	1.00	1.27	0.255	0.387	29.5	24.9	108	8.1	10.0	0.00	0.0	13.3	13.0	5.0	0.0	0.01	1.56	1.75	10	
Cambisol éútrico	Dúrica	(BeD)	1	0.30	1.37	0.160	0.280	41.9	31.1	207	7.0	8.0	0.96	2.0	16.7	2.9	6.4	18.7	0.34	1.46	4.30	12	
			2	0.35	1.36	0.164	0.291	40.5	30.6	135	7.2	11.0	0.21	2.1	14.0	4.0	6.2	11.2	0.31	1.52	3.72	10	
Cambisol húmico	Sin restricción	(BhSr)	1	0.30	1.31	0.200	0.330	34.3	29.1	210	8.6	29.9	1.07	0.0	34.8	10.0	5.0	9.8	0.64	1.40	2.40	10	
			2	0.65	1.30	0.220	0.352	33.0	27.3	130	7.9	9.0	0.25	0.0	12.3	10.0	5.0	0.6	0.38	1.57	2.60	10	
			3	0.85	1.28	0.246	0.377	30.7	25.1	118	8.0	9.5	0.11	0.0	12.8	13.0	5.0	0.0	0.10	1.56	1.79	10	
			4	1.00	1.27	0.255	0.387	29.5	24.9	108	8.1	10.0	0.00	0.0	13.3	13.0	5.0	0.0	0.01	1.56	1.75	10	
Feozem háplico	Dúrica	(HhD)	1	0.30	1.42	0.130	0.250	49.5	29.8	204	7.9	18.4	0.97	0.0	25.3	0.0	6.5	14.0	0.34	1.52	7.30	10	
			2	0.35	1.40	0.155	0.271	47.6	25.8	144	7.7	21.5	0.39	1.3	18.7	3.6	5.8	1.9	0.23	1.51	4.09	10	
Feozem háplico	Dúrica profunda	(HhDP)	1	0.30	1.38	0.150	0.270	46.9	27.3	197	7.3	9.5	0.88	0.0	17.8	3.3	6.5	14.9	0.38	1.47	4.40	10	
			2	0.48	1.39	0.163	0.280	46.3	25.4	156	7.5	18.6	0.52	0.5	17.9	3.5	6.1	2.8	0.29	1.50	3.57	10	
			3	0.65	1.39	0.171	0.288	45.5	24.3	134	7.9	23.8	0.29	2.0	19.4	3.7	5.6	1.1	0.18	1.51	3.09	10	
Feozem háplico	Sin restricción	(HhSr)	1	0.30	1.36	0.160	0.290	40.7	30.6	224	7.8	12.8	1.06	0.0	20.6	0.0	5.0	29.7	0.62	1.45	3.70	10	
			2	0.65	1.34	0.199	0.322	38.9	25.3	148	7.6	22.8	0.43	0.0	19.0	0.0	5.0	2.5	0.45	1.43	2.30	10	
			3	0.85	1.33	0.211	0.333	37.8	24.2	135	7.7	25.2	0.31	0.0	19.9	0.0	5.0	0.0	0.45	1.42	2.06	10	
			4	1.00	1.32	0.219	0.343	37.0	23.3	127	7.8	27.0	0.22	0.0	20.6	0.0	5.0	0.0	0.07	1.41	1.91	10	
Litosol	Dúrica	(ID)	1	0.30	1.42	0.130	0.250	49.5	29.8	204	7.9	18.4	0.97	0.0	25.3	0.0	6.5	14.0	0.34	1.52	7.30	10	
Litosol	Sin restricción	(ISr)	1	0.30	1.36	0.160	0.290	40.7	30.6	224	7.8	12.8	1.06	0.0	20.6	0.0	5.0	29.7	0.62	1.45	3.70	10	
Andosol mólico	Sin restricción	(TmSr)	1	0.30	1.37	0.150	0.280	40.0	34.0	201	6.4	4.5	0.99	0.0	13.7	2.0	5.0	8.0	0.32	1.46	4.80	14	
			2	0.65	1.35	0.163	0.293	38.8	32.6	153	6.6	10.0	0.46	1.0	33.3	4.0	5.0	5.9	0.09	1.57	3.90	10	
Vertisol crómico	Sin restricción	(VcSr)	1	0.30	1.30	0.210	0.350	33.2	28.2	221	7.9	17.1	1.13	0.0	24.2	0.0	5.0	17.7	0.35	1.39	2.2	10	
			2	0.45	1.29	0.227	0.360	31.4	27.8	176	7.6	23.1	0.7	0.0	31.6	0.0	5.0	8.2	0.26	1.37	2.02	10	
			3	0.70	1.29	0.240	0.371	30.9	26.1	149	7.9	25.3	0.45	0.0	34.2	0.0	5.0	2.6	0.13	1.39	1.86	10	
			4	1.00	1.28	0.247	0.380	29.9	25.9	134	8.1	26.6	0.29	1.0	35.8	0.0	5.0	0	0.03	1.4	1.81	10	
Vertisol pélico	Sin restricción	(VpSr)	1	0.30	1.35	0.170	0.290	43.3	25.9	215	7.5	13.6	1.02	0.0	21.3	22.0	5.0	21.9	0.48	1.44	3.1	10	
			2	0.65	1.35	0.192	0.312	41.1	24.4	168	7.5	31	0.67	0.0	30.8	28.5	5.0	1.4	0.2	1.49	2.41	10	
			3	1.00	1.34	0.207	0.328	39.5	23.1	155	7.7	31.9	0.53	5.0	32.5	30.0	5.0	0.1	0.06	1.5	2.08	10	

Donde:

SALB = Albedo del suelo

Z = Profundidad desde la superficie hasta el fondo de la capa (m)

BD = Densidad aparente de la capa de suelo (t/m³)

U = Punto de marchitamiento (1500 kPa) (m/m)

FC = Capacidad de campo (33kPa) (m/m)

SAN = Contenido de arena (%)

SIL = Contenido de limo (%)

WN = Concentración de N orgánico (g/t)

PH = pH del suelo

SMB = Suma de bases (cmol/kg)

CBN = Carbono orgánico (%)

CAC = Carbonato de Calcio (%)

CEC = Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)

ROK = Contenido de partículas gruesas (%)

WNO3 = Concentración inicial de Nitrato (g/t)

AP = Concentración lábil de P

RSD = Residuos de cosecha (t/ha)

BDD = Densidad aparente (secado al horno) (t/m³)

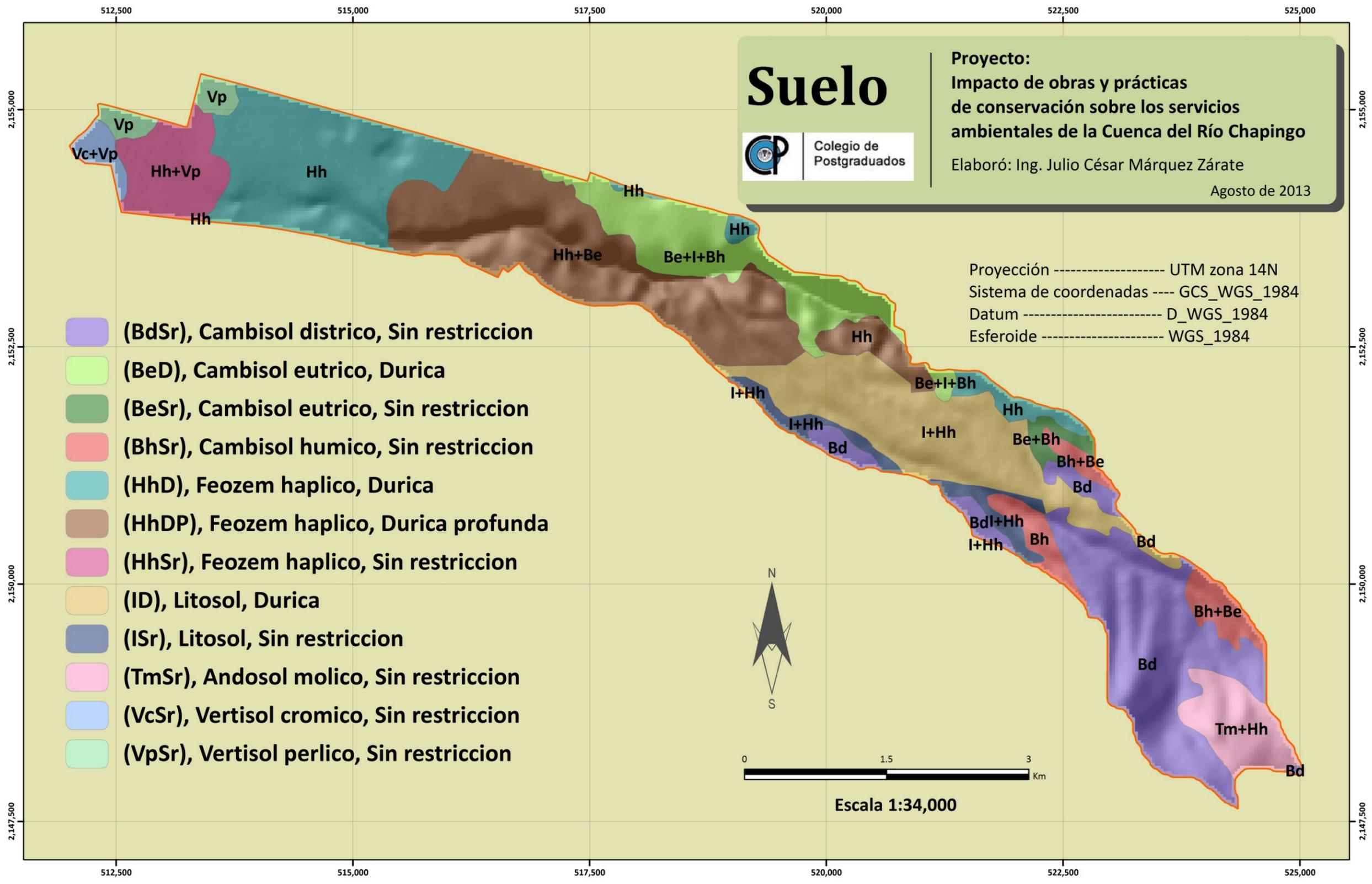


Figura 7. Suelos de la cuenca del Río Chapingo.

4.1.5. Orografía y relieve

La cuenca comprende tres zonas de relieve importantes: la parte baja, que se localiza desde los 2,250 msnm (sitio de la estación de aforo) hasta 2,300 msnm donde se desarrollan las actividades agrícolas y las zonas con asentamientos humanos; la zona de lomeríos, que se ubica entre las curvas de nivel 2,300 y 2,600 msnm donde se presentaron problemas de degradación de los suelos, se implementaron los programas de recuperación de suelos y reforestaciones en la cuenca, pero también se han realizado excavaciones para la extracción de arena (minas de arenas); por último, la zona de montaña, donde todavía existe la presencia de bosque (pino - encino) y que se localiza a una altitud mayor de 2,600 msnm.

Para caracterizar el relieve de la cuenca se procesaron en ArcMap 9.3 el MDE y las curvas de nivel. Los rangos de pendientes se muestran en el Cuadro 9 y el rango de altitud va de los 2,250 a los 3,500 msnm; de las curvas de nivel con equidistancia de 20 m se extrajeron curvas de nivel maestras a 100 m de equidistancia (Figura 9).

Cuadro 9. Rangos de pendiente en la cuenca del Río Chapingo.

Pendiente (%)	Ha	%
0 - 2	247.15	12.85
2 - 5	465.25	24.19
5 - 10	330.03	17.16
10 - 15	174.70	9.08
15 - 20	157.70	8.20
20 - 30	219.78	11.43
30 - 40	131.31	6.83
> 40	197.51	10.27
TOTAL	1,923.42	100

4.2. SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La caracterización morfométrica de la cuenca se realizó con una combinación de SIG y programación en Microsoft Office Excel®; utilizando los datos de área, perímetro, cota mayor y menor de la cuenca y del cauce, longitud del cauce principal y longitud total de corrientes. Estos datos se obtuvieron a partir del MDE, las curvas de nivel con 100 m de equidistancia y el sistema de drenaje de la cuenca procesados en ArcMap 9.3, que permite obtener los parámetros lineales y de forma de una cuenca de manera rápida y confiable (Figura 8).

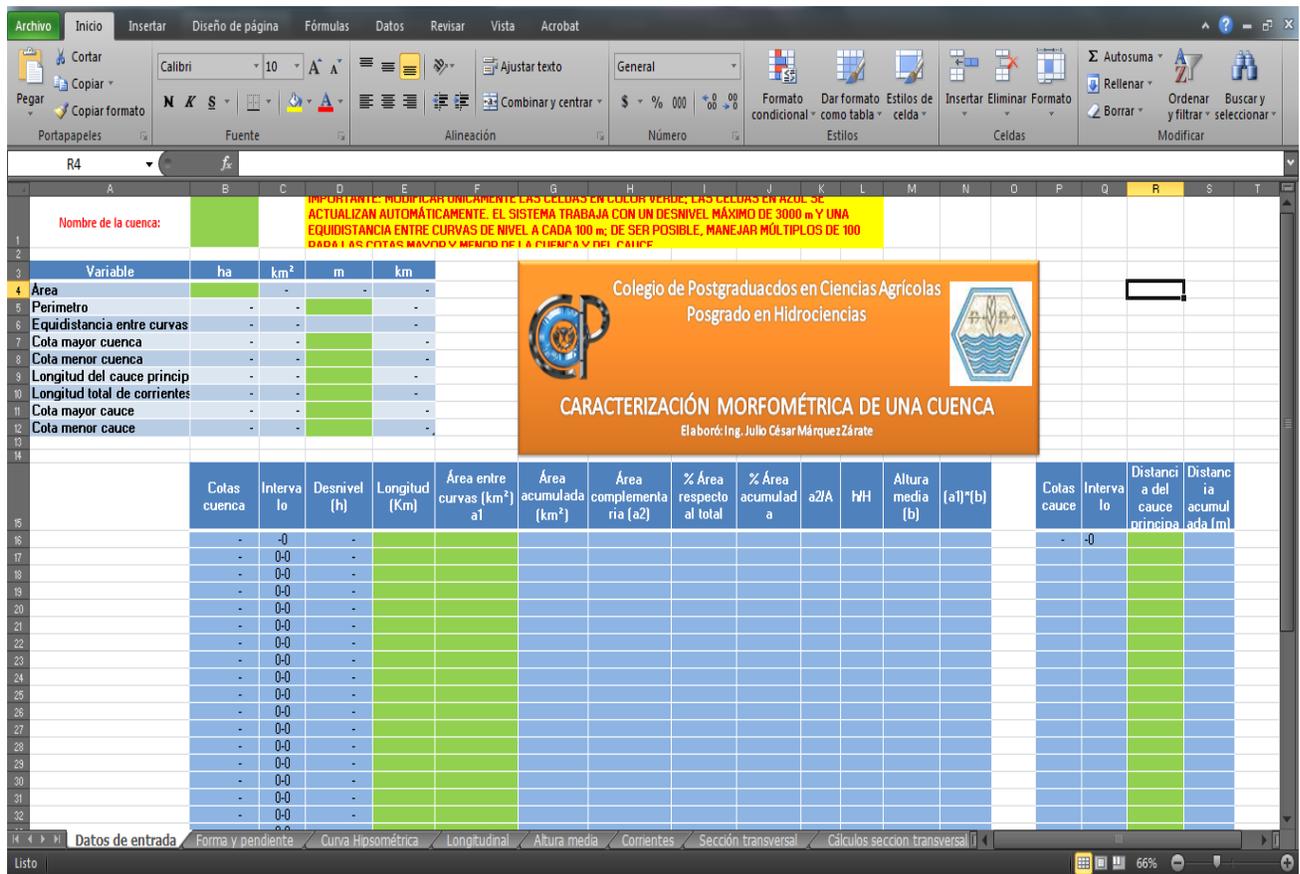


Figura 8. Datos de entrada para el sistema automatizado de caracterización morfométrica de una cuenca.

El sistema permite generar valores, tablas y gráficas de los principales parámetros físicos y morfométricos de la cuenca de manera automática los cuales pueden ser asociados con los parámetros hidrológicos de la cuenca (Cuadro 10). Las características físicas de una cuenca son importantes desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, ya que constituyen los factores que afectan el escurrimiento y la morfogenia; desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de parte de los componentes del ciclo hidrológico, tales como evaporación, infiltración, flujo superficial entre otros (Díaz *et al.* 1999).

Cuadro 10. Variables morfométricas calculadas mediante el sistema automatizado.

Índice de forma	Clasificación de corrientes y
Relación de circularidad	Densidad hidrográfica
Coefficiente de compacidad	Densidad de drenaje
Proporción de elongación	Relación de bifurcación
Pendiente media de la cuenca	Longitud de corrientes
Pendiente media del cauce principal	Ley del número de corrientes
Curva hipsométrica	Ley de longitud de corrientes
Perfil longitudinal	Sección transversal
Altura media de la cuenca	

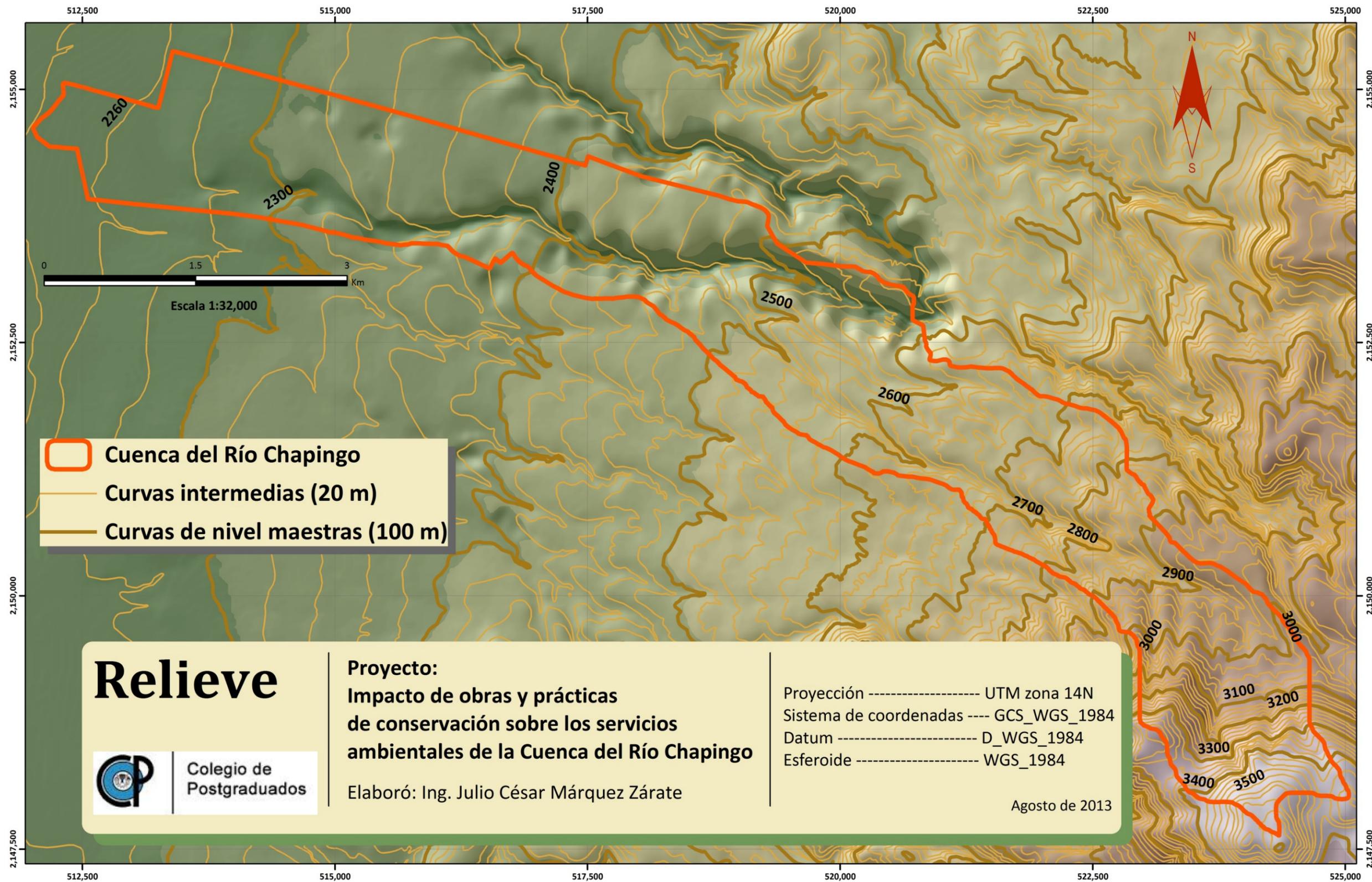


Figura 9. Relieve de la Cuenca del Río Chapingo.

4.3. ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMÁTICAS

En la cuenca del Río Chapingo el clima es templado que varía de semiseco en la parte baja, hasta subhúmedo en la parte media y alta. Los datos reportados por las Normales Climatológicas de 1951-2010 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2012) reportan temperaturas media, máxima y mínima promedios de 16.4, 25.1 y 7.6 °C respectivamente y una precipitación promedio anual de 618.3 mm (Cuadro 11 y Figura 10).

Cuadro 11. Condiciones climáticas en la cuenca del Río Chapingo.

Zona	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Unidades climáticas
Parte baja (2250 - 2500 msnm)	600 - 700	14 - 16	BS1kw - Semiseco templado; C(w0)(w) - Templado subhúmedo
Parte media (2500 – 2900 msnm)	700 - 800	12 - 14	C(w1)(w) - Templado subhúmedo
Parte alta (2900 - 3590)	800 - 1000	10 - 12	C(E)(w2)(w) - Semifrío subhúmedo

La información climática (precipitación, temperatura y evaporación) a nivel mensual se extrajo de la estación 15170-Chapingo (DGE) de la base de datos en línea de la CONAGUA (2012), para el periodo de 1950 al 2000 que servirá para analizar su impacto en la producción de escurrimientos medios, máximos y los balances de agua en la cuenca y su efecto en la producción de sedimentos para antes y después de las acciones de conservación y recuperación de suelos realizados.

Los parámetros estadísticos climáticos permitirán estimar la evapotranspiración potencial y real de acuerdo con la biomasa existente y los escurrimientos a fin de realizar balances de agua para antes y después de los trabajos realizados.

4.4. OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS

La cuenca del río Chapingo presentan corrientes superficiales bien definidas que desembocan al Ex-Lago de Texcoco; su recorrido lo realizan de oriente a poniente y las corrientes se consideran efímeras, porque sólo conducen agua cuando llueve y cuando descargan los sistemas de drenaje de las áreas urbanas aledañas (aguas residuales). La corriente principal nace a la altura de los 3,500 msnm, pasa por el sur de Tequexquináhuac, San Luis Huexotla y San Mateo Huexotla, Estado de México, y descarga en el Ex Lago de Texcoco (SEMARNAT y CONAGUA, 2003).

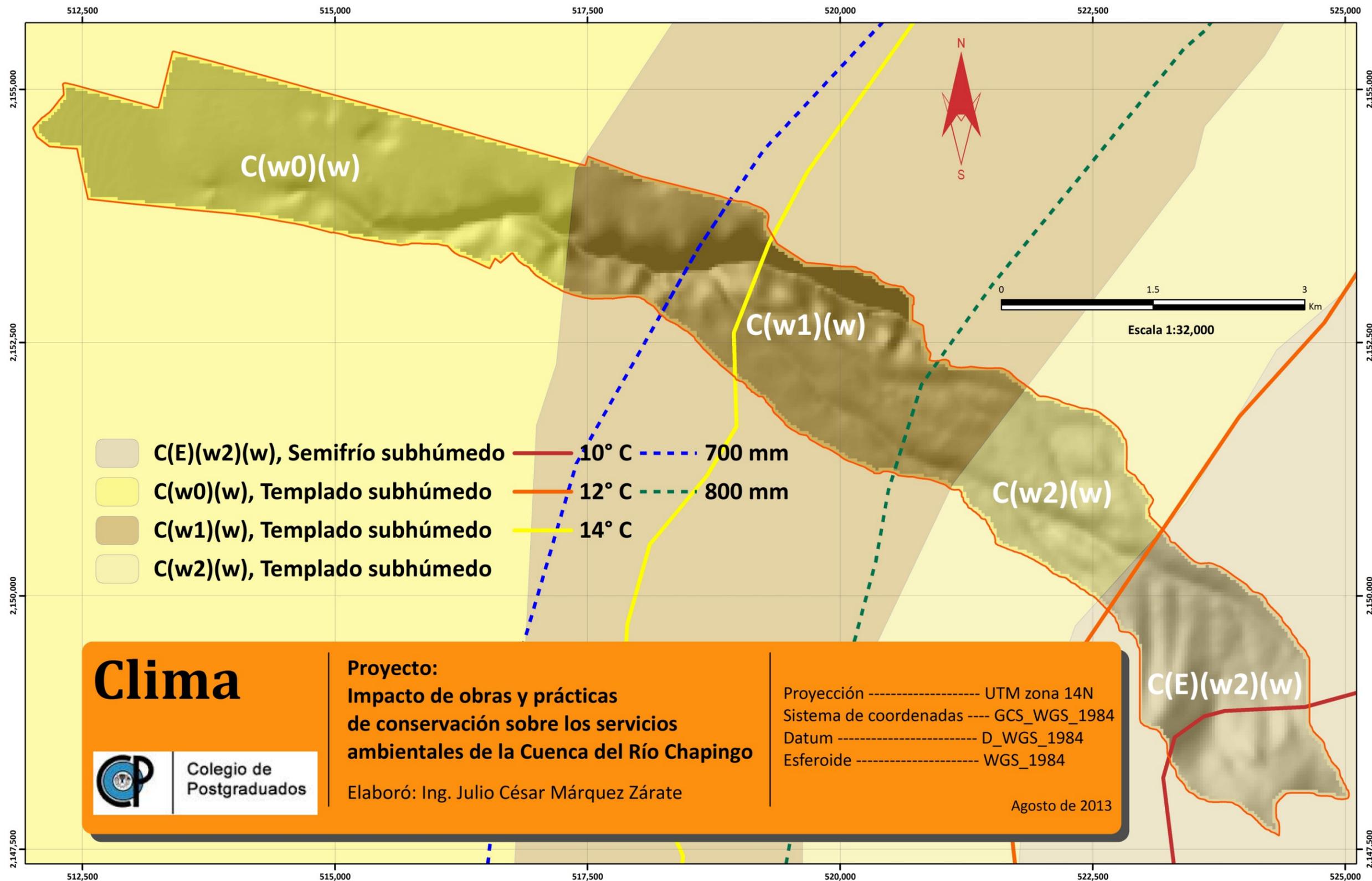


Figura 10. Clima de la Cuenca del Río Chapingo.

La estación de aforo de la cuenca del Río Chapingo es la 26183-Chapingo de la red de estaciones hidrométricas de CONAGUA que se encuentra ubicada en las coordenadas UTM X = 2154611.47 m, Y = 512017.86 m (98° 53' 7.76" de longitud oeste y 19° 29' 9.71" de latitud norte). La estación cuenta con un puente para los aforos, una escala limnimétrica para el aforo de la corriente y la sección fue levantada para verificar la relación escala-gasto que se utiliza para la estimación de los gastos diarios que se toman en la estación de aforo (Figura 11 , Figura 12 y Figura 13).



Figura 11. Estación de aforo de la Cuenca del Río Chapingo.

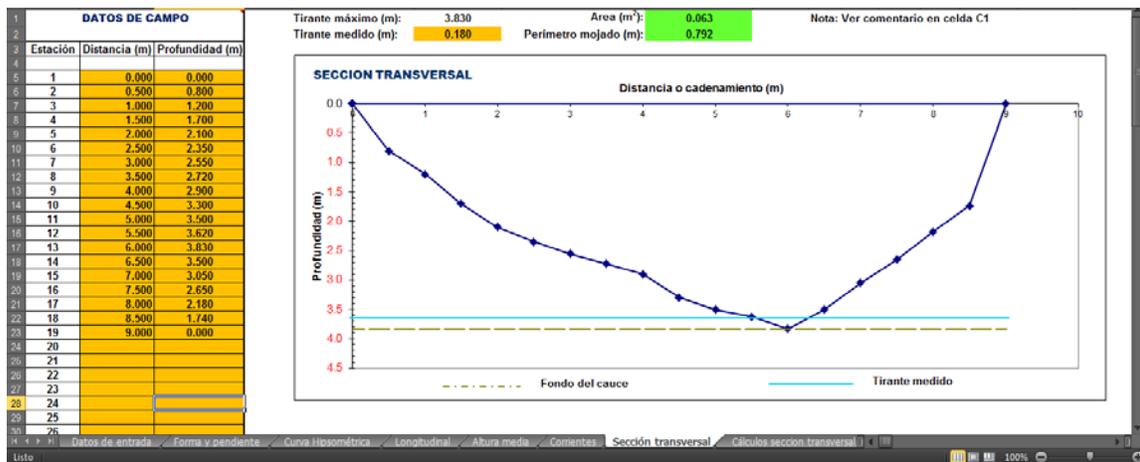


Figura 12. Levantamiento de la sección transversal de la estación de aforo del Río Chapingo.

La información hidrométrica (gastos medios diarios, gastos máximos anuales y volúmenes anuales de sedimentos) se extrajo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la estación de aforo 26183-Chapingo. La información reportada fue revisada, y en algunos casos corregida, con registros hidrométricos proporcionados por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, dependiente de la Comisión Nacional del Agua - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (com. pers.).

La información reportada por la estación hidrométrica 26183-Chapingo corresponde al periodo de 1950 al 2010, sin embargo la información de 2001 a la fecha no es consistente, razón por la cual se decidió delimitar

el periodo de estudio de 1950 a 2000. El periodo de análisis se dividió antes y después de obras (1950 a 1974 y 1975 a 2000 respectivamente) para analizar la variación de las variables hidrométricas con o sin obras de conservación del suelo y agua. Así mismo, se realizó un análisis de la producción de sedimentos en miles de metros cúbicos reportados para los años de 1961 a 1973 para el periodo de antes de las obras y de los años de 1975, 1976, 1978-1983 y de 1988 a 1990 para después de obras. A partir de la producción de sedimentos se calculó la degradación específica (DE) de la cuenca.

Los balances de agua se realizaron para los periodos (antes y después de las obras) utilizando la información de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración actual estimada con el modelo SWAT a fin obtener la recarga del acuífero de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P + R_s - ET_s - RE = \Delta A$$

Donde:

P = Precipitación anual (mm)

R_s = Escurrimiento de salida del sistema (mm)

ET_s = Evapotranspiración actual (mm)

I = Infiltración del agua en el suelo (mm)

ΔA = Cambio de almacenamiento

Para obtener la recarga de los acuíferos se seleccionó la información hidrométrica mensual del año de 1975, considerado como previo a las obras de conservación del suelo y agua, y del 2000 considerado como representativo del periodo con obras de conservación del suelo y agua, de tal forma que se puedan predecir los cambios en las variables hidrométricas como producto de las acciones de conservación del suelo y agua realizados en la cuenca del Río Chapingo.

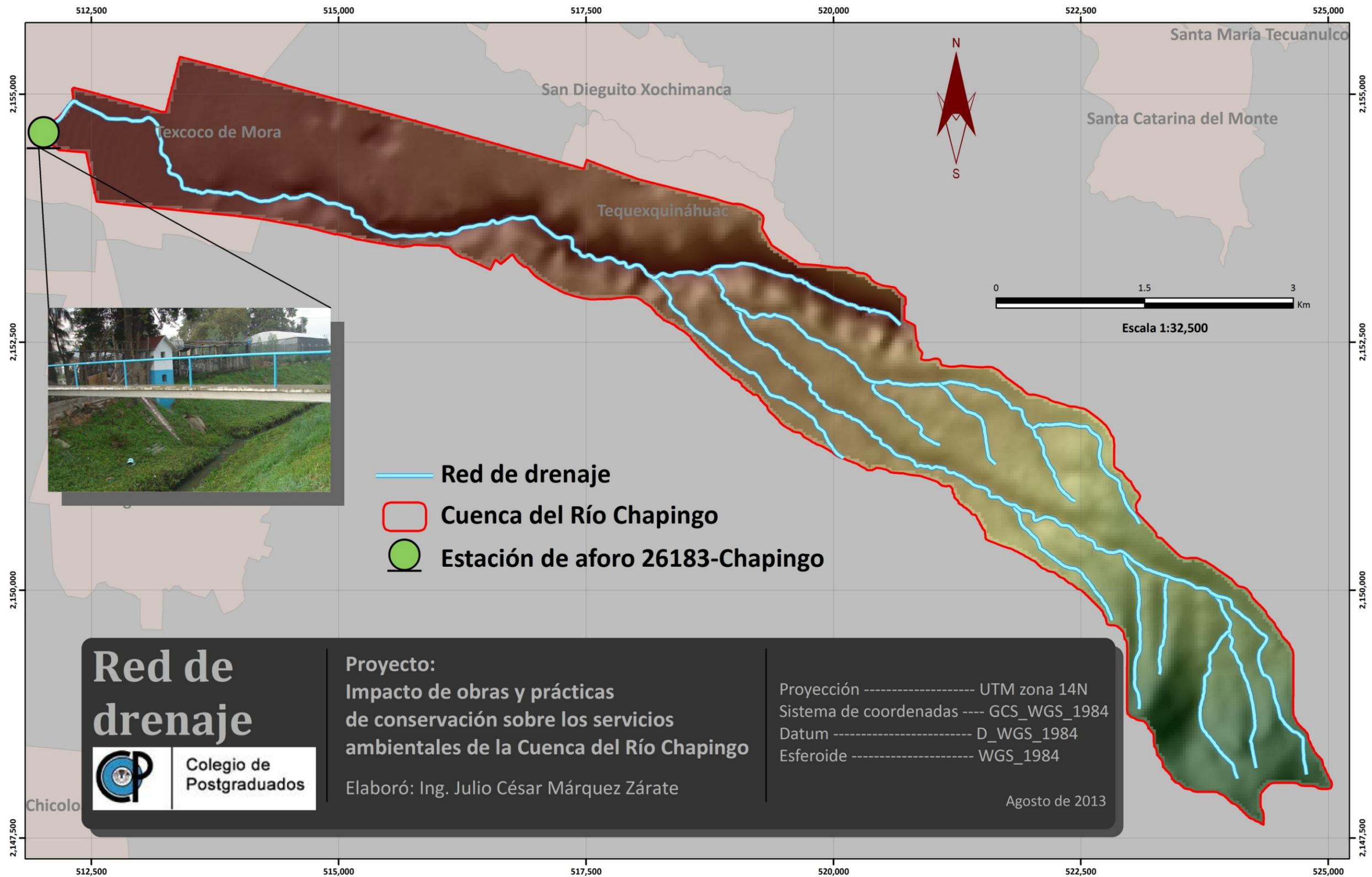


Figura 13. Red de drenaje de la Cuenca del Río Chapingo.

4.5. ANÁLISIS DEL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Tomando en cuenta que el estudio pretende analizar los cambios en el uso del suelo del periodo de 1950 a 2000 se revisó la cartografía disponible encontrando los mapas de uso de suelo de la Serie I de INEGI y se utilizó la carta de uso del suelo y vegetación impresa escala 1:50,000 que fue elaborada a mediados de los años setentas y fue considerado como el uso de suelo inicial y línea base para el periodo de antes de las obras y prácticas de conservación del suelo y agua. Para el periodo de 1975 al 2000 se utilizó la Serie IV editada por INEGI a una escala de 1:250,000 y fue considerada como la información de uso del suelo y vegetación para el periodo de después de las obras y prácticas de conservación del suelo agua en la cuenca del Río Chapingo.

Dado que las escalas de trabajo, las fechas de colecta de información y los mapas de uso del suelo y vegetación elaborados y publicados por INEGI no se ajustaban a los propósitos y periodos de esta investigación, se procedió a elaborar los mapas de uso de suelo y vegetación para antes y después de las obras y prácticas de conservación del suelo y agua utilizando la información disponible de acuerdo con la metodología que se describe a continuación.

4.5.1. Cambios del uso del suelo y vegetación para antes y después de las obras

En los últimos 50 años en la Cuenca del Río Chapingo se han realizado programas de recuperación de suelos, obras y prácticas de conservación de suelos, reforestaciones y exclusiones las cuales ha impactado en los cambios de uso del suelo. Así las zonas degradadas han pasado a zonas agrícolas o forestales, lo que aunado a la construcción de presas de control de azolves ha influido en el régimen hidrológico. Esta acciones de conservación han propiciado impactos favorables en los servicios ambientales hidrológicos (reducción de escurrimientos máximos instantáneos y producción de sedimentos y recarga de acuíferos). Sin embargo, estos servicios ambientales hidrológicos se han visto impactados en forma negativa por el establecimiento de minas de producción de arena en la parte media de la cuenca y el crecimiento de la mancha urbana en la parte media y baja de la cuenca.

Para el análisis de cambio en los usos de suelo en la cuenca se seleccionaron los años de 1974 (antes de obras) y 2012 (después de obras), lo que da un periodo de 38 años de modificaciones al paisaje por causas naturales y antropogénicas. Para ello, se elaboraron mapas de uso de suelo y vegetación propios a una escala de trabajo y visualización que permitieran identificar los cambio de uso del suelo, los tipos de cobertura vegetal, las densidades de cobertura, el crecimiento de las manchas urbanas, las redes de caminos y el crecimiento de las zonas con minas de arenas para entender los cambios en el régimen hidrológico de la cuenca producto de la acciones de mejoramiento de los usos del suelo y de los programas

de recuperación, así como las acciones de degradación de los recursos naturales que se han realizado en el periodo de estudio.

Inicialmente se utilizó la cartografía de INEGI para el uso de suelo, tomando la Serie I como fecha inicial y la Serie IV como fecha reciente. La Serie I se realizó a partir de fotografías aéreas escalas de 1:50,000 a 1:80,000 (1968-1986) b/n y sepia, con fechas de datos de campo de 1968, 1971 y 1986 y presentada a escala 1:50,000, con referencia editorial de los años 80's. La Serie IV se basó en imágenes SPOT multiespectral de 2007 y 2008 con una resolución de píxel de 10 m, con fechas de datos de campo de 2007 y 2008 y presentada a escala 1:250,000, con referencia editorial de 2006-2009 (Victoria *et al.*, 2012).

Por las razones anteriores y considerando que algunas de las condiciones actuales de los terrenos de la cuenca no se reflejan en la cartografía disponible, se decidió elaborar mapas de uso de suelo y vegetación propios, de modo que tuvieran una escala de trabajo y visualización que ayudara a cumplir los objetivos de este trabajo y que representaran mejor la realidad del terreno en las dos épocas seleccionadas para explicar mejor los cambios en el régimen hidrológico de la cuenca asociados a cambios del uso del suelo y la vegetación de la cuenca.

Para obtener los usos de suelo de la cuenca para antes de las acciones de conservación y recuperación de suelos se utilizaron 3 fotografías aéreas pancromáticas (blanco y negro) adquiridas en septiembre de 1974 a escala 1:25,000, que se escanearon en un multifuncional Epson Stylus TX410 a 400 píxeles por pulgada (ppp) y se guardaron en formato *.tif. Con las imágenes se armó un mosaico utilizando Adobe Photoshop CS2® (Figura 14) para posteriormente geo-referenciarlo en ArcMap 9.3 utilizando 4 puntos de control. Los polígonos de los usos de suelo se definieron por fotointerpretación en pantalla en función de la apariencia, coloración y textura, digitalizando y capturando los registros de uso de suelo de cada polígono.

Para obtener los usos de suelo y vegetación de la cuenca para después de las obras de conservación, se utilizó una imagen en color verdadero del 7 de enero de 2012 obtenida de Google Earth®, exportada en formato *.bmp a 72 ppp (Figura 15) y geo-referenciada en ArcMap 9.3 utilizando 4 puntos de control.

Los polígonos de los usos de suelo se definieron digitalizando en pantalla por fotointerpretación de la apariencia, coloración y textura a una escala de trabajo 1:2,000. Así mismo se realizó un reconocimiento en campo de aquellos polígonos en los que se tenía duda. El trabajo de campo consistió en tres recorridos en los que en total se visitaron 63 puntos de interés y se tomaron 307 fotografías que permitieron asociar condición de suelo, vegetación y prácticas de conservación de modo que se tomara esta información en consideración para definir el uso de suelo de cada polígono.

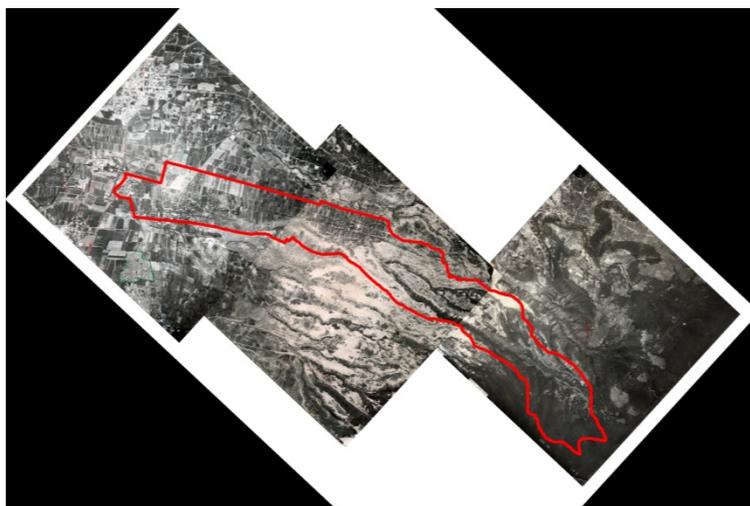


Figura 14. Mosaico de fotografías aéreas para identificación de uso de suelo y vegetación en 1974.

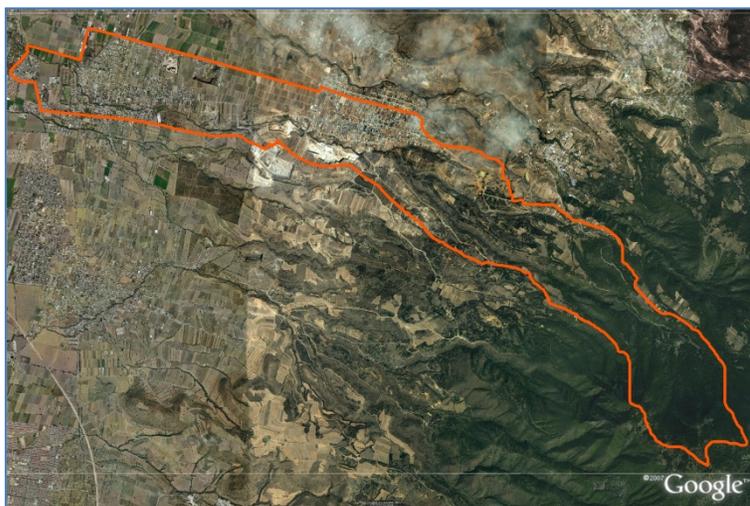


Figura 15. Imagen de Google Earth® para identificación de uso de suelo y vegetación en 2012.

4.5.2. Análisis de NDVI

Para poder determinar el vigor de la vegetación y los cambios de uso de suelo de la cuenca en el periodo de estudio se seleccionaron imágenes del año 1979 y 2007, que son aproximadas al periodo de estudio del análisis hidrológico; la primera fecha se determinó así porque la reforestación apenas se estaba estableciendo y tendría un pequeño crecimiento, además que era la imagen que estaba disponible.

Para la primera fecha (Octubre-1979) se procesaron imágenes satelitales LANDSAT-MSS y para la segunda fecha (Septiembre-2007) una LANDSAT-ETM+. Una vez obtenidas las imágenes satelitales correspondientes, se utilizó la opción “Raster Calculator” de la herramienta Spatial Analyst para ArcGIS 9.3 para el cálculo de

NDVI. En la ventana que aparece con esta herramienta, se agregaron las capas correspondientes de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{Float(B4 - B3)}{Float(B4 + B3)}$$

La ecuación utiliza el operador Float para que el resultado de la operación sea punto flotante. Si se omite Float, el resultado final va a ser entero (cero y uno), lo cual es incorrecto para calcular este índice de vegetación.

Una vez obtenidas las capas ráster con valores de NDVI, se asignaron estos valores a los polígonos de los usos de suelo en las dos fechas de estudio y a algunas áreas de cambio seleccionadas como las más importantes: zonas de minas, urbanas y las áreas reforestadas con diferentes obras de conservación (terrazas, cepa y/o subsoleo, terrazas-zanjas trinchera y zanja trinchera). Utilizando ArcGIS 9.3, se seleccionó la herramienta "Zonal Statistics as Table". En la ventana que aparece se sigue el siguiente procedimiento: en el campo *Input Raster o Feature Zone Data* se introduce la capa de polígonos y se le asigna un campo con atributo único para cada polígono como "Zone Field", en este caso el que contiene los usos de suelo o áreas de cambio; en la tabla resultante se corresponde al campo "Value". En el campo *Input Value Raster* se asigna la capa generada que contiene los valores de NDVI; En el campo *Output Table* se asigna el nombre de las tablas de salida y la ruta en la que se encontrará y se ejecuta el procedimiento. Finalmente, se selecciona la herramienta "Join Field" para fusionar la tabla de la capa de polígonos con las tablas generadas por los campos que son comunes en ambas, que es el uso de suelo. Por último, se obtuvo la diferencia entre los valores promedio de NDVI para los distintos usos de suelo y las áreas de cambio en las dos fechas de estudio según la fórmula de Yacouba *et al.* (2009):

$$\Delta NDVI = NDVI_{(t1)} - NDVI_{(t2)}$$

Donde:

$\Delta NDVI$ = cambio en valor de NDVI

$NDVI_{(t1)}$ = valor de NDVI en la fecha 1

$NDVI_{(t2)}$ = valor de NDVI en la fecha 2

4.6. ACCIONES DE CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELO Y VEGETACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Para complementar la información colectada y generada con los mapas de uso de suelo de las dos épocas de análisis, se obtuvo además un mapa de las obras de conservación construidas en la cuenca por el Plan Lago de Texcoco, proporcionado por el personal de las oficinas del Plan Lago de Texcoco (com. pers.). Así mismo, se utilizó un mapa a escala 1:20,000 elaborado por Adame (1991) en el que se muestra la

distribución de las zonas reforestadas asociadas a cepa o subsoleo, terrazas o zanjas trinchera. Dado que el mapa estaba impreso a escala real (93.5 x 62.5 cm), fue necesario escanear en partes el área de interés con un multifuncional Epson Stylus TX410 a 600 píxeles por pulgada (ppp). Las partes escaneadas se guardaron en formato *.tif y con ellas se armó un mosaico en Adobe Photoshop CS2® (Figura 16) para posteriormente geo-referenciarlo en ArcMap 9.3 utilizando 4 puntos de control.

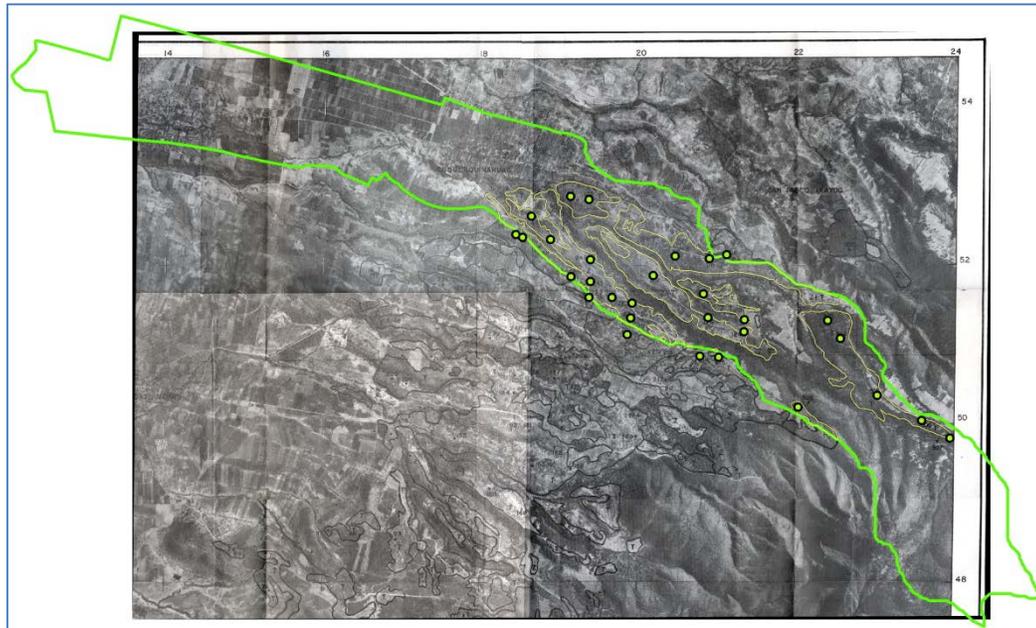


Figura 16. Mapa de obras de conservación de suelo y agua de (Adame, 1991).

Una vez hecho esto, se digitalizaron los polígonos que corresponden a las zonas en las que existen obras de conservación dentro de la Cuenca del Río Chapingo. Aunado a esto, el trabajo de Adame (1991) incluye un inventario de 307 puntos de muestreo que permitió generar otra capa que contiene 30 puntos en la cuenca con información de coordenadas X, Y y Z, la práctica mecánica de conservación y las especies arbóreas encontradas en el sitio, habiendo algunas que cuentan con hasta cuatro especies diferentes en el mismo sitio. Una vez obtenidos ambos mapas, se hizo la comparación en cuanto al uso de suelo y el área ocupada en ambos años.

Se identificó un predio denominado “Las Cruces” que pertenece a la Universidad Autónoma Chapingo, y con las coordenadas del polígono reportadas por Romero (2009) se encontró que una parte del predio queda dentro de la cuenca y se le considera como una zona de exclusión que no ha estado sometida a las actividades antropogénicas.

Para mejorar el inventario de obras y prácticas de conservación del suelo y agua de la cuenca se utilizó información de la Gerencia del Lago de Texcoco de CONAGUA (2012, com. pers.), la cual incluye presas de control de azolves y escurrimiento y áreas de reforestación con diferentes especies arbóreas, asociadas o no

a obras de conservación de suelo. Esta información permitió mayor precisión en la localización y descripción de las obras y ayudó a afinar la información de Adame (1991).

4.7. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS

La información de precipitación, escurrimientos medios, máximos y producción de sedimentos para ambos periodos (antes y después de la acciones de conservación y recuperación de suelos y vegetación) fue procesada utilizando “Análisis de datos” de Microsoft Office Excel®, con el que se realizó una comparación de los datos hidrológicos con la prueba de F para la ver si las varianzas de las poblaciones eran iguales o diferentes y la prueba t de Student para la comparación de las medias de cada variable hidrológica.

4.7.1. Prueba de F

La comparación de la variabilidad de las series de datos hidrológicos de los dos periodos se realizó como dos grupos independientes mediante la prueba “F” que permite comparar las varianzas de dos poblaciones y determinar si son iguales o diferentes.

Para interpretar la prueba se compara este valor de F calculado, con el indicado en la tabla de F de Fisher, para los grados de libertad de los dos grupos correspondientes. Si la probabilidad es p menor que 0.05 o en general, menor que el valor hipotético previsto para el valor de F obtenido, se acepta generalmente que la diferencia entre las varianzas es significativa (varianzas heterogéneas o heterocedásticas); si p es mayor que 0.05, se dice que las varianzas son iguales (estadísticamente), homogéneas u homocedásticas.

La herramienta “Prueba F para varianzas de dos muestras” de Microsoft Office Excel® (Figura 17) proporciona el resultado de la hipótesis nula de que estas dos muestras provienen de una distribución de la población con varianzas iguales frente a la alternativa de que las varianzas no sean iguales en las distribuciones subyacentes. La herramienta calcula el valor f de una estadística F (o proporción F). Un valor de f cercano a 1 proporciona pruebas de que las varianzas de población subyacentes son iguales.

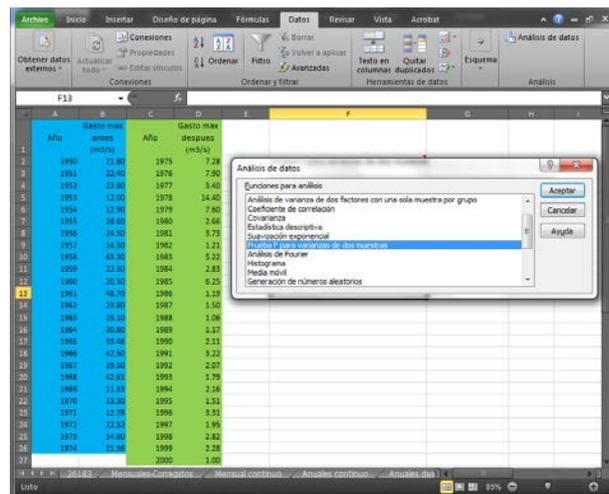


Figura 17. Prueba F para varianzas de dos muestras.

En la tabla de resultados, si $f < 1$ “P(F ≤ f) de una cola” la probabilidad de observar un valor de la estadística F menor que f cuando las varianzas de la población son iguales, y “Valor crítico de F de una cola”

proporciona el valor crítico menor que 1 para el nivel de importancia elegido, Alfa. Si $f > 1$, “P($F \leq f$) de una cola” proporciona la probabilidad de observar un valor de la estadística F superior a f cuando las varianzas de población son iguales, y “Valor crítico de F de una cola” proporciona el valor crítico mayor que 1 para Alfa (Microsoft®, 2013).

4.7.2. Prueba de t de Student

La prueba “t de Student” se utiliza para comparar las medias o promedios de dos grupos de datos hidrológicos independientes, o las diferencia pareadas entre dos grupos no independientes, cuando el tamaño de muestra es pequeño (< 30). Una vez obtenido el valor de t, el modo de interpretarlo es igual al de la prueba de F.

Las pruebas “F” y “t” son dos pruebas independientes, pero debe hacerse primero la prueba “F” para saber que opción de prueba de “t de Student” se debe aplicar.

Las herramientas de análisis de Microsoft Office Excel® “Prueba t de dos muestras” (Figura 18) permiten comprobar la igualdad de las medias de población que subyacen a cada muestra. Las tres herramientas disponibles utilizan diferentes suposiciones: que las varianzas de población son iguales, que las varianzas de población no son iguales y que las dos muestras representan observaciones anteriores y posteriores al tratamiento en los mismos sujetos; se calcula un valor de la estadística T, t, y se muestra como “t Stat” en las tablas de resultados.

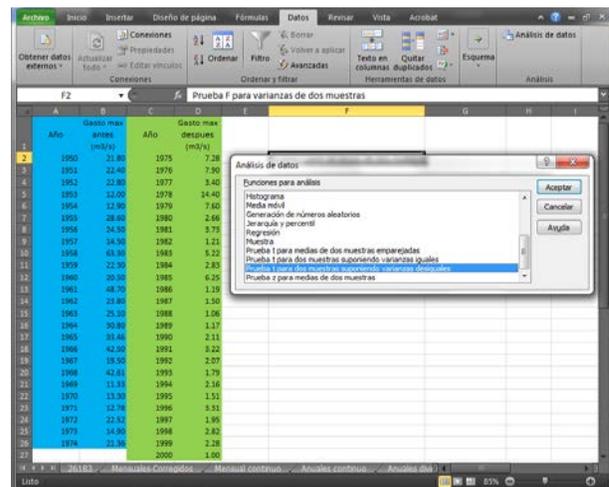


Figura 18. Prueba t de dos muestras.

Dependiendo de los datos, este valor t puede ser negativo o no negativo. Suponiendo medias de población subyacentes iguales, si $t < 0$, “P($T \leq t$) de una cola” proporciona la probabilidad de que se observe un valor de la estadística T que sea más negativo que t. Si $t \geq 0$, “P($T \leq t$) de una cola” proporciona la probabilidad de que se observe un valor de la estadística T que sea más positivo que t. “Valor crítico t de una cola” proporciona el valor de corte para que la probabilidad de observar un valor de la estadística t mayor o igual a “Valor crítico t de una cola” sea Alfa. “P($T \leq t$) de dos colas” proporciona la probabilidad de que se observe un valor de la estadística T que sea mayor en valor absoluto que t. “Valor crítico P de dos colas”

proporciona el valor de corte para que la probabilidad de una estadística T observada mayor en valor absoluto que “Valor crítico P de dos colas” sea Alfa (Microsoft®, 2013).

En este trabajo, y después de haber hecho la prueba F, se utilizó la herramienta “Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales”, que ejecuta una Prueba t de Student en dos muestras. En este tipo de prueba se supone que los dos conjuntos de datos proceden de distribuciones con varianzas desiguales. Se conoce con el nombre de Prueba t heteroscedástica. Este tipo de prueba puede utilizarse para determinar si es probable que las dos muestras procedan de distribuciones con medias de población iguales.

4.7.3. Distribución probabilística de escurrimientos máximos instantáneos

El análisis de frecuencia de valores extremos se desarrolla para estimar los valores máximos asociados a diferentes períodos de retorno de datos como por ejemplo las lluvias máximas registradas en una estación pluviométrica o pluviográfica, o bien, como es el caso de este trabajo, los caudales máximos anuales.

Considerando una serie de caudales Q_i , con $i=1, 2, \dots, n$, el análisis de frecuencia se utiliza para estimar la magnitud de un evento Q_T , de cierto período de retorno T, por medio del ajuste a una distribución de probabilidad, la cual se selecciona como la mejor entre un grupo de ellas. (Escalante, 2005).

Para este estudio se seleccionó la distribución probabilística Log Pearson tipo III, que tiene como parámetros α , β (escala y forma) y y_0 (localización) y cuya función de distribución de probabilidad es como sigue:

$$f_x(x) = \frac{1}{x|\alpha|\Gamma(\beta)} \left[\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} e^{-\left[\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right]}$$

Para estimar los escurrimientos máximos instantáneos que se podrían esperar para diferentes periodos de retorno en el periodo antes de las obras si éstas no se hubieran realizado, así como para los escurrimientos máximos esperados para el segundo periodo para diferentes periodos de retorno se utilizó el sistema automatizado en Microsoft Office Excel® (Log Pearson Type III Calculator, propuesto por el United States Geological Survey (USGS) cuya caratula se muestra en la Figura 19 y el acceso al sistema se encuentra en esta dirección electrónica: <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/floodfreq/index.htm>.

El sistema diseñado en Excel requiere como datos de entrada los escurrimientos máximos instantáneos ordenados de mayor a menor con los años correspondientes del periodo de estudio, el valor del sesgo, y el valor de sesgo ponderado superior e inferior de tablas para diferentes periodos de retorno. De esta forma

se obtuvieron los escurrimientos máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno considerando los datos observados de antes y después de las obras.

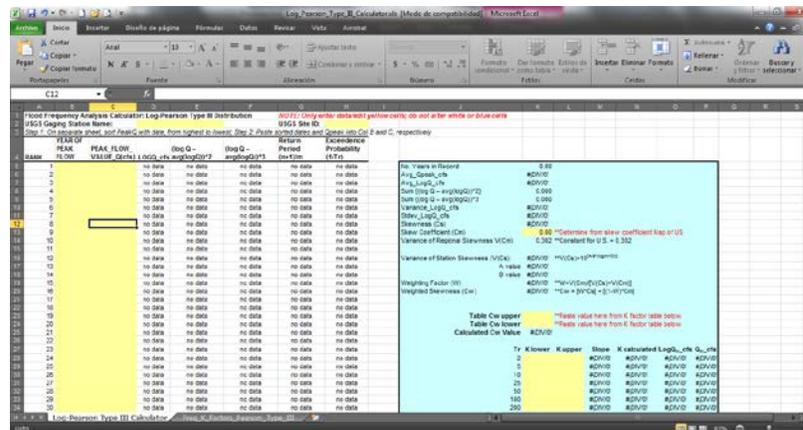


Figura 19. Calculadora de Análisis de frecuencia de Inundaciones.

4.8. EVALUACIÓN O INDICADORES DE IMPACTO EN CUENCAS

Para ambos períodos se utilizó Microsoft Office Excel® para calcular los estadísticos básicos (máximos, mínimos, media, desviación estándar y coeficiente de variación) para precipitación, escurrimiento medio, coeficiente de escurrimiento, producción de sedimentos y escurrimiento máximo instantáneo (Qp); sólo para este último se calculó el sesgo. El análisis de las variables hidrológicas permitió definir los servicios hidrológicos que ofertan las acciones de conservación realizadas.

Los indicadores de los servicios hidrológicos fueron las diferencias entre los escurrimientos medios, los coeficientes de escurrimientos, los escurrimientos máximos y la producción de sedimentos que estuvieron asociados a los trabajos realizados.

La eficiencia técnica de las prácticas y obras de conservación se determinó con las diferencias de las variables hidrológicas (escurrimiento medio, coeficiente de escurrimientos, escurrimientos máximos, recargas de acuíferos y producción de sedimentos) para antes y después de las acciones entre la variable medida antes de las mismas como se muestra a continuación (Mancilla *et al.*, 2009):

$$E = \left(\frac{I_{so} - I_{co}}{I_{so}} \right) \times 100$$

Donde:

E = eficiencia (%)

Iso = indicador medido sin obras (antes)

Ico = el mismo indicador medido con obras

A cada variable hidrológica analizada se le determinó la tasa de cambio por periodo y entre periodos utilizando regresiones para valorar los cambios de antes y después por efecto del desarrollo de la vegetación, los incrementos en las tasas de infiltración y el control del flujo superficial tanto en las laderas como en los cauces producto de las obras y prácticas de conservación y recuperación de suelos y de las estructuras para control de los escurrimientos y la retención de azolves.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la caracterización morfométrica de la cuenca, los cambios de uso del suelo y vegetación, la variación del NDVI para los distintos usos de suelo y áreas de cambio, el análisis de las variables hidrológicas (precipitación, escurrimiento, coeficiente de escurrimiento, escurrimiento máximo instantáneo, recarga de acuíferos y producción de sedimentos) en los periodos de antes (1950 - 1974) y después (1975 - 2000) del establecimiento de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua. Así mismo, se presenta el análisis de los cambios en las variables hidrológicas, como los indicadores de eficiencia de las acciones, que pueden ser reconocidos como los servicios ambientales hidrológicos producto del manejo de la cuenca del Río Chapingo.

5.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1.1. Ubicación y delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca realizada con el módulo Automatic Watershed Delineation de la extensión ArcSWAT v. 2009.93.7b para ArcMap 9.3 a partir del MDE se muestra con una línea amarilla, resultando en una superficie de 2,038.46 ha pero no refleja la realidad del terreno; al compararse con la delimitación realizada por CONAGUA (línea verde continua) (2012, com. pers.) se encontró una superficie menor en 186 ha que indica un error en la estimación del 9.3%, lo que se consideró como un error de medición a disminuir (Figura 22).

Por esta razón y a pesar de no contar con mayor precisión en el MDE, se delimitó la cuenca haciendo una corrección manual a partir de la digitalización en pantalla de las ortofotos del servidor WEB de INEGI y con ayuda de la herramienta “Perfil de Elevación” de Google Earth®, obteniéndose una superficie de 1,923.42 ha. Esta superficie al compararla con 2,038.46 ha obtenidas con la delimitación automática, resultó una diferencia de 115.04 ha; que indica una error de estimación del 5.6%, el cual se consideró aceptable.

Al comparar la delimitación manual de la cuenca con la reportada por CONAGUA (2012, com. pers) se encontró una mayor coincidencia, con una diferencia de 70.98 ha y una variación en la estimación del 3.69 % (Cuadro 12 y Figura 20).

Cuadro 12. Comparativo de la delimitación de la Cuenca del Río Chapingo.

Fuente de la cuenca	Área (Ha)	Perímetro (Km)
Delimitación manual	1,923.42	34.70
ArcSWAT	2,038.46	36.46
CONAGUA	1,852.44	32.72



Figura 20. Comparativo de la delimitación de la Cuenca del Río Chapingo

Se considera, a partir de este resultado que el empleo de plataformas SIG, información digital y procesos automatizados no sustituyen los criterios humanos cartográficos, topográficos y de reconocimiento de la zona para delimitar un parteaguas. La razón que explica las diferencias observadas es que en la parte media y baja de la cuenca se han construido caminos y ha crecido el área urbana lo cual ha modificado el paisaje, especialmente en la zona cercana a la estación de aforo (Figura 20).

5.1.2. Características morfométricas de la cuenca del Río Chapingo

Para este trabajo se consideró una superficie de 1,932.42 ha, un perímetro de la cuenca (longitud del parteaguas) de 34.7 km y se utilizó la red hidrográfica reportada por INEGI para obtener los parámetros morfométricos que influyen en los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Chapingo.

Las características morfométricas de una cuenca, el sistema de drenaje, el perfil longitudinal del cauce principal y su pendiente influyen en el movimiento del flujo superficial. Los índices de forma de la Cuenca del Río Chapingo indican que se trata de una cuenca alargada con una pendiente de 18.51 % en la que predomina la zona montañas de bosque que ocupa casi 55 % de la cuenca, con presencia de casi una corriente por km^2 como densidad hidrográfica y $1.98 \text{ km}/\text{km}^2$ de densidad de drenaje, lo que indica una baja proporción de drenaje y alta percolación.

Con el análisis del mosaico fotográfico se identificaron zonas erosionadas y con cárcavas en la parte media de la cuenca, que influyeron en el incremento de los escurrimientos superficiales en el periodo de antes de las obras. En contraste, el establecimiento de obras y prácticas de conservación modificaron los sistemas de drenaje y las relaciones de bifurcación por la construcción de las presas de control de azolves en los cauces y el establecimiento de terrazas y reforestaciones en las zonas degradadas, lo que influyó en la reducción de los escurrimientos, los gastos máximos instantáneos por evento, los cambios del flujo superficial en las corrientes naturales y la cantidad de sedimentos transportados. El Cuadro 13 presenta el resumen de las características morfométricas estimadas con el sistema automatizado en Microsoft Office Excel®.

Cuadro 13. Características morfométricas de la cuenca del Río Chapingo.

Cuenca		Drenaje		Cauce principal	
Área (ha)	1923.42	Orden de corrientes		Longitud (km)	17.02 Km
Perímetro (km)	37.70	Horton	13	Pendiente media (%)	6.99 %
Forma		Strahler	15		
Índice de forma	0.07	Densidad hidrográfica (corrientes/km ²)			
Coefficiente de compacidad	2.22	Horton	0.68		
Relación de circularidad	0.2	Strahler	0.78		
Proporción de elongación	0.29	Relación de bifurcación			
Pendiente (%)	18.51	Horton	6		
Elevación media (msnm)	2,612	Strahler	4		
		Densidad de drenaje	1.98 Km/Km ²		

Las características morfométricas indican que se trata de una cuenca alargada, con densidades de drenaje e hidrográficas bajas, con sistemas orográficos en la parte alta que muestran una pendiente media de la cuenca elevada y la pendiente del cauce principal es de 7 %; la variación de la pendiente en la cuenca, así como la longitud y desnivel de la corriente principal influyen en el tiempo de concentración del flujo superficial, que en este caso se estimó en 1.6 horas. Sin embargo, el establecimiento de las presas de control de azolves y las obras y prácticas de conservación de suelo y agua aumenta la capacidad de almacenamiento del agua en el sistema de drenaje, redujeron la velocidad del flujo en las laderas y corrientes e incrementaron el tiempo de concentración, situación que influye en los hidrogramas del flujo superficial principalmente.

5.2. CONSERVACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Con información de CONAGUA (2012, com. pers.), Adame (1991) y recorridos de campo se integró un mapa y su correspondiente base de datos sobre los trabajos de conservación realizados en la Cuenca del Río Chapingo durante los pasados 40 años (Cuadro 14).

Cuadro 14. Reforestación en la cuenca del río Chapingo.

Obras	Clave	Área (Ha)
Reforestación en cepa y/o subsoleo	R	5.66
Reforestación en terraza	T	112.28
Reforestación en terraza + zanja trinchera	T + Z	140.29
Reforestación en zanja trinchera	Z	67.04
Total		325.27

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2012 y Adame, 1991.

La reforestación se realizó asociada a diferentes sistemas de preparación del suelo para el establecimiento de los árboles, encontrando que las reforestaciones asociadas con terrazas y zanjas trinchera ocupa la mayor área, seguida de la reforestación en terraza, la reforestación en zanja trinchera y por último la reforestación en cepa o subsoleo (Cuadro 14 y Figura 23). Las prácticas de manejo del suelo para las reforestaciones que prevalecen a la fecha se muestran en la Figura 21.

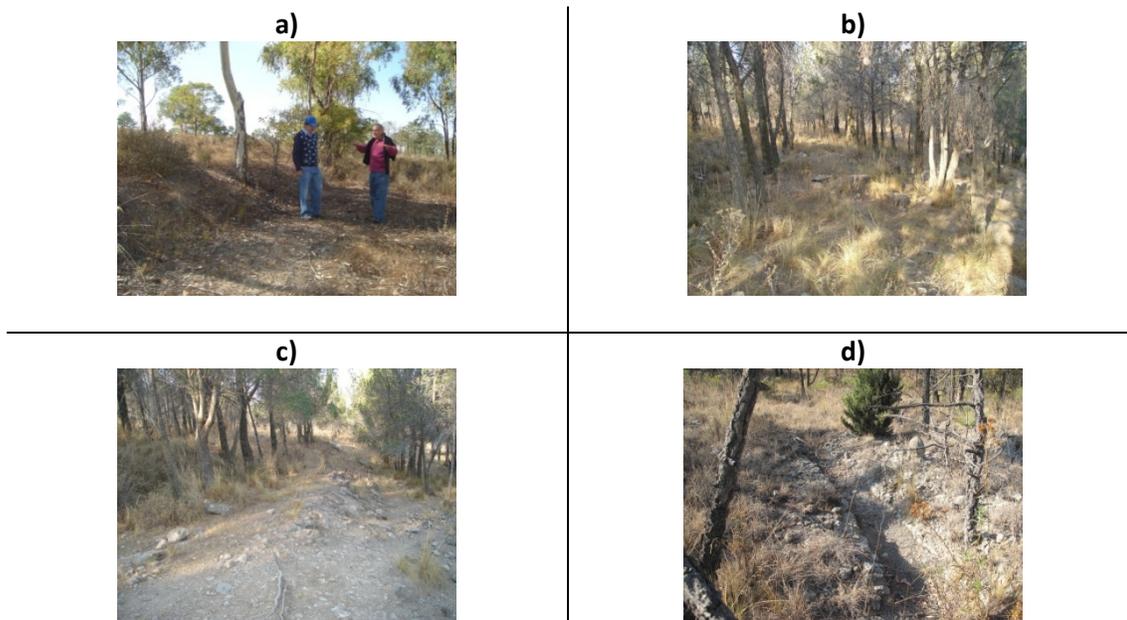


Figura 21. Reforestación en la Cuenca del Río Chapingo: a) Terrazas, b) Cepa, c) Subsoleo y d) Zanja trinchera.

Lo anterior responde a las necesidades que hubo en los años 70's de tratar las áreas degradadas con afloramiento de tepetates y material parental, de modo que se aumentara la infiltración del agua de lluvia y la retención de humedad del suelo, con la finalidad de asegurar una mayor sobrevivencia de las reforestaciones realizadas. A pesar de la asociación entre plantaciones y la obras de manejo de los se tuvieron altos índices de mortandad que demandó realizar varias plantaciones en las mismas zonas (com. pers.)

Las zonas de reforestación asociadas con las prácticas de manejo de suelos se identificaron como polígonos que se ubican en la parte media-alta de la cuenca con sus coordenadas y que corresponden a las zonas identificadas como zonas degradadas y de tepetates que se identificaron en el uso del suelo del 2007 como se discutirá posteriormente (Figura 24). Además, en las zonas trabajadas, se levantaron los registros de 26 puntos de muestreo en los que se colectó información sobre las especies plantadas en las reforestaciones, habiendo algunos sitios en los cuales se encontraron hasta 4 especies diferentes, plantadas en diferentes épocas, lo que dio como resultado que la vegetación sea uni o multiespecie y heterogénea en diversidad y edad (Cuadro 15). No fue posible obtener datos de las fechas de las plantaciones.

Cuadro 15. Especies plantadas en la reforestación de la Cuenca del Río Chapingo.

NUM	PRACTICA	Especie 1	Especie 2	Especie 3	Especie 4
221	Reforestación	<i>Casuarina equisetifolia</i>	<i>Eucalyptus sp</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	
214	Reforestación	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>	<i>Pinus pseudostrobus</i>
215	Terraza	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>		
124	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus radiata</i>		
110	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>			
111	Terraza	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus radiata</i>		
126	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus radiata</i>		
223	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus sp</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>
224	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>	
129	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Eucalyptus sp</i>	<i>Pinus radiata</i>	
118	Cepas SB	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus montezumae</i>		
119	Zanja trinchera	<i>Pinus montezumae</i>			
242	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus sp</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>
227	Zanja trinchera	<i>Casuarina equisetifolia</i>	<i>Eucalyptus sp</i>		
245	Zanja trinchera	<i>Pinus montezumae</i>			
147	Terraza	<i>Eucalyptus sp</i>			
195	Terraza	<i>Pinus radiata</i>			
143	Terraza	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus radiata</i>		
246	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Pinus radiata</i>	
248	Zanja trinchera	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>	
249	Zanja trinchera	<i>Eucalyptus sp</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus radiata</i>	
122	Terraza	<i>Eucalyptus sp</i>			
123	Terraza	<i>Eucalyptus sp</i>			
116	Terraza	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus radiata</i>		

Fuente: Adame, 1991

Adicionalmente a las acciones de reforestación, se obtuvo el inventario de la infraestructura hidráulica construida por el Plan lago de Texcoco actualizado a 2010, el cual arroja un total de 117 presas de control

de azolves construidas de gaviones, mampostería, mixtas y de muro seco. Ejemplos de los diferentes tipos de presas construidas con su estado de conservación se muestran en la Figura 22; para el caso de la Figura 22f, se desconoce el motivo del porqué se construyó con una compuerta..

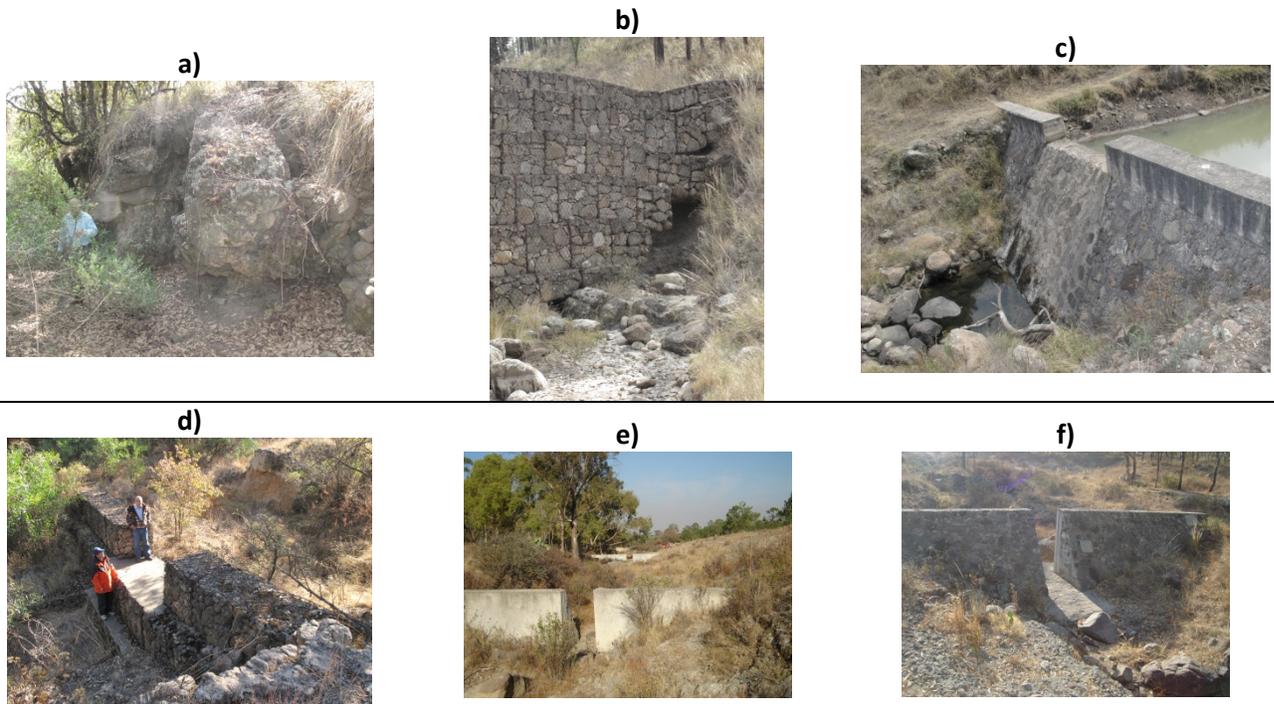


Figura 22. Presas en la Cuenca del Río Chapingo: a) de gaviones destruida, b) de gaviones semidestruida, c) de mampostería, d) de gaviones, e) y f) de mampostería con compuerta.

El estado de las presas, de acuerdo con la información levantada por la CONAGUA, muestra que el 57% de las presas se encuentran en muy buenas condiciones, resaltando las presas de gaviones o mampostería, consideradas como permanentes, las que están en más del 94% en buenas condiciones; sólo el 3% de las presas fueron reportadas en buen estado, el 38% se reportaron en un estado de conservación regular y malo y corresponde a las presas de muro seco (Cuadro 16).

Cuadro 16. Infraestructura hidráulica de la Cuenca del Río Chapingo.

Tipo de Obra	Estado de las obras					Total
	Muy Bien	Bien	Regular	Mal	Sin información	
Gaviones	35	-	-	-	1	36
Mampostería	30	1	-	-	1	32
Mixta	1	-	-	-	-	1
Muro seco	1	3	10	34	-	48
Total	67	4	10	34	2	117

La ubicación espacial de las áreas de reforestación, las obras de conservación y recuperación de suelos y las presas de control de azolves construidas en el período de la década de los 70's y hasta a mediados de los

80's (CONAGUA 2012, com., pers.) fueron ubicados con la información proporcionada por CONAGUA 2012, la reportada por Adame (1991) y la verificación geográfica de campo realizada en este trabajo se muestra en la Figura 23.

Los polígonos de las reforestaciones realizadas fueron ubicados en las imágenes de satélite para obtener los cambios en los índices de vegetación (NDVI) para diferentes fechas para así definir los cambios en la cobertura vegetal asociados a la reflectancia de la vegetación como se discutirá posteriormente.

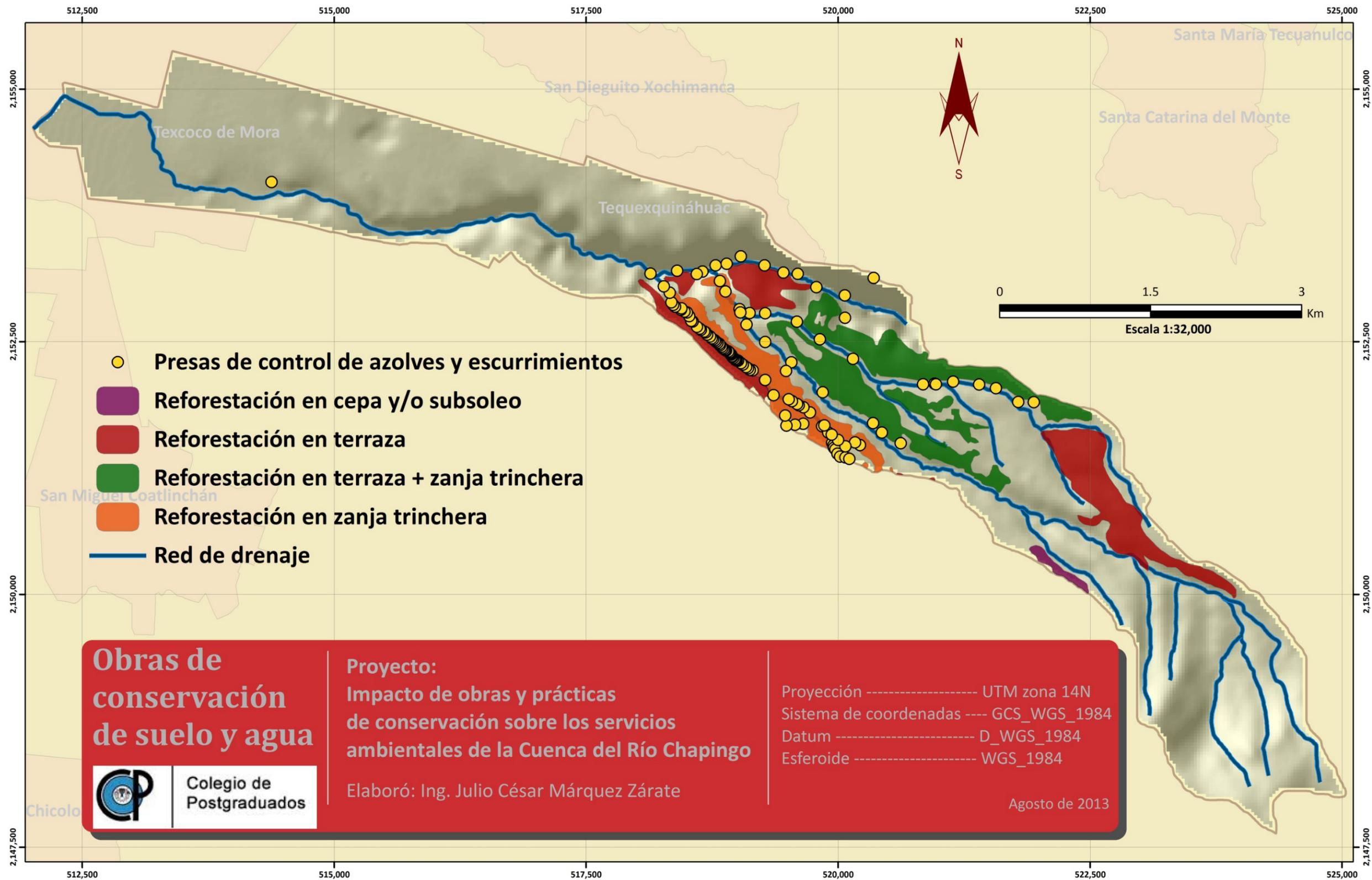


Figura 23. Obras de conservación de suelo y agua en la Cuenca del Río Chapingo.

5.3. IMPACTO DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA Y LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL CAMBIO DE USO DE SUELO DE 1974 A 2012

A lo largo de cerca de 40 años desde que se implementaron las primeras acciones en la cuenca, se han producido algunos cambios en el paisaje por las acciones antropogénicas realizadas por los habitantes de la región, quienes, por ejemplo, han cortado los árboles en desarrollo, han establecido zonas agrícolas donde había zonas boscosas, se han expandido las actividades mineras, incluso en zonas reforestadas, ha aumentado la red de caminos y principalmente ha habido un incremento de la zona urbana, que ha dado origen a dos líneas de acción: una de tipo de conservacionista para la regulación del régimen hidrológico y la otra, de carácter de carácter productivo, de actividades de apoyo a la producción, de urbanización y de extracción de arena que impactan negativamente los procesos hidrológicos y las conservación de las reforestaciones realizadas.

5.3.1. ANÁLISIS DE LOS USOS DEL SUELO UTILIZANDO LA INFORMACIÓN DE INEGI

Para identificar los usos del suelo con la cartografía emitida por fuentes oficiales, se analizaron las Serie I y IV de INEGI y se encontró que la agrupación por usos de suelo era diferentes en las dos series, los usos forestales no eran comparables y era difícil tratar de agruparlos para analizar los cambios en el periodo que abarca este estudio, de cerca de 40 años Cuadro 17.

La información reportada muestra cambios evidentes en los usos de suelo que son difíciles de asociar a las acciones realizadas por el manejo integral en los años 70's, y sobre todo las agrupación de vegetación forestal de la serie IV; sin embargo, se puede señalar la inclusión de la categoría "bosque cultivado" que podría estar asociado a las reforestaciones.

Cuadro 17. Comparación de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI (Series I y IV).

Uso de suelo INEGI serie 1 esc. 1:50 mil	Área (ha)	% de Área	Uso de suelo INEGI serie 4 esc. 1:250 mil	Área (ha)	% de Área
Agricultura riego	59.22	3.1	Agricultura de riego semipermanente	53.20	2.8
Agricultura temporal	1,186.89	61.7	Agricultura de temporal anual	801.65	41.7
Matorral	110.25	5.7	Agricultura de temporal semipermanente	0.40	0.0
Matorral-Pino	28.35	1.5	Asentamientos humanos	77.14	4.0
Oyamel	9.25	0.5	Bosque cultivado	189.34	9.8
Pastizal	26.96	1.4	Bosque de encino	265.65	13.8
Pino	126.01	6.6	Bosque de oyamel	51.32	2.7
Pino-Encino	148.67	7.7	Bosque de pino	350.34	18.2
Reforestación	227.83	11.8	Bosque de pino - encino	69.63	3.6
Total general	1,923.42	100	Pastizal inducido	19.66	1.0
			Zona urbana	45.08	2.3
			Total general	1,923.42	100

En la Figura 24 y Figura 25 (Serie I y IV, respectivamente) se puede apreciar que la cartografía de INEGI no refleja las modificaciones del paisaje, omitiendo algunos usos de suelo que sí existen, subestima unos y sobre-estima otros, sobre todo tratándose de las áreas que el Plan Lago de Texcoco pretendía proteger, puesto que no aparecen las áreas degradadas en la Serie I (Figura 24), por lo que no permite evaluar un cambio de acuerdo a los objetivos de este estudio, además que le da un peso preponderante a la agricultura, generalizando así algunas zonas que sufrieron modificaciones a lo largo de casi 40 años.

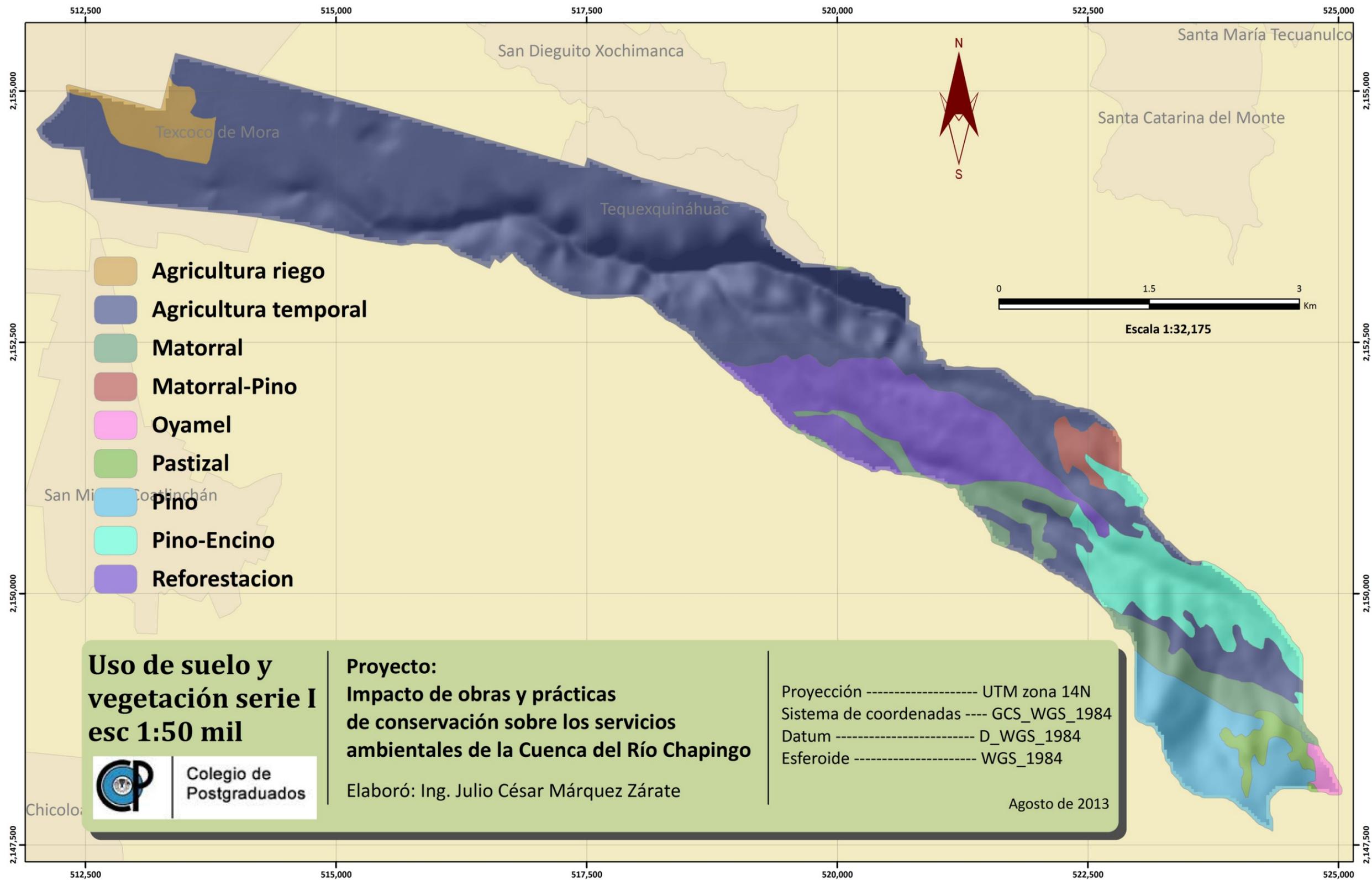


Figura 24. Cartografía de uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo Serie I escala 1:50,000.

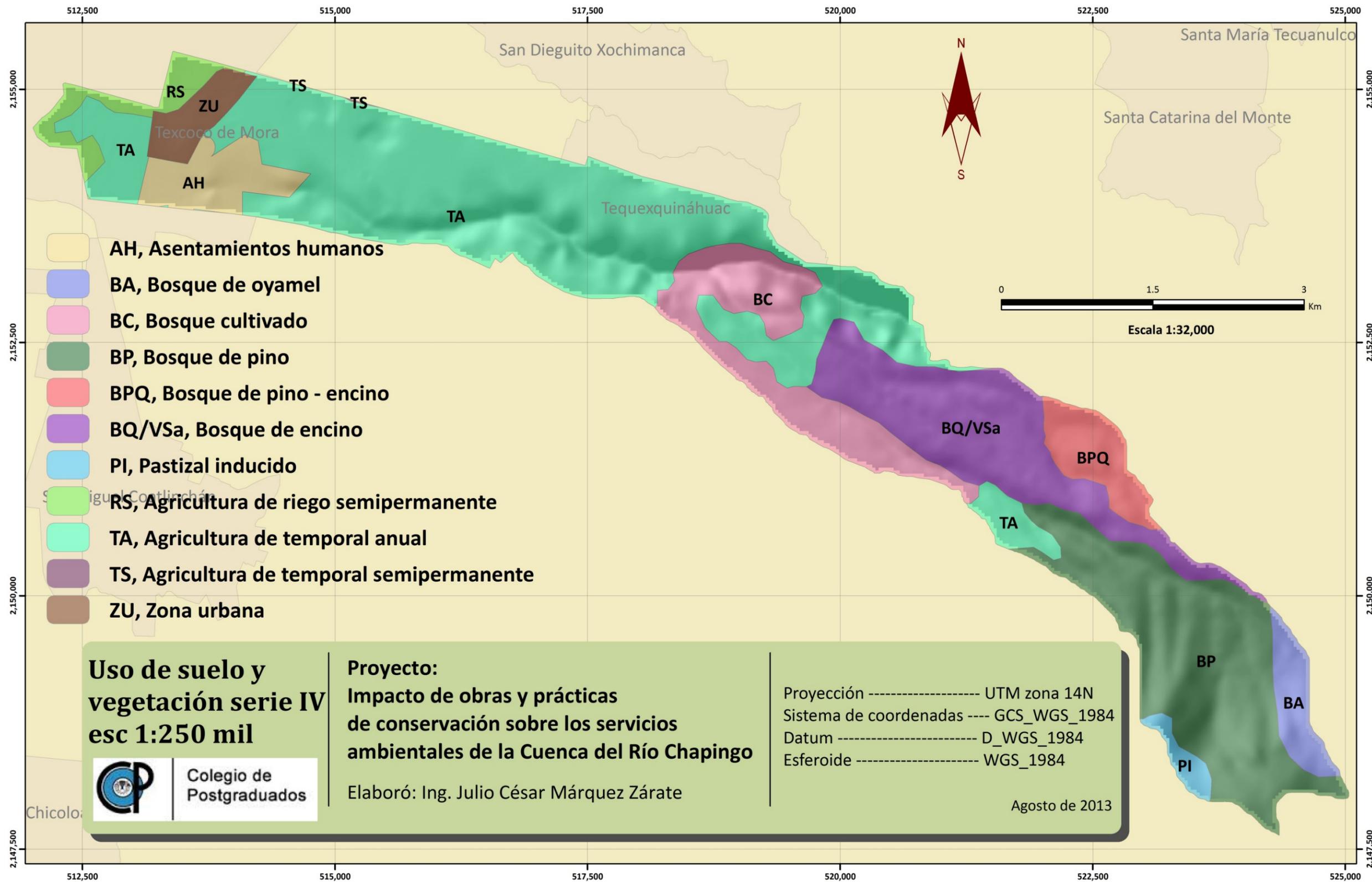


Figura 25. Cartografía de uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo Serie IV escala 1:250,000.

5.3.2. ANÁLISIS DE LOS USOS DEL SUELO ELABORADOS PARA ESTE ESTUDIO

De acuerdo con la información cartográfica existente para 1974, se identificaron los usos de suelo utilizando la metodología descrita, y éstos se agruparon de manera similar a los usos del suelo definidos en la Serie 1 de INEGI, identificando la agricultura de riego y temporal, las zonas degradadas de la parte media y alta de la cuenca, las zonas urbanas de la parte baja y media de la cuenca, las zonas de pastizales, la vegetación forestal dominante, los cuerpos de agua y especial cuidado se tuvo en la identificación de la zona de minas que inicio a partir de los años 80's (Cuadro 18 y Figura 26).

Para el 2012, se siguió el mismo criterio de clasificación de los usos del suelo con la modalidad de incluir las zonas de reforestación identificadas en este estudio utilizando la información proporcionada por CONAGUA y Adame (1991), la zona de minas, las áreas de agostadero y las zonas urbanas de la parte baja y media que fueron las áreas de cambio entre las dos cartografías realizadas (Cuadro 18 y Figura 27).

Cuadro 18. Comparación de la cartografía de uso de suelo y vegetación elaborada para 1974 y 2012.

Uso de suelo propio 1974	Área (ha)	% de área	Uso de suelo propio 2012	Área (ha)	% de área
Agricultura de riego	44.47	2.31	Agostadero	47.94	2.49
Agricultura de temporal	703.87	36.59	Agricultura de riego	35.17	1.83
Área degradada - alta	357.23	18.57	Agricultura de temporal	441.58	22.96
Área degradada - media	117.46	6.11	Bosque de encino	102.94	5.35
Bosque de encino	112.23	5.83	Bosque de oyamel	50.44	2.62
Bosque de oyamel	39.13	2.03	Bosque de pino	380.08	19.76
Bosque de pino	396.34	20.61	Bosque de pino - encino	18.00	0.94
Bosque de pino - encino	1.26	0.07	Cuerpo de agua	4.40	0.23
Cuerpo de agua	0.79	0.04	Minas	106.57	5.54
Pastizal	46.28	2.41	Pastizal	42.23	2.20
Urbano	104.36	5.42	Reforestación	315.81	16.42
Total general	1,923.42	100	Urbano	378.26	19.67
			Total general	1,923.42	100

Los usos que sufrieron reducción en su área de 1974 a 2012 fueron las áreas degradadas (media y alta) ya que fueron manejados por el Plan Lago de Texcoco en el programa de reforestación ya mencionado, las zonas de agricultura de temporal que se convirtieron en zonas urbanas y de minas principalmente, y en menor escala, las zonas de bosque de pino, encino y pastizales; en contraste, los usos que aumentaron su área fueron las zonas urbanas, las reforestadas y el área de crecimientos de las minas de arena en explotación (Cuadro 19).

Cuadro 19. Comparativo de los usos de suelo de la cuenca en 1974 y 2012.

USOS	Área 1974 (ha)	Área 2012 (ha)	Cambio en Área (ha)
Agricultura de riego	44.47	35.17	-9.3
Agricultura de temporal	703.87	441.58	-262.29
Bosque de encino	112.23	102.94	-9.29
Bosque de oyamel	39.13	50.44	11.31
Bosque de pino	396.34	380.08	-16.26
Bosque de pino - encino	1.26	18	16.74
Cuerpos de agua	0.79	4.4	3.61
Pastizal	46.28	42.23	-4.05
Urbano	104.36	378.26	273.9
Agostadero	-	47.94	47.94
Área degradada - alta	357.23	-	-357.23
Área degradada - media	117.46	-	-117.46
Minas	-	106.57	106.57
Reforestación	-	315.81	315.81

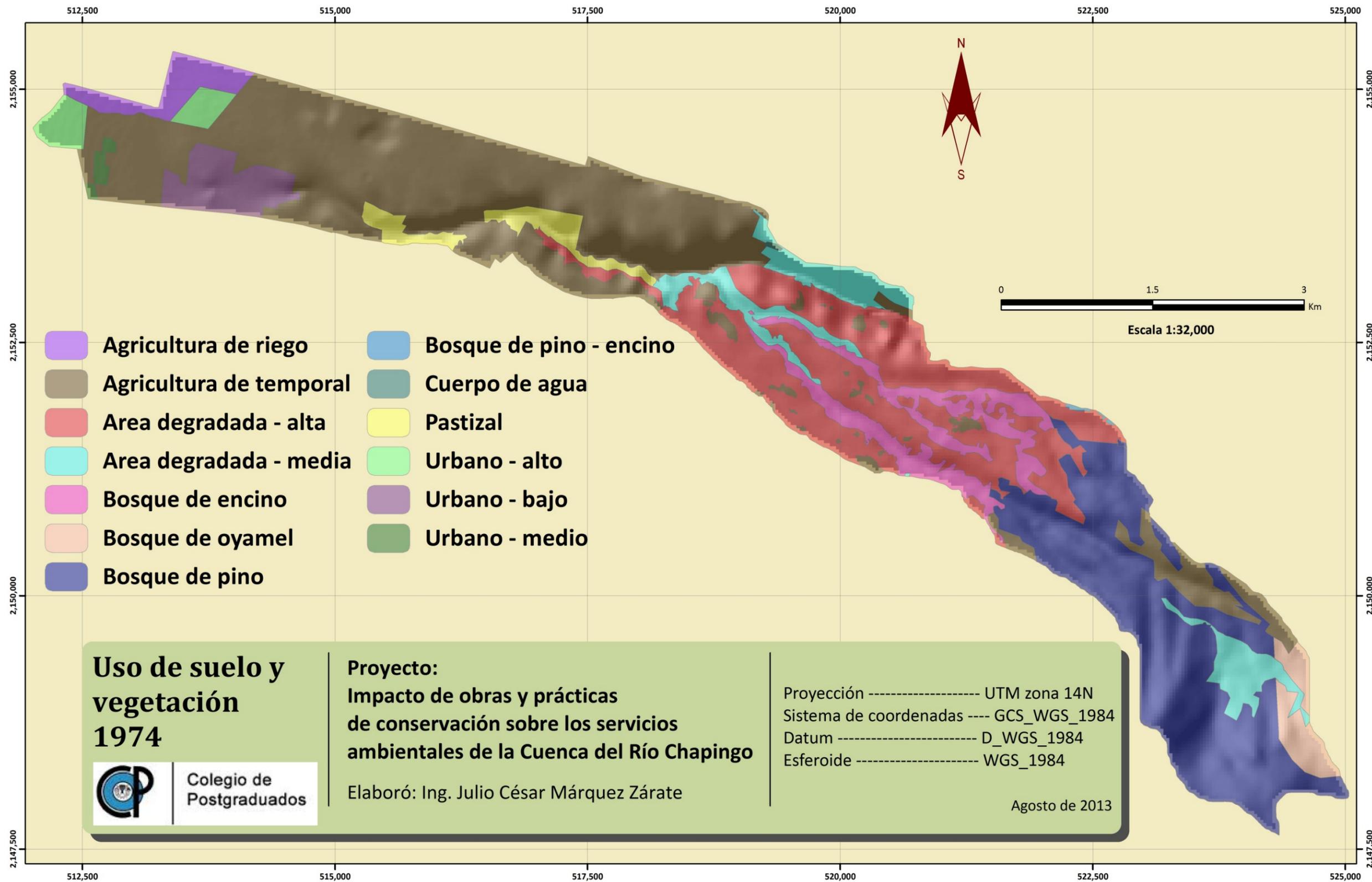


Figura 26. Uso de suelo y vegetación por fotointerpretación para la Cuenca del Río Chapingo en 1974.

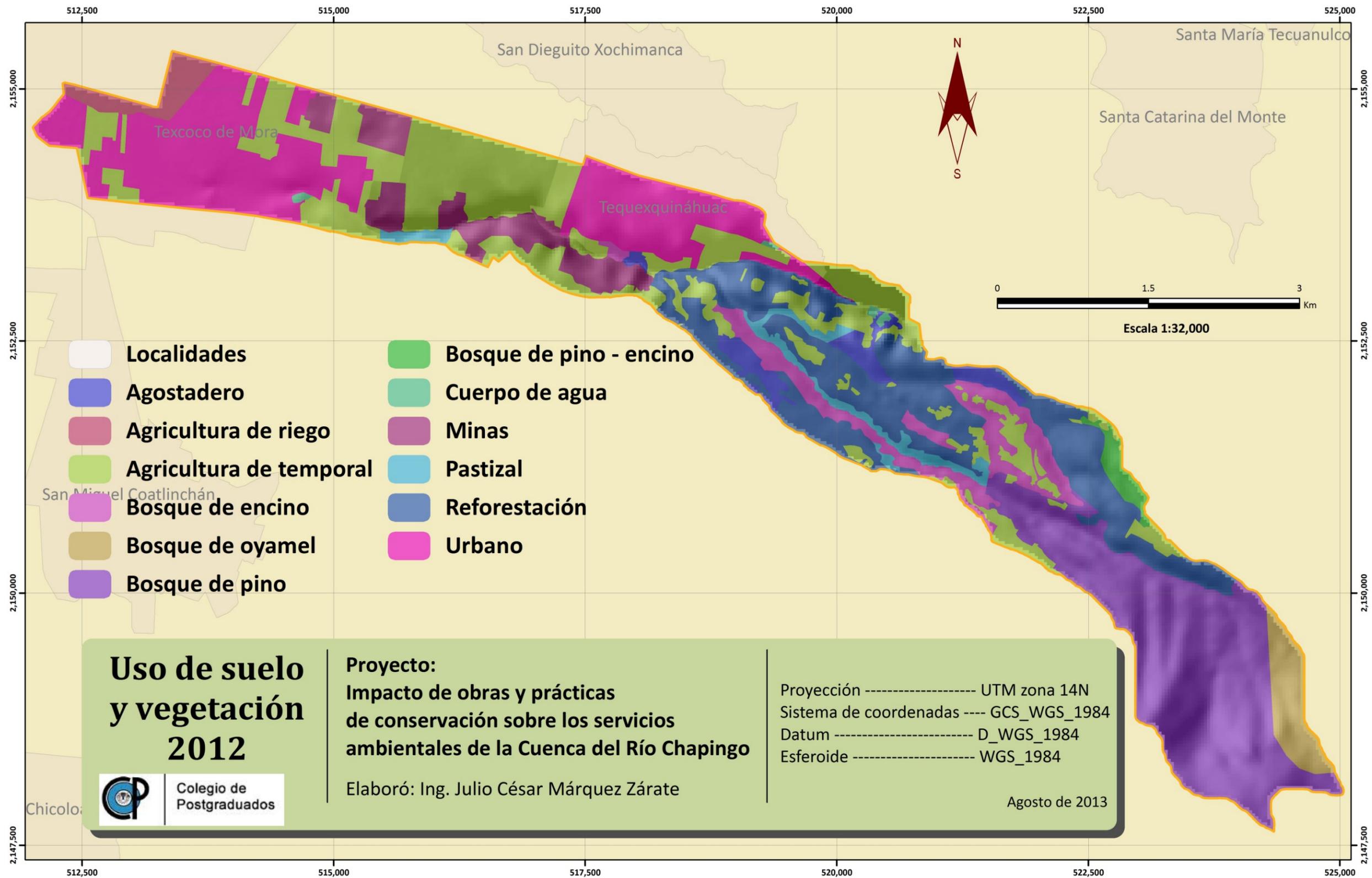


Figura 27. Uso de suelo y vegetación por fotointerpretación para la Cuenca del Río Chapingo en 2012

Los cambios de uso del suelo identificados en el periodo de 1974 a 2012 reflejan las acciones de reforestación con prácticas de manejo de los suelos y el establecimiento de estructuras para la retención de azolves y el control de escorrentías, todo ello como parte de los programas de gobierno para rehabilitar la cuenca y rescatar las zonas degradadas como parte de la provisión de los servicios ambientales hidrológicos (Figura 28). Por otra parte, se presenta el crecimiento desordenado de las zonas urbanas, las vías de comunicación no diseñadas, la reducción de las zonas agrícolas para establecer viviendas (Figura 29) y lo que es más lamentable, el establecimiento y crecimiento de las zonas mineras para extracción de arena, que paulatinamente han ido creciendo en las zonas agrícolas y degradadas, e incluso ahora están creciendo sobre las zonas reforestadas y trabajadas previamente, lo que propicia que aumenten las escorrentías, disminuyen la recarga del acuífero, dejan zonas degradadas (tajos abandonados de las minas de arena) y desde la perspectiva de este estudio, impactan negativamente en la provisión de servicios ambientales hidrológicos.

A) ÁREAS DEGRADADAS 1974



B) ÁREAS REFORESTADAS 2012



Descripción: Al comparar la zona media de la cuenca se pueden apreciar las modificaciones al paisaje durante los pasados 40 años; los polígonos rojos en la imagen A muestran las zonas degradadas que existían en 1974, mientras que en la imagen B se señalan estas mismas zonas en 2012 con una condición completamente diferente, producto de la implementación de reforestaciones y obras de conservación de suelo y agua de la zona; los polígonos amarillos para ambas fechas, muestran zonas agrícolas que permanecen.

Figura 28. Reconversión de zonas degradadas a zonas recuperadas y reforestadas (1974-2012).

Los trabajos de recuperación de suelos realizados han propiciado un impacto favorable en los terrenos de la parte media de la cuenca ya que han permitido que se conserven las zonas agrícolas y se hayan recuperado las zonas degradadas, incluso con un pequeño incremento de las áreas agrícolas (Figura 27).

Consecuentemente, existen una pugna constante entre las acciones del gobierno para la recuperación de los suelos y el control de azolves y avenidas, y el desarrollo humano de la zona; éste último amenaza al primero por el crecimiento desordenado de la zona urbana y por la falta de un ordenamiento territorial que regule el uso del suelo en esta región metropolitana; lo anterior hace que los servicios hidrológicos que se

podrían haber alcanzado estén en riesgo de perderse con la inminente consecuencia de no poder satisfacer las demandas de agua en calidad y cantidad para la creciente población.

El crecimiento de la población ha provocado que los terrenos agrícolas se conviertan en zonas urbanas, que las parcelas se fraccionen, que se reduzca la producción de alimentos y que la población se vuelva cada vez más demandante de bienes y servicios en lugar de producirlos (Figura 29).

A) ÁREAS URBANAS 1974



B) ÁREAS URBANAS 2012



Descripción: Al comparar las imágenes A) y B) se puede ver la evolución y crecimiento de la zona urbana en la parte media de la cuenca; este crecimiento ha venido ocupando y fraccionando espacio que estaba destinado antes a la producción agrícola, haciendo de esta zona un mosaico de uso agrícola y urbano. Al aumentar el área urbana, se modifica el régimen hidrológico de la cuenca por el incremento de los coeficientes de escurrimiento.

Figura 29. Crecimiento de la zona urbana en la Cuenca del Río Chapingo de 1974 a 2012.

Aunado al crecimiento de la población, la existencia de tobas de origen volcánicos con gran potencial para la producción de arena han provocado el establecimiento de minas de arena que han sido una de las

actividades productivas extractivas que se ha incrementado en las últimas fechas y que no se prevé hacia donde ira el horizonte de esta actividad (Figura 30).

A) ZONA DE INFLUENCIA DE MINAS 1974



B) ZONA DE INFLUENCIA DE MINAS 2012



Descripción: Uno de los cambios de uso de suelo más significativos en la cuenca es el establecimiento de minas para extracción de arena; en la imagen B se muestran las minas que existen actualmente en la parte media de la cuenca y al compararla con la imagen A se puede ver que no existía ninguna de ellas en 1974. En esta comparación destaca que la mina ubicada en el polígono verde se estableció en una zona degradada, y en contraste, las minas que aparecen en los polígonos amarillos se establecieron en zonas agrícolas y parte de las previamente recuperadas con el Plan Lago de Texcoco.

Figura 30. Establecimiento de minas de extracción de arena en la Cuenca del Río Chapingo después de 1974.

5.3.3. ANÁLISIS DEL NDVI DE LA CUENCA

En las imágenes de satélite de 1979 y 2007 se ubicaron los polígonos de usos de suelo identificados y las áreas de cambio identificadas para 1974 y 2012, respectivamente, y se estimaron los valores del índice de vegetación (NDVI) para analizar los cambios en la reflectancia de la vegetación que existía y con ello, estimar los cambios en cobertura vegetal debidos a las reforestaciones y las modificaciones realizadas en el terreno.

5.3.3.1. Cambios del NDVI asociados a los cambios de uso de suelo

La sobreposición de los polígonos de uso de suelo de 1974 y 2007 en las imágenes de satélite de 1979 y 2007 respectivamente, permitió calcular la estadística descriptiva según los usos de suelo en las dos fechas de análisis, así como sus tendencias de cambio. Los valores de NDVI disminuyeron de 1979 a 2007 en todos los usos de la cuenca que se determinaron (Cuadro 20 y Figura 31).

Cuadro 20. Valores NDVI para los usos de suelo en 1979 y 2007 y su diferencia.

USOS	VALORES DE NDVI								DIFERENCIA PROMEDIO
	1979				2007				
	Min	Max	Media	Desv. Est	Min	Max	Media	Desv. Est	
Agricultura de riego	0.044	0.350	0.173	0.066	0.000	0.697	0.411	0.156	0.238
Agricultura de temporal	0.011	0.532	0.239	0.080	-0.266	0.707	0.391	0.116	0.152
Bosque de encino	0.031	0.469	0.222	0.095	0.045	0.664	0.424	0.118	0.202
Bosque de oyamel	0.333	0.611	0.450	0.056	0.366	0.627	0.544	0.040	0.094
Bosque de pino	0.192	0.592	0.428	0.070	0.327	0.663	0.522	0.049	0.094
Pastizal	-0.024	0.280	0.130	0.061	-0.313	0.582	0.364	0.139	0.234
Urbano	0.069	0.252	0.151	0.038	-0.081	0.684	0.282	0.134	0.132
Área degradada - alta	0.031	0.526	0.190	0.101	-	-	-	-	
Área degradada - media	0.061	0.600	0.281	0.151	-	-	-	-	
Agostadero	-	-	-	-	-0.106	0.646	0.281	0.106	
Minas	-	-	-	-	-0.065	0.557	0.168	0.124	
Reforestación	-	-	-	-	0.019	0.686	0.381	0.115	

Los valores de NDVI para los diferentes usos de suelo de 1979 y 2007 aumentan a medida que existe mayor cobertura vegetal por la reflectancia que provoca lo verde de la vegetación, como ha sido señalado por Merg *et al.* (2011), quien propone valores mayores de 0.2 para vegetación mediana y alta y valores menores de 0.2 para vegetación escasa y suelo desnudo. Los valores medios de NDVI para los diferentes usos del suelo muestran valores más altos en la vegetación forestal (alta) y disminuyen cuando existe menos

cobertura, sin embargo debe destacarse que por la diferencia del tamaño de pixel entre las dos imágenes, podría existir alguna variabilidad entre los valores mínimo y máximo de NDVI por usos (Cuadro 20).

Por esta razón, los coeficientes de variación son > del 25% en la mayor parte de los usos del suelo de ambos años, destacando que los bosques de pino y oyamel tienen poca variación, por lo que el valor medio del NDVI es un buen estimador de la población o de los polígonos de uso identificados, lo cual contrasta con los coeficientes de variación de más del 50% de las zonas degradadas.

Si los valores promedio de NDVI de 1979 se comparan con los valores promedio de NDVI de 2007 de cada uso de suelo, se infiere que cuando el valor incrementa, se presentó una recuperación de la vegetación; destaca que las zonas degradadas tenían NDVI promedios menores a 0.29 y con las reforestaciones estos valores incrementaron a 0.38, lo que indica que existe un incremento en la cobertura vegetal en esos polígonos. En contraste las zonas de minas tienen valores promedio de NDVI de 0.16, que son menores que cualquier otro uso del suelo (Cuadro 20 y Figura 31).

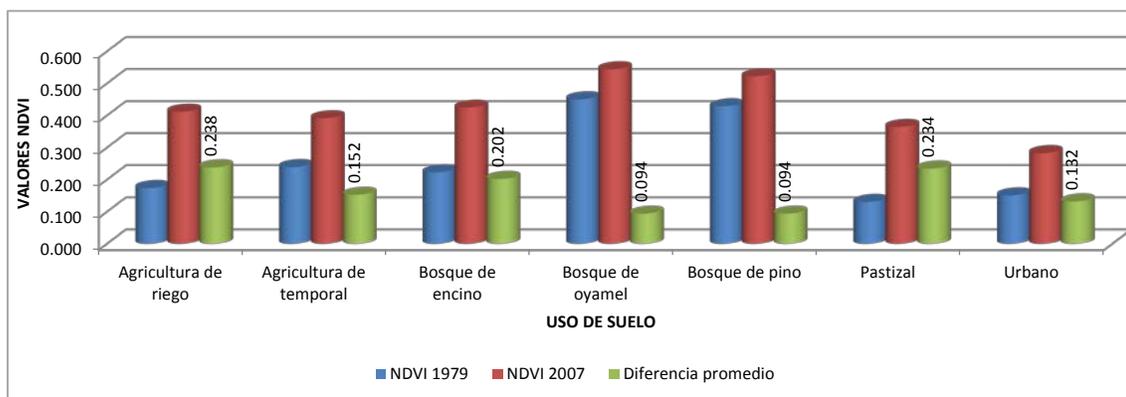


Figura 31. Valores NDVI en la cuenca del Río Chapingo de 1979 a 2002

En ocasiones la diferencia entre los valores NDVI del mismo tipo de uso puede deberse a respuestas diferenciales de la vegetación a condiciones climáticas como sensibilidad a la precipitación o limitaciones por altas temperaturas (Yacouba *et al.*, 2009), sin embargo en este caso, el incremento en los valores de NDVI se puede explicar por el incremento natural de la cobertura vegetal en área y vigor, o con una recuperación de áreas con disturbios.

5.3.3.2. Variación del NDVI en las unidades de cambio

Para identificar los cambios de los valores de NDVI para las unidades de cambio (minas, reforestación con diferentes prácticas y urbanización), se obtuvieron los valores de NDVI para los polígonos identificados para cada unidad en 1979 y 2007 (Cuadro 21 y Figura 32).

Cuadro 21. Valores NDVI por unidades de cambio en 1979 a 2007.

UNIDADES DE CAMBIO	VALORES NDVI										DIFERENCIA PROMEDIO
	1979					2007					
	Superficie (ha)	Min	Max	Media	Desv. Est.	Superficie (ha)	Min	Max	Media	Desv. Est.	
Minas	-	-	-	-	-	105.74	-0.07	0.56	0.17	0.12	0.17
Reforestación en cepa y/o subsoleo	5.66	0.36	0.52	0.44	0.05	5.66	0.43	0.65	0.55	0.05	0.11
Reforestación en terraza	112.28	0.05	0.50	0.30	0.14	112.28	-0.04	0.69	0.45	0.13	0.15
Reforestación en terraza + zanja trinchera	140.29	0.03	0.46	0.19	0.09	140.29	0.10	0.58	0.32	0.08	0.12
Reforestación en zanja trinchera	67.04	0.06	0.28	0.13	0.04	67.04	0.02	0.58	0.27	0.08	0.14
Urbano	112.35	0.07	0.25	0.15	0.04	378.26	-0.08	0.68	0.28	0.13	0.13
Total general	437.62					809.27					

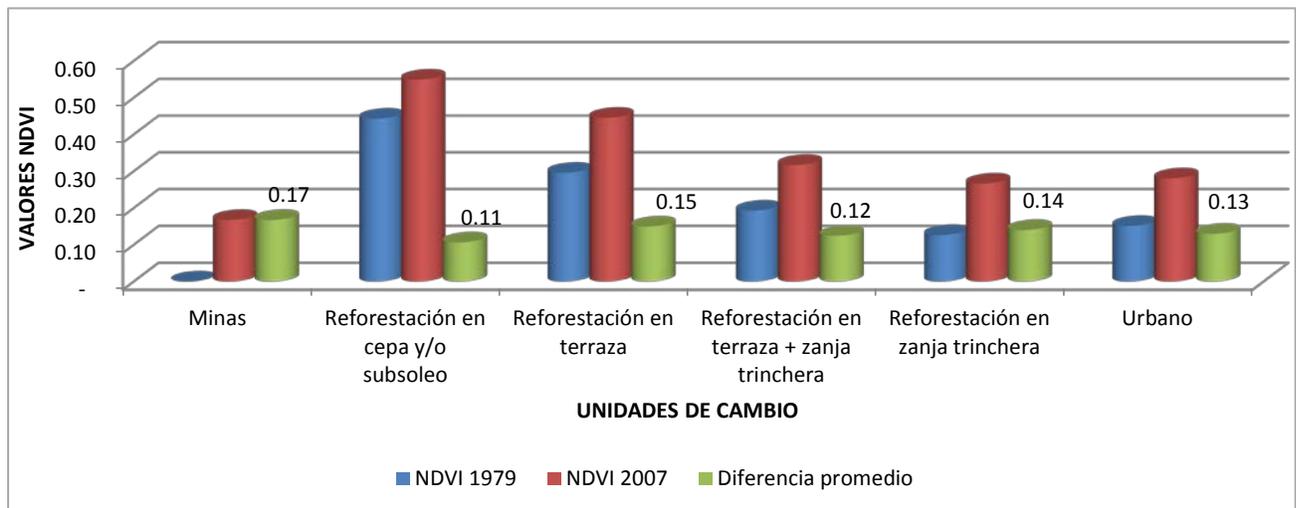


Figura 32. Valores NDVI para unidades de cambio de 1974 a 2012 y su diferencia.

Para zonas de minas en 2007 se obtuvo un amplio rango de variación de NDVI (mayor de 73% de coeficiente de variación) con un valor medio de 0.17 que no se pudo comparar con los valores del NDVI del 1979 porque las minas no existían; con fines de comparación, los polígonos de las minas del 2007 se transfirieron en la imagen de 1979 y se obtuvo que los valores de NDVI tuvieron un coeficiente de variación de 41% y un valor medio de 0.19, puesto que en ese entonces estaba ocupado por zonas degradadas y agrícolas. Esto indica que hubo una disminución del 11% en el valor del NDVI asociado a una disminución en la vegetación existente y es de esperarse que las zonas de minas tendrán un efecto negativo en los servicios

ambientales hidrológicos, ya que afectaran los volúmenes de agua almacenados y los escurridos (Cuadro 21 y Figura 32).

Las zonas reforestadas con diferentes tratamientos de manejo de los suelos (subsoleo, terrazas y terrazas + zanjas) tuvieron valores promedio de NDVI en 2007 mayores que los reportados en los polígonos sin obras del 1979, con incrementos de más de 0.11. Esto indica que aumentó la reflectancia, producto del aumento de cobertura de la vegetación existente, asociado a la reforestación realizada. Esto confirma que existió un impacto positivo de los trabajos de reforestación sobre la protección del suelo contra los procesos erosivos y la reducción de los coeficientes de escurrimiento, que son parte de los servicios hidrológicos ambientales como se verá en el análisis hidrológico que se realizará posteriormente (Cuadro 21 y Figura 32).

Finalmente, la variación de los valores de NDVI en las zonas urbanas para antes y después de los trabajos de reforestación muestran valores contrastantes, ya que para 1979 los valores de NDVI fluctuaron de 0.07 a 0.25 con valor medio de 0.15, situación que indica un coeficiente de variación de 26 % y que refleja que la zona era urbana-rural con techos de teja y traspacios con agricultura y frutales y zonas agrícolas, en contraste en el 2007 el NDVI tuvo un valor de NDVI medio de 0.28, mayor que el de 1979, y un coeficiente de variación del 46 %, que indica una alta variedad de cubiertas reflejantes que no existían anteriormente (Cuadro 21 y Figura 32).

La utilización de las imágenes de satélite con sus bandas 3 y 4 de diferentes años y de fechas similares permite obtener valores de reflectancias de los cuales se puede calcular su estadística descriptiva para comparar los cambios en los índices de vegetación (NDVI) que se presentan a través del tiempo y que son indicadores de los cambios en cobertura vegetal y la eficiencia de las actividades de reforestación.

5.4. IMPACTO DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA Y LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Las variables hidrológicas analizadas en este estudio fueron la precipitación, el escurrimiento medio, el coeficiente de escurrimiento, el escurrimiento máximo y la degradación específica para el periodo de 1950 a 1974 y de 1975 a 2000, considerados como antes y después de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua respectivamente (Cuadro 22).

Cuadro 22. Precipitación y escurrimiento superficial de la Cuenca del Río Chapingo antes y después de obras.

Año	PP (mm)	Esc medio (mm)	Coef. Ecurr.	Gasto máx. (m ³ /s)	Degradación específica (t/ha·año)
1950		82.4		21.8	
1951		32.6		22.4	
1952	773.5	27.5	0.04	22.8	
1953		6.5		12.0	
1954	778.4	46.0	0.06	12.9	
1955	707.5	82.4	0.12	28.6	
1956	639.5	90.7	0.14	24.5	
1957	390.7	22.9	0.06	14.5	
1958	858.0	165.3	0.19	63.3	
1959	1,090.8	112.2	0.10	22.3	
1960	568.1	59.5	0.10	20.5	
1961	558.5	74.8	0.13	48.7	26.09
1962	515.9	63.4	0.12	23.8	26.91
1963	661.7	106.9	0.16	25.1	31.90
1964	655.1	60.6	0.09	30.8	17.00
1965	558.1	113.8	0.20	33.5	
1966	641.5	118.8	0.19	42.5	27.53
1967	639.6	77.8	0.12	19.5	25.76
1968	716.6	136.8	0.19	42.6	61.60
1969	597.7	47.3	0.08	11.3	5.75
1970	574.7	53.4	0.09	13.3	13.85
1971	545.3	29.0	0.05	12.8	6.36
1972	520.1	66.7	0.13	22.5	26.47
1973	660.8	67.2	0.10	14.9	14.95
1974	732.1	58.0	0.08	21.4	
Estadística descriptiva ANTES					
Mínimo	390.70	6.54	0.04	11.33	5.75
Máximo	1,090.8	165.34	0.20	63.30	61.60
Media	653.83	72.10	0.12	25.13	23.68
Desv. Est.	142.93	37.98	0.05	12.69	14.73
Coef. Var.	21.86	52.67	41.35	50.49	62.21
Sesgo	-	-	-	1.49	

Año	PP (mm)	Esc medio (mm)	Coef. Ecurr.	Gasto máx. (m ³ /s)	Degradación específica (t/ha·año)
1975	607.9	37.3	0.06	7.3	3.20
1976	686.8	45.4	0.07	7.9	1.98
1977	523.6	27.6	0.05	3.4	
1978	720.4	54.3	0.08	14.4	3.47
1979	672.8	52.1	0.08	7.6	1.65
1980	548.8	37.7	0.07	2.7	0.37
1981	748.2	46.7	0.06	3.7	0.72
1982	381.4	16.0	0.04	1.2	0.36
1983	515.7	16.7	0.03	5.2	0.07
1984	670.8	52.3	0.08	2.8	
1985	619.1	3.7	0.01	6.2	
1986	488.6	45.1	0.09	1.2	
1987	576.9	62.5	0.11	1.5	
1988	533.9	55.0	0.10	1.1	1.09
1989	476.2	36.6	0.08	1.2	0.40
1990	868.0	2.1	0.00	2.1	0.15
1991	659.7	44.5	0.07	3.2	
1992	774.0	8.6	0.01	2.1	
1993	541.3	60.2	0.11	1.8	
1994	576.5	69.4	0.12	2.2	
1995	561.6	75.0	0.13	1.5	
1996	524.2	103.5	0.20	3.3	
1997	529.0	65.6	0.12	1.9	
1998	661.7	83.3	0.13	2.8	
1999	530.1	7.7	0.01	2.3	
2000	628.5	36.0	0.06	1.0	
Estadística descriptiva DESPUÉS					
Mínimo	381.40	2.05	0.00	1.00	0.07
Máximo	868.00	103.51	0.20	14.40	3.47
Media	600.99	44.02	0.08	3.52	1.22
Desv. Est.	106.23	25.37	0.05	3.04	1.21
Coef. Var.	17.68	57.64	59.69	86.13	98.89
Sesgo	-	-	-	2.18	

5.4.1. Análisis de la variación de la precipitación y escurrimiento medio en ambos periodos

La precipitación como variable aleatoria mostró los menores coeficientes de variación y un comportamiento similar en sus estadísticos para ambos periodos, lo cual contrasta con la alta variabilidad de los coeficientes de variación de los escurrimientos medios, máximos y los coeficientes de escurrimiento (sus valores máximos y mínimos y desviaciones estándar) (Cuadro 22 y Figura 33). Se puede apreciar que el

comportamiento de la precipitación es muy similar en ambos periodos y que después de obras se presenta una ligera disminución en la precipitación y un menor coeficiente de variación, que indica que la precipitación en dicho periodo es más homogénea que antes de obras, además de que el coeficiente de variación fue menos de 18%.

La variación de la precipitación y los escurrimientos anuales para antes y después de las obras CONSA, muestran que existe una reducción de los valores promedio de ambas variables; en el caso de la precipitación existe una disminución promedio de 52.84 mm, de 653.83 a 600.99 mm. En contraste, el escurrimiento medio disminuyó después de las obras, de 72.1 mm a 44.02 mm, lo que indica que hubo una reducción promedio de 28.08 mm, mostrando el efecto de las obras para reducir el escurrimiento (Figura 33).

La variación del escurrimiento medio antes de obras va de 165.34 a 6.54 mm, mientras que después de obras va de 103.51 a 2.05 mm. De lo anterior, se puede inferir que el escurrimiento promedio anual disminuyó debido a que hubo un aumento en la cobertura vegetal, la intercepción de la precipitación, la infiltración del agua en el suelo, y además de que las presas de control de azolves también contribuyeron al captar escurrimientos e incrementar los volúmenes de agua percolada hacia los acuíferos.

Es importante destacar que el escurrimiento medio para antes y después de las obras muestra un coeficiente de variación alto (más de 50%) y con poca diferencia de la variabilidad temporal de un periodo a otro, que puede asociarse a los cambios en los contenidos de humedad y de la capacidad de infiltración del agua en el suelo como resultado de las prácticas de manejo. En la Figura 33 se puede ver que a principios de los años 70's ya empezaba a haber una reducción en las láminas escurridas, aun cuando la precipitación era similar a la de años anteriores; después de las implementación de las obras, se puede ver que a mediados de los 80's, en 1990 y 1999 prácticamente no hubo escurrimiento.

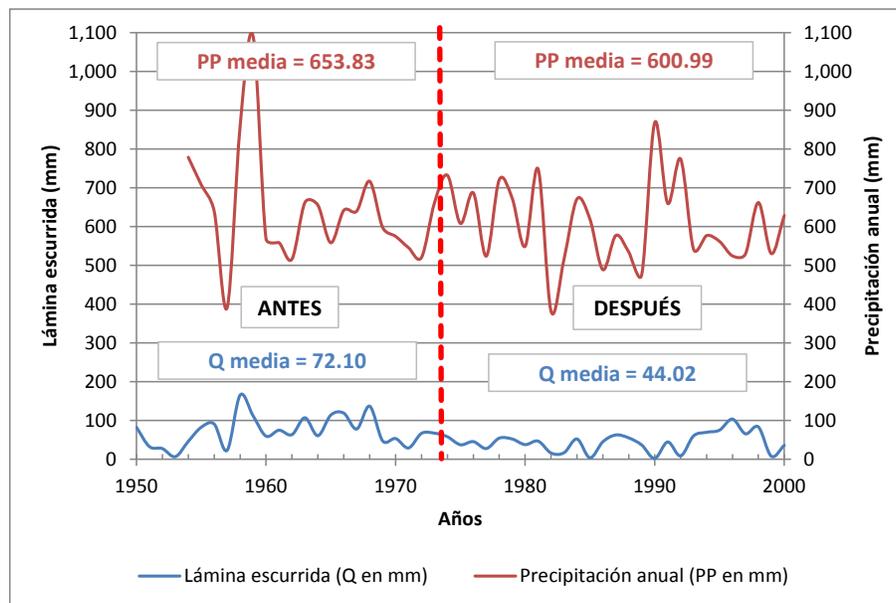


Figura 33. Precipitación y escurrimiento medio anual de la cuenca del Río Chapingo.

La eficiencia de las obras (Mancilla *et al.*, 2009) CONSA para reducir los escurrimientos fue del 61 %, valor que difiere de la disminución del 80% reportado por Cruickshank (2003) para los periodos de 1943-1980 y 1981-1998, lo cual puede explicarse por la diferencia en el periodo de observación analizado en ambos casos y por la información hidrométrica utilizada.

5.4.2. Análisis de la variación de los coeficientes de escurrimiento en ambos periodos

Los coeficientes de escurrimientos para el periodo 1950 - 1974 variaron de 0.2 a 0.04 y para el periodo de 1975 - 2000 fluctuaron de 0.2 a 0.01, con valores promedio de 0.12 y 0.08 respectivamente, lo que indica que los valores promedio no son representativos de la variación temporal de esta variable hidrológica, como lo indican los coeficientes de variación de más del 40% para ambos periodos (Cuadro 22 y Figura 34). El coeficiente de escurrimiento, al ser el cociente de la precipitación anual entre el escurrimiento medio medido, tiene un alto grado de variación que se magnifica cuando esta variable se estima a nivel mensual y diario ya que toma en cuenta el tipo de suelo, las condiciones de humedad, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo como ha sido reportados por algunos autores (Néstor F, *et al.*, 2009 y Canaca *et al.*, 2008).

Los coeficiente de escurrimiento anuales calculados están por abajo del valor de 0.27 reportado a nivel nacional por Fernández y Martínez (1985) pero que se encuentra dentro del rango de variación de los coeficientes de escurrimientos estimados para diferentes regiones hidrológicas del país.

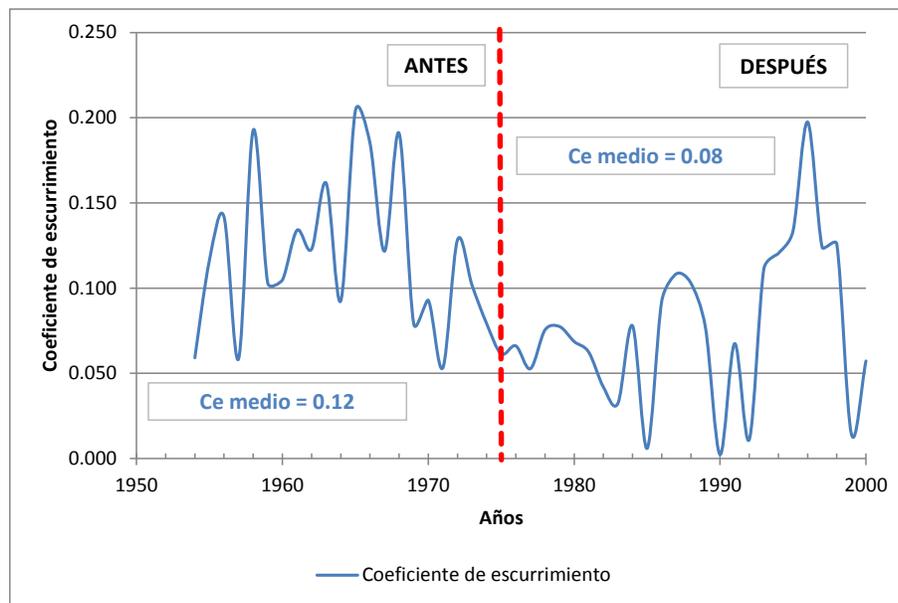


Figura 34. Variación de los coeficientes de escurrimiento anual de la Cuenca del Río Chapingo.

Debe destacarse que antes de las obras el coeficiente de infiltración¹ era de 0.88 y después de las obras se incrementó al 0.92, lo que indica que aumentó la capacidad de infiltración del agua en el suelo y la recarga de acuíferos, asumiendo que no hubo cambios de la evapotranspiración como resultado de las acciones CONSA.

5.4.3. Análisis de la variación de los escurrimientos máximos en ambos periodos

El gasto máximo instantáneo de la cuenca se presentó en 1958 con un valor de 63.3 m³/s. y de no haberse realizado obras de conservación, le correspondería un periodo de retorno de 52 años; el rango de variación fue de 63.3 a 11.33 m³/s en el periodo de 1950 - 1974 y se redujo a un rango que va de 14.4 a 1 m³/s para el periodo 1975 - 2000 (Cuadro 22 y Figura 35).

El escurrimiento máximo registrado fue de 63.3 y 14.40 m³/s para antes y después de obras respectivamente, lo que resultó en una eficiencia del 77.25% de las obras y prácticas CONSA para reducir las avenidas extraordinarias. Esta información no coincide con la eficiencia de las obras de 86.8% reportada por Cruickshank (2003), ya que consideró los gastos máximos de 57.5 y 7.6 m³/s para los periodos de antes y después de las obras (1943-1980 y 1981-1988 respectivamente).

¹ El coeficiente de infiltración se estimó sin considerar el almacenamiento en depresiones o cuerpos de agua que se forman con la infraestructura hidráulica existente y con las acciones realizadas por el hombre, las cuales existen en una baja proporción en la cuenca.

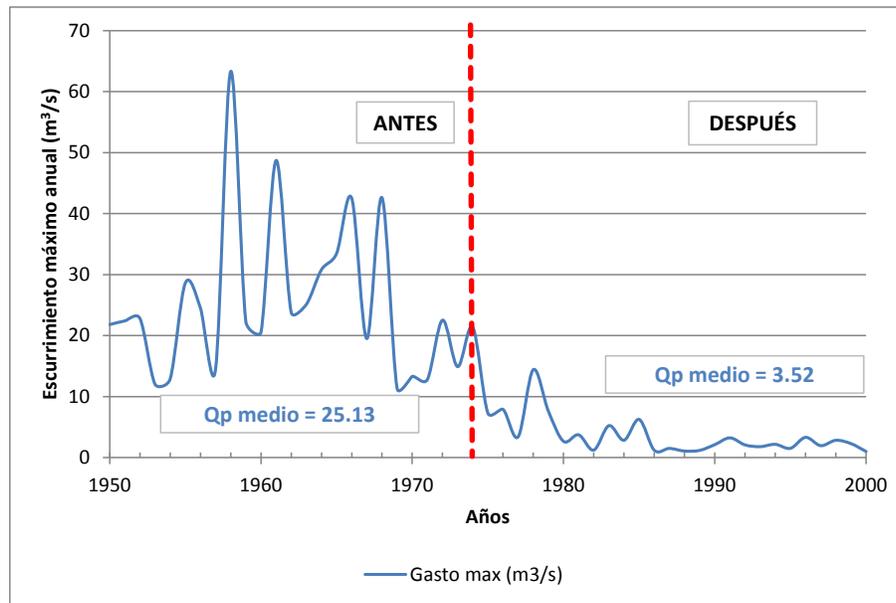


Figura 35. Gasto máximo instantáneo anual de la Cuenca del Río Chapingo.

Los escurrimientos máximos promedio fueron 25.13 y 3.52 m³/s para antes y después de obras respectivamente, teniendo una reducción de 21.61 m³/s, sin embargo, debe señalarse que existe una alta variabilidad en los gastos máximos en los periodos analizados, lo que indica que el valor medio no es representativo de la distribución de los datos, y que para el caso de esta variable hidrológica es recomendable utilizar los valores máximos por periodos ya que son los gastos que podrían en riesgo la infraestructura hidráulica o causar problemas de inundaciones en la parte baja de la cuenca (Cuadro 22 y Figura 35).

De lo anterior se puede inferir que la construcción de las presas de control de azolves, las terrazas y las reforestaciones realizadas redujeron los escurrimientos superficiales, aumentaron la infiltración del agua en el suelo, que apoyó la recarga de los acuíferos. Las presas de control de azolves funcionaron como sistemas de almacenamiento de agua que causaron una reducción en los gastos máximos instantáneos, en la velocidad del flujo y aumentaron el tiempo de concentración del flujo superficial. Por último, es importante destacar que los gastos máximos instantáneos, antes y después de las obras, muestran un coeficiente de variación alto (más de 50%), que se incrementa en el periodo con obras, hasta un 86 %. Este cambio podría estar asociado a variaciones en los contenidos de humedad del suelo y en los patrones de evapotranspiración.

5.4.3.1. Variabilidad temporal de los gastos máximos (m³/s) en la cuenca

Considerando que una de las variables hidrológicas más importantes en el estudio de cuencas es el escurrimiento máximo instantáneo (Qp), se procedió a realizar una comparación con la precipitación

máxima en 24 horas (PPT24h) reportada en el área de influencia de la cuenca del Río Chapingo. Se encontró que la PPT24h tiene un comportamiento aleatorio en los dos periodos y que existe una buena correlación entre los valores altos de PPT24h con los valores altos de Qp anuales. Sin embargo en el segundo periodo es notorio que la PPT24h sigue una media similar, pero con valores altos de PPT24h se tienen valores bajos de Qp. Así, a pesar de seguirse presentando altas precipitaciones en 24 horas, los Qp son bajos y es atribuible al establecimiento de las prácticas y obras de CONSA en la cuenca (Figura 36).

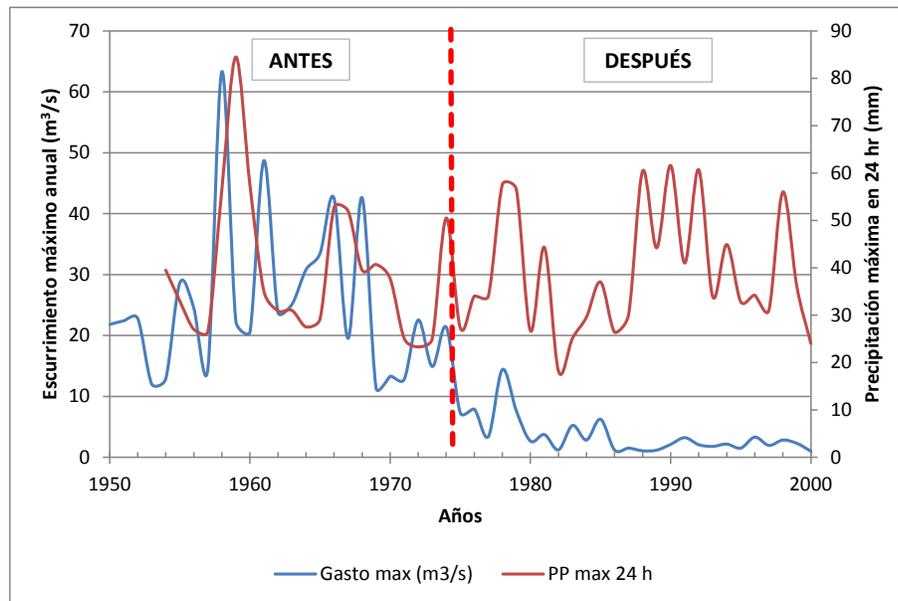


Figura 36. Variación de los escurrimientos máximos y la precipitación máxima en 24 horas para los dos periodos analizados.

Para observar mejor el contraste del efecto de los trabajos de CONSA sobre los escurrimientos máximos instantáneos, los Qp se ordenaron de mayor a menor para cada periodo de análisis, se graficaron y se ajustaron a un modelo potencial con un buen ajuste (coeficientes de determinación R^2 mayores de 0.92). Estas funciones de ajuste (Figura 37) muestran como disminuyen los Qp de un periodo a otro y que existe una tasa de variación anual similar en ambos periodos.

Los parámetros (a) del modelo potencial antes de las obras muestra un valor de $76.35 \text{ m}^3/\text{s}$ mayor al $14.65 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente para después de las obras. Este cambio sugiere que si no se hubieran realizado las obras los escurrimientos máximos instantáneos pondrían en riesgo la infraestructura hidráulica y seguirían causando el crecimiento del sistema de drenaje de la cuenca, especialmente el crecimiento de las cárcavas en los terrenos tepetatosos o degradados donde afloraba el material parental existía antes de las obras realizadas.

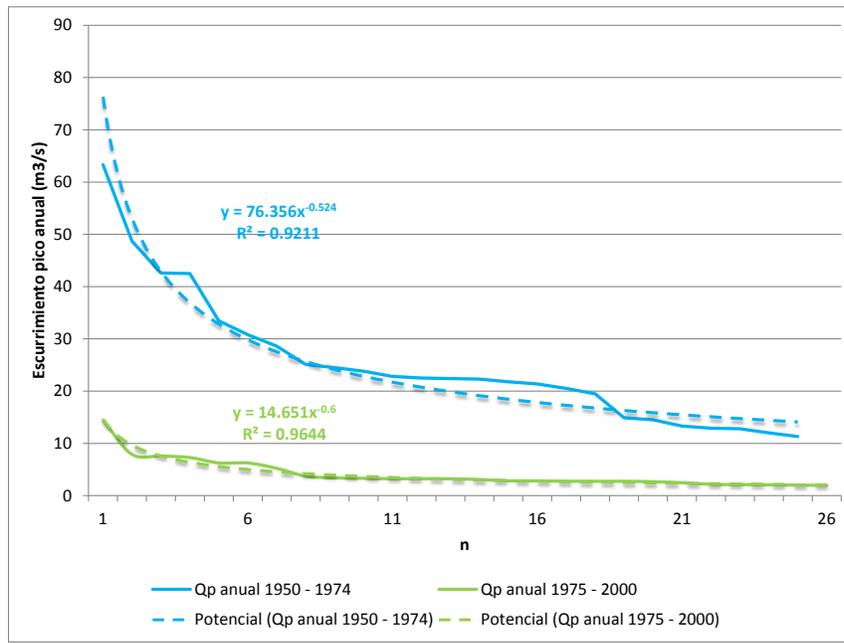


Figura 37. Variación de los escurrimientos máximos para los dos periodos analizados

Finalmente, para predecir los Qp para diferentes periodos de retorno se utilizó el modelo probabilístico tipo Log-Pearson III con los datos observados de los escurrimientos máximos para cada periodo de análisis, encontrando un alto contrastaste entre las predicciones ya que los Qp estimados para cada periodo de retorno para antes las obras CONSA son mayores que los predichos para después de las obras (Cuadro 23 y Figura 38).

Cuadro 23. Variación del escurrimiento máximo en los dos periodos.

Periodo de retorno (años)	Antes	Después
2	21.18	2.33
5	32.15	4.49
10	41.65	6.96
25	56.69	11.99
50	70.48	17.79
100	86.78	26.15
200	106.11	38.16

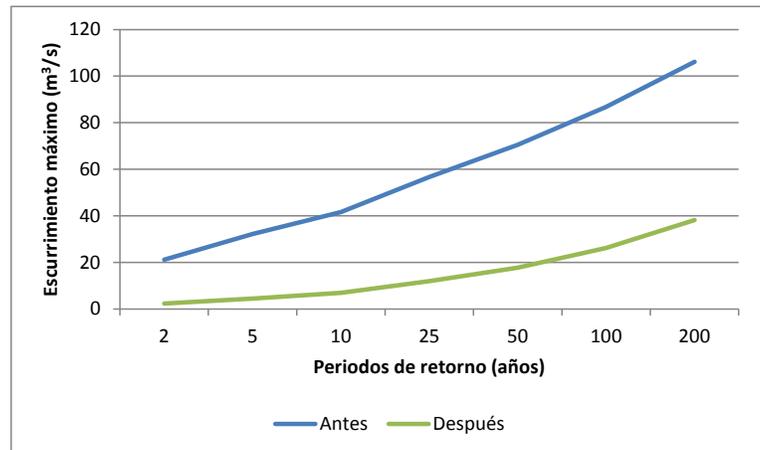


Figura 38. Variación del escurrimiento máximo en los dos periodos.

Esta información es útil para estimaciones futuras de escurrimientos máximos instantáneos donde se quiera construir obras de infraestructura hidráulica, puesto que las obras de excedencia debieran diseñarse con dimensiones menores ya que las avenidas de diseño serán menores por efecto de las obras realizadas.

5.4.4. Análisis de la variación de la degradación específica de la cuenca en ambos periodos

La variación de la producción de sedimentos antes de obras variaba de cerca de 11 mil a más de 118 mil toneladas con un promedio de más de 45 mil toneladas, con una producción total de 546,606 toneladas de sedimentos en 12 años. Esto contrasta con los valores después de las obras realizadas, de 6,678 a 126 toneladas con un valor promedio de 2,353 toneladas y una producción total de sedimentos de 25,884 toneladas en 11 años (Cuadro 24).

Cuadro 24. Producción de sedimentos de la Cuenca del Río Chapingo para antes y después de las obras.

ANTES		DESPUES	
Año	Producción de sedimentos (t)	Año	Producción de sedimentos (t)
1961	50,184	1975	6,156
1962	51,768	1976	3,816
1963	61,362	1978	6,678
1964	32,706	1979	3,168
1966	52,956	1980	720
1967	49,554	1981	1,386
1968	118,476	1982	684
1969	11,052	1983	126
1970	26,640	1988	2,088
1971	12,240	1989	774
1972	50,922	1990	288
1973	28,746		
Mínimo	11,052	Mínimo	126
Máximo	118,476	Máximo	6,678
Media	45,551	Media	2,353
Total	546,606	Total	25,884

La producción de sedimentos que llegan al Ex Lago de Texcoco se redujo en 43,198 toneladas en promedio, lo que representa un 95%, y en total se redujo en 520,722 en los periodos analizados lo que indica la eficiencia de las obras y prácticas para reducir la cantidad de azolves que llegan al Ex Lago de Texcoco.

Para analizar los cambios en la degradación de los suelos por erosión, se calculó la degradación específica de los suelos (producción de sedimentos anuales entre la superficie de la cuenca) encontrando que varió de 61.6 a 5.75 t/ha-año antes de las obras, lo que indica un alto grado de degradación comparado con las tasas de erosión estimadas en terrenos degradados con cárcavas de 401 y 267 t/ha-año reportados por Oropeza *et al.* (1990) para la cuenca del Río Texcoco. Después de obras la degradación específica se redujo de 3.47 a 0.07 t/ha-año, lo que indica el impacto de la reforestación, las terrazas y las presas de control de azolves para reducir la degradación del suelo (Cuadro 25).

Cuadro 25. Degradación de los suelos de la Cuenca del Río Chapingo para antes y después de las obras.

ANTES		DESPUÉS	
Año	Degradación específica (t/ha)	Año	Degradación específica (t/ha)
1961	26.09	1975	3.20
1962	26.91	1976	1.98
1963	31.90	1978	3.47
1964	17.00	1979	1.65
1966	27.53	1980	0.37
1967	25.76	1981	0.72
1968	61.60	1982	0.36
1969	5.75	1983	0.07
1970	13.85	1988	1.09
1971	6.36	1989	0.40
1972	26.47	1990	0.15
1973	14.95		
Mínimo	5.75	Mínimo	0.07
Máximo	61.60	Máximo	3.47
Media	23.68	Media	1.22
Desv. Est.	14.73	Desv. Est.	1.21
Coef. de Var.	62.21	Coef. de Var.	98.89

La degradación específica de los suelos (DE) para los dos períodos muestra un comportamiento aleatorio que es una función de la variabilidad temporal y de intensidad de la precipitación anual, sin embargo es notorio que antes de las obras, la DE tenía una tendencia a la baja aunque era notoria una variación cíclica. Después de las obras la DE se redujo considerablemente, como ya se había señalado, pero también muestra su variación aleatoria y cíclica a lo largo del tiempo (Cuadro 25 y Figura 39).

La degradación media de la cuenca estimada antes de las obras fue de 23 t/ha-año, la cual es mayor a la erosión de los terrenos tepetatosos (16 t/ha/año) reportada por Martínez *et al.* (1987) y menor que la reportada por Oropeza *et al.* (1990), de más de 400 t/ha/año. Con obras de conservación, la degradación media de los suelos de la cuenca disminuyó a 1.22 t/ha-año en promedio, que es menor que la degradación de los suelos a nivel nacional de 2.7 t/ha/año reportada por Fernández y Martínez (1985) y menor que la erosión de los terrenos cultivados en la zona con tasas de erosión de menos de 5 t/ha-año reportados por Martínez *et al.* (1987).

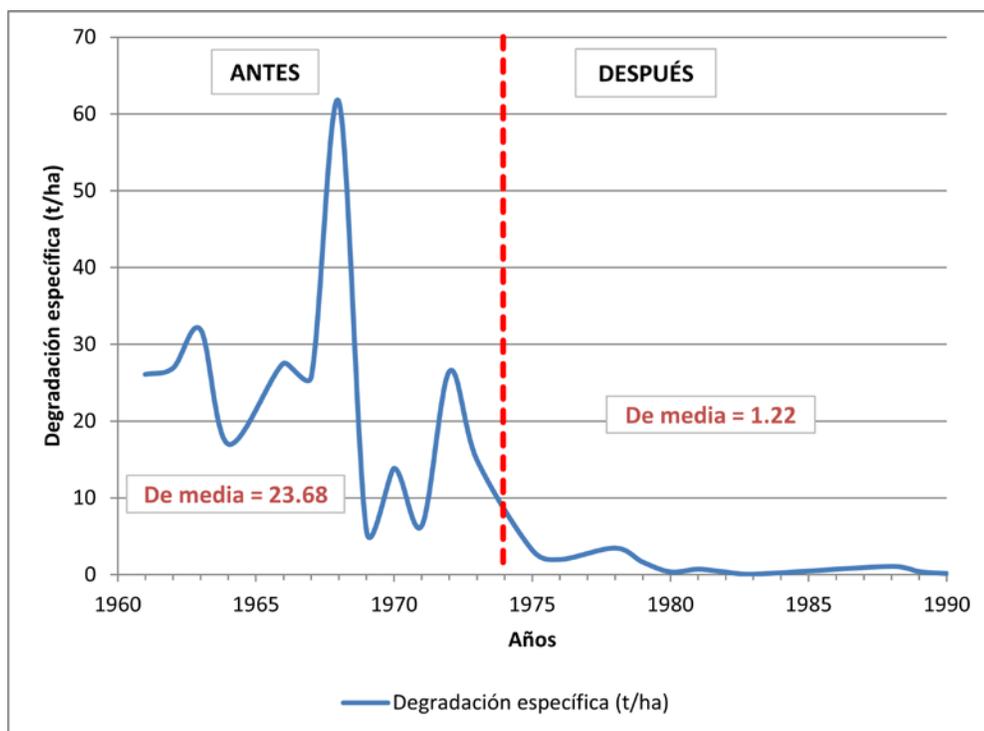


Figura 39. Variación de la degradación específica de los suelos en los dos periodos

5.5. INDICADORES DE IMPACTO DE LOS TRABAJOS DE CONSA EN LA CUENCA DEL RIO CHAPINGO

Los indicadores de impacto fueron definidos como las diferencias entre las variables hidrológicas analizadas (precipitación, escurrimiento medio, coeficiente de escurrimiento y de infiltración, escurrimiento máximo, producción de sedimentos y degradación específica), las eficiencias atribuibles a las acciones realizadas para reducir las variables hidrológicas, los cambios del uso del suelo y la vegetación y sus posibles impactos en la reducción de la degradación de los suelos y el incremento en la capacidad de infiltración del agua en el suelo.

5.5.1. Cambios en las variables hidrológicas producto del manejo de la cuenca

Se analizaron las variables hidrológicas obtenidas para antes y después de obras CONSA para determinar si las varianzas eran iguales o diferentes para posteriormente definir si había diferencias estadísticas entre las medias de las poblaciones; de igual manera, se analizaron las diferencias de los estadísticos básicos de las variables hidrológicas y las eficiencias de las obras para explicar los cambios por el manejo.

5.5.1.1. Comportamiento estadístico de las variables hidrológicas producto del manejo

Para analizar el comportamiento estadístico de las variables hidrológicas en los dos periodos de estudio se realizó una Prueba de F para comparar dos varianzas de población, encontrando que las varianzas de los datos hidrológicos (precipitación, coeficiente de escurrimiento y coeficiente de infiltración) para los dos

períodos no presentan diferencias estadísticamente significativas, por lo que entonces se procedió a realizar una prueba t para comparar las medias de dos poblaciones con varianzas iguales (Cuadro 26).

Cuadro 26. Prueba de F y t de para precipitación y coeficientes de escurrimiento e infiltración antes y después de obras.

Prueba F para varianzas de dos muestras	PP (mm)	Coefficiente de escurrimiento	Coefficiente de infiltración
F	1.810332954	1.133321566	1.133321566
P(F<=f) una cola	0.078312942	0.37889819	0.37889819
Valor crítico para F (una cola)	1.995322078	1.995322078	1.995322078
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales			
Estadístico t	1.466995109	3.013690122	-3.013690122
P(T<=t) una cola	0.074590698	0.002094081	0.002094081
Valor crítico de t (una cola)	1.678660414	1.678660414	1.678660414
P(T<=t) dos colas	0.149181396	0.004188162	0.004188162
Valor crítico de t (dos colas)	2.012895599	2.012895599	2.012895599
Valor t de las tablas	1.95	1.95	1.95

La prueba de F para la precipitación de ambos periodos reporta un valor de 1.81 que es menor el valor crítico de F (1.99), además la probabilidad de (F<=f) una cola es de 0.07 y es mayor que 0.05, lo que indica que no existen diferencias significativas entre las varianzas de la precipitación en los dos periodos, por lo que la prueba t para varianzas iguales muestra que el valor de t de las tablas (1.95) es mayor que el estadístico t (1.1) corroborando que no existen diferencias significativas en la precipitación de los dos periodos (Cuadro 26). Esto indica que la precipitación, al ser estadísticamente igual en ambos periodos, no afecta los cambios identificados en las otras variables hidrológicas.

La prueba de F para los coeficientes de escurrimiento e infiltración reportan valores de 1.13, que son menores a los valores críticos para F (una cola) de 1.99 y que la probabilidad de (F<=f) de una cola es de 0.37, mayor que 0.05, por lo que se concluye que no existe diferencias significativas entre las varianzas de ambos coeficientes. La prueba de t de Student para varianzas iguales del coeficiente de escurrimiento muestra que el t de tablas (1.95) es menor que el estadístico t por lo que se concluye que no existen diferencias significativas en ambos periodos y que el coeficiente de infiltración no muestran diferencias significativas en los periodos. Los datos sugieren que a pesar de considerar sólo valores anuales existen diferencias en estos coeficientes que están asociados directamente a las prácticas de manejo realizadas.

Los escurrimientos medios y máximos y la degradación específica para los dos periodos muestran valores de F que son mayores que el valor crítico de F, y las probabilidades (F<=f) una cola son menores que el valor de

0.05, lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas en la varianza de las dos poblaciones de datos (los dos periodos de estudio). Lo anterior se confirma con la prueba de t para varianzas diferentes, que muestra que el estadístico t de las tres variables hidrológicas (3.09, 8.28 y 5.26 respectivamente) son mayores que el valor de t de las tablas (1.95). Estos valores corroboran que existen diferencias estadísticamente significativas entre la medias de los escurrimientos medios, máximos y degradación específica de los periodos de antes y después de las obras de CONSA (Cuadro 27).

Cuadro 27. Pruebas de F y t de Student para el escurrimiento medio, máximo y degradación específica antes y después de obras.

Prueba F para varianzas de dos muestras	Q medio (mm)	Qp (m ³ /s)	Degradación específica (t/ha/año)
F	2.240135087	17.473512	148.293295
P(F<=f) una cola	0.02512918	0.000000000244562	0.000000001481
Valor crítico para F (una cola)	1.964305634	1.964306	2.942957268
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales			
Estadístico t	3.091760506	8.289178	5.261461902
P(T<=t) una cola	0.001763841	0.00000000033723	0.000133907
Valor crítico de t (una cola)	1.681952357	1.703288	1.795884819
P(T<=t) dos colas	0.003527682	0.00000000067446	0.000267815
Valor crítico de t (dos colas)	2.018081703	2.051831	2.20098516
Valor t de las tablas	1.95	1.95	1.95

Las pruebas de F y de t de Student muestran estadísticamente, con un nivel de confianza del 95%, que las obras han influido en los escurrimientos medio y máximo y en la degradación específica, que son consideradas como los indicadores de los servicios hidrológicos ambientales. Se concluye que las acciones de conservación del suelo impactan positivamente en el ambiente ya que reducen los escurrimientos, aumentan la infiltración y reducen la producción de sedimentos que llegan al Ex Lago de Texcoco.

5.5.1.2. Variación de los procesos hidrológicos producto del manejo

La estadística descriptiva de la precipitación para ambos periodos muestra que hubo poco cambio en los valores mínimos, un 20% de cambio en la precipitación máxima anual (que pudo incidir en los escurrimientos), y no hubo variación estadísticamente significativa en sus valores promedio, aunado a que el coeficiente de variación no muestra una diferencia significativa de un periodo al otro (Cuadro 27).

Cuadro 28. Estadísticos de precipitación con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO (mm)	% EFICIENCIA
	Prec (mm)			
Mínimo	390.70	381.40	9.30	2.38
Máximo	1,090.80	868.00	222.80	20.43
Media	653.83	600.99	52.84	8.08
Desv. Est.	142.93	106.23	36.7	25.68
Coef. de Var. %	21.86	17.68	4.18	19.14

Los escurrimientos anuales mínimos, máximos y medios muestran cambios que indican una eficiencia positiva con reducción en sus valores, es decir, que fueron mayores antes de las obras; después de las obras sólo se reporta un incremento en el coeficientes de escurrimiento (Cuadro 29). Esta da constancia del servicio hidrológico ambiental para reducir los escurrimientos que propiciaron las obras realizadas.

Cuadro 29. Estadísticos de escurrimientos superficiales con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO	% EFICIENCIA
	Q (mm)			
Mínimo	6.54	2.05	4.48	68.59
Máximo	165.34	103.51	61.82	37.39
Media	72.10	44.02	28.07	38.94
Desv. Est.	37.98	25.37	12.60	33.19
Coef. de Var. %	52.67	57.64	-4.96	-9.42

Los coeficientes de escurrimientos muestran que hubo un decremento en sus valores, con cambios positivos en cada uno de sus estadísticos; esto indica que a medida que el valor es más pequeño se tendrá menos escurrimiento. Esta reducción de los coeficientes es muestra de la eficiencia de las obras para reducir los escurrimientos (Cuadro 30). En contraste, los coeficientes de infiltración estimados muestran cambios negativos en todos sus estadísticos que indican que hubo incrementos en la infiltración del agua en el suelo y que es un indicador del impacto que las obras realizadas tienen en la recarga del acuífero (Cuadro 31).

Cuadro 30. Estadísticos de los coeficientes de escurrimientos con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO	% EFICIENCIA
	CE			
Mínimo	0.036	0.002	0.033	93.34
Máximo	0.204	0.197	0.006	3.15
Media	0.116	0.076	0.041	34.93
Desv. Est.	0.048	0.045	0.003	6.07
Coef. de Var. %	41.349	59.686	-18.337	-44.35

Cuadro 31. Estadísticos de coeficiente de infiltración con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO	% EFICIENCIA
	CI			
Mínimo	0.796	0.803	-0.006	0.81
Máximo	0.964	0.998	-0.033	-3.44
Media	0.884	0.924	-0.040	-4.51
Desv. Est.	0.048	0.046	0.002	4.46
Coef. de Var. %	5.442	4.974	0.467	8.59

Los estadísticos de los escurrimientos máximos instantáneos tuvieron reducciones en los valores mínimos, máximos y medios y reportaron eficiencias mayores del 77 %, lo que indica, en primera instancia, que las presas de control de azolves, las terrazas y las reforestaciones propiciaron la reducción de los riesgos de avenidas extraordinarias que pudieran afectar la parte baja de la cuenca (Cuadro 32).

Cuadro 32. Estadísticos de escurrimientos máximos instantáneos con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO	% EFICIENCIA
	Qp (m3/s)			
Mínimo	11.33	1.00	10.33	91.21
Máximo	63.30	14.40	48.90	77.25
Media	25.13	3.52	21.61	85.98
Desv. Est.	12.69	3.04	9.65	76.08
Coef. de Var. %	50.49	86.13	-35.64	-70.60

Destaca que el coeficiente de variación tuvo un incremento en el periodo después de las obras y que es indicador de la reducción de los gastos pico más contrastantes que se presentaron con las acciones realizadas.

La degradación específica de los suelos, reconocida como la cantidad de sedimentos que salen de la cuenca, muestran que se tuvieron eficiencias de reducción de más del 77 % s para los valores mínimos, máximo y

medios. Estas eficiencias son un indicador de la bondad de las acciones para reducir la producción de sedimentos en la cuenca, como era el objetivo de la Comisión del Lago de Texcoco (Cuadro 33).

Cuadro 33. Estadísticos de la degradación específica con sus cambios para antes y después de las obras.

Estadístico	ANTES	DESPUES	CAMBIO	% EFICIENCIA
	De (t/ha)			
Mínimo	5.75	0.07	5.68	98.86
Máximo	61.60	3.47	58.12	94.36
Media	23.68	1.22	22.46	94.83
Desv. Est.	14.73	1.21	13.52	91.79
Coef. de Var. %	62.21	98.89	-36.68	-58.96

5.5.1.3. Cambios de las variables hidrológicas en ambos periodos producto del manejo

Para analizar la variación temporal de las variables hidrológicas, se consideró que éstas tienen un comportamiento aleatorio, por lo que cualquier modelo de predicción tendría el componente de aleatoriedad. A pesar de esto, para cada periodo de análisis se probaron modelos de regresión lineal ($Y = a + b X$) donde **Y** = variable hidrológica de interés, **X** = tiempo en años, **a** es la ordenada al origen y **b** es la pendiente (Cuadro 30).

Para el caso de la precipitación, los valores de **b** son negativos que indican una disminución con el tiempo en cada periodo, siendo más drástico del periodo de antes de las obras. El valor de **a** es mayor antes que después de las obras, sin embargo no hay diferencias estadísticas entre las medias de la precipitación como se discutió previamente (Cuadro 34).

El escurrimiento medio anual tuvo una ordenada al origen mayor en el primer periodo y se redujo en el segundo periodo, a pesar que la tasa de cambio anual del escurrimiento fue mayor después de las obras de conservación de suelos; este comportamiento fue similar para el coeficiente de escurrimiento (Cuadro 34).

Cuadro 34. Modelos de regresión lineal para las variables hidrológicas para los dos periodos.

Variable	Modelo Antes	Modelo después
Precipitación (mm)	$P = -5.9207 x + 739.41$	$P = -1.1014 x + 615.86$
Q medio (mm)	$Q_m = 0.6917 x + 63.106$	$Q_m = 0.8639 x + 32.361$
Ce	$Ce = 0.0007 x + 0.106$	$Ce = 0.0018 x + 0.0509$
Q pico (m^3/s)	$Q_p = -0.0925x + 26.333$	$Q_p = -0.2345 x + 6.6902$
DE (t/ha-año)	$DE = -1.226 x + 31.651$	$DE = -0.2902 x + 2.9645$

Los modelos de regresión obtenidos para el escurrimiento pico muestran que el valor de **a** fue mayor en el primer periodo y las diferencias son la reducción de los gastos pico atribuibles a las obras realizadas. La tasa de variación anual (**b**) para cada periodo fue negativa que indica que sin obras de CONSA existió una tendencia a disminuir los gastos picos originada por los aleatorio de las lluvias máximas en 24 horas y las intensidades de la lluvia que se presentan en los eventos extraordinarios. Para el segundo periodo la tasa de cambio **b** es mayor lo que se explica por el efecto amortiguador de las obras (Cuadro 34).

La degradación específica explicada por los modelos de regresión muestran que el valor de **a** fue mayor antes que después de las obras y la reducción es atribuible a las obras dado que no hubo diferencias significativas entre la precipitación media anual en ambos periodos y que no existieron diferencias en la precipitación máxima en 24 horas como se discutió previamente. Las tasas de cambio **b** de los modelos de regresión lineal de cada periodo fueron negativas y se aprecia un mayor valor para antes que después de la obras. Esto siguiere la eficiencia de las obras para disminuir la capacidad de transporte del flujo superficial en las laderas y en las corrientes (Cuadro 34).

5.6. BALANCES DE AGUA PARA ANTES Y DESPUES DE LAS ACCIONES DE CONSERVACIÓN

Con la información disponible se realizó un balance de agua considerando la precipitación y el escurrimiento medio para ambos periodos. La evapotranspiración (ET) se calculó con el método de Thornthwaite y Mather estimando valores de 737 mm y 774 mm para los dos periodos pero que fueron más altos que la misma precipitación, por lo que utilizando la información de temperatura y radiación solar se estimó la evapotranspiración promedio con el modelo SWAT para los dos periodos encontrando un variación de 377 a 469 mm anuales de ET, así que se optó por seleccionar valores de ET de 399.12 y de 468.15 para antes y después de las obras respectivamente, valores asociados a los cambios de la cobertura vegetal propiciados por las prácticas de reforestación y los cambios de uso del suelo realizados (Cuadro 35).

Tomando en cuenta que la magnitud y distribución de la precipitación en el año es la que rige los procesos hidrológicos en las unidades de drenaje, para realizar los balances de agua en la cuenca del Río Chapingo se seleccionaron cuatro años en cada periodo, con precipitaciones similares en magnitud para hacer una comparación pareada de años, antes y después de las obras, para ver los cambios en las variables hidrológicas escurrimiento (Q), evapotranspiración (ET) y Percolación (PER) (Cuadro 35).

Cuadro 35. Balances de agua para algunos años representativos de los dos periodos en la cuenca del Río Chapingo.

Condición	Año	P	Q	ET	Per
Antes	1958	858.00	165.34	399.12	293.54
	1968	716.60	136.75	399.12	180.73
	1963	661.70	106.93	399.12	155.65
	1972	520.10	66.70	399.12	54.28
Después	1990	868.00	2.05	468.15	397.80
	1978	720.40	54.35	468.15	197.90
	1991	659.70	44.50	468.15	216.08
	1999	530.10	7.65	468.15	130.87
Cambios entre años por periodos	1958 vs 1990	10.00	- 163.28	69.03	104.25
	1968 vs 1978	3.80	- 82.41	69.03	17.18
	1963 vs 1991	- 2.00	- 62.42	69.03	60.42
	1972 vs 1999	10.00	- 59.05	69.03	76.59

Los datos pareados de precipitaciones de 1958 y 1990; 1968 y 1978; 1963 y 1991; 1972 y 1999 muestran que la precipitación fue muy similar en los dos años de comparación mostrando cambios de -2 mm a 10 mm, sin dejar de reconocer que existen diferencias en la distribución espacial y temporal y en las magnitudes y duración de los eventos que son definitivos en la definición de los servicios ambientales hidrológicos.

La comparación entre los escurrimientos anuales muestra que existe una reducción en los escurrimientos que varía de 59.05 a 163.28 mm. Esta reducción indica el beneficio hidrológico de las obras y prácticas para reducir los escurrimientos, los cuales son mayores que el valor promedio de Q de 27.75 mm estimados como diferencia de ambos periodos. Al analizar los datos pareados de precipitación de muy altas magnitudes (mayores de 800 mm anuales), se tuvo una reducción en los escurrimientos del 99%; para altas precipitaciones (mayores de 700 mm) la reducción fue de 60%; para precipitaciones medias (más de 600 mm) los cambios fueron del 58% y para precipitaciones bajas los cambios o reducciones en Q fueron de 13%. Esto indica que la magnitud de la precipitación es determinante para definir la eficiencia de las acciones para proveer de los servicios ambientales hidrológicos (Cuadro 35).

La percolación estimada en forma global muestra que hubo un incremento que varió de 17.18 a 104.25 mm y que fue en los años húmedos cuando hubo mayor percolación profunda. Para años húmedos la recarga aumento en un 26%; para años con más de 700 mm, la recarga aumento en más del 8%; para años de precipitación media anual de más de 600 mm la recarga fue de 28% y para años más secos aumento en 59%. Consecuentemente, se aprecia que las eficiencia de las obras para aumentar la recarga de los acuíferos depende de la magnitud de la precipitación y en especial de la variación espacial y temporal en el área de drenaje (Cuadro 35).

Debe tenerse presente que este análisis de variables hidrológicas está basado en la información disponible (hidrométrica y meteorológica) a nivel puntual. Se asume que la información hidrométrica es confiable y que la precipitación obtenida de una sola estación meteorológica representa toda la cuenca. Obviamente esta premisa es difícil de sostener ya que en la zona dominan las precipitaciones convectivas que tienen poca cobertura espacial y en menor proporción las precipitaciones frontales que tienen mayor cobertura espacial, sin embargo, es la estación meteorológica asociada a la cuenca y además no se tienen estaciones que reporten información de la parte media y alta de la cuenca.

Este análisis a nivel de cuenca confirma las evaluaciones de las variables hidrológicas como escurrimientos y producción de sedimentos realizados en lotes de escurrimientos (Figuroa, 1975; CP, 1980; Rodríguez, 1982; Rivas, 1983; Francisco, 2005) y reafirma las evaluaciones de los procesos hidrológicos a nivel de cuencas realizados por Oropeza (1980), Adame y Martínez (1999) y el modelado de procesos hidrológicos por Fernández-Reynoso (2008), Torres (2000) y otros investigadores que han tratado de valorar los procesos hidrológicos. Sin embargo, debe señalarse la necesidad de instrumentar cuencas hidrológicas para obtener datos hidrométricos y de precipitación confiables que permitan obtener parámetros puntuales de los procesos hidrológicos que permitan calibrar los modelos hidrológicos para ser utilizados en la valoración de los servicios ambientales hidrológicos de los programas de manejo de los recursos naturales en el país.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como parte final de esta investigación, y de acuerdo con la metodología utilizada y los resultados analizados y discutidos en este estudio, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

Con la información digital e impresa disponible y las tecnologías actuales para el procesamiento de información geográfica y de bases de datos, se diseñó un sistema automatizado para caracterización morfométrica de cuencas.

Para el análisis del uso de suelo y vegetación multitemporal, es necesario contar con cartografía a una escala que refleje tanto como sea posible la realidad del terreno, complementarla con recorridos de campo y con trabajo de fotointerpretación; esta conjunción permitió identificar los usos de suelo en la cuenca antes y después del programa de recuperación de suelos de la cuenca del Río Chapingo.

Los cambios de los usos del suelo permitieron identificar que existió un aumento en las zonas urbanas, la presencia de minas que antes no existían y la reducción significativa de zonas degradadas por áreas reforestadas y zonas agrícolas.

La información colectada sobre las acciones de reforestación y control de azolves permitió delimitar las unidades de cambio con áreas reforestadas con diferentes prácticas de manejo del suelo, así como el crecimiento de las zonas urbanas y de minas identificadas en el periodo de estudio.

Para los diferentes usos del suelo, se tuvo un incremento en los valores medios de NDVI para después de obras con respecto a antes de obras, que indica que existió un incremento en la reflectancia por el aumento de la cubierta vegetal, producto de las acciones de reforestación y manejo del suelo realizados. Destacan los incrementos en los valores medios de NDVI en las unidades de cambio, especialmente las zonas reforestadas y urbanas y la reducción del valor de NDVI en las zonas de minas.

Las unidades de cambio representan una paradoja porque, mientras que en algunas zonas se implementó un programa de conservación y recuperación por parte del gobierno federal que tuvo un efecto positivo en los servicios ambientales hidrológicos, en otras zonas las actividades antropogénicas han propiciado un desordenado crecimiento urbano y una reconversión de zonas agrícolas y reforestadas en minas de extracción de arena que tienen un efecto negativo en dichos servicios.

El tratamiento informático-estadístico de la información hidrométrica de 1950 a 2000 permitió cuantificar la disminución de la degradación específica de los suelos de la cuenca y la eficiencia de las obras CONSA para reducir escurrimientos superficiales y gastos máximos instantáneos, obteniendo así que los servicios

ambientales hidrológicos se vieron impactados positivamente por las acciones implementadas por el Plan Lago de Texcoco en los años 70's y 80's.

Los datos hidrométricos del año 2001 a la fecha no se utilizaron porque se consideraron inconsistentes y es posible que reflejen el impacto de las obras de infraestructura urbana, o en su defecto, problemas en la estimación de los escurrimientos medios obtenidos en la estación hidrométrica.

Finalmente, se debe tomar en cuenta que las acciones de conservación de suelo y agua a escala de cuenca tuvieron impacto y relevancia en la recuperación de suelos y en los servicios hidrológicos, sin embargo, la población sólo valora las acciones de recuperación de los suelos para la producción de cultivos y el establecimientos de especies forestales para su aprovechamiento, y no para proveer los servicios ambientales hidrológicos, razón por la cual sólo se apropian de las acciones realizadas que inciden en su beneficio personal.

Recomendaciones

La utilización de sensores remotos y de índices de vegetación es una herramienta recomendable para un análisis multitemporal del crecimiento de la vegetación en las zonas reforestadas con diferentes especies, densidades de plantación y sitios de plantación.

Diseñar y ejecutar un programa de mantenimiento de obras mecánicas, de manejo de las plantaciones y de ordenamiento territorial para ordenar el crecimiento urbano y de las zonas de minas, que si bien es cierto es una actividad extractiva productiva, debe regularse para no seguir destruyendo las acciones de reforestación realizadas.

La información hidrométrica confiable es necesaria para valorar los servicios ambientales hidrológicos, por lo que es recomendable rehabilitar la estación hidrométrica para obtener información de calidad que permita no sólo el monitoreo de las variables hidrológicas, sino la calibración y validación de modelos hidrológicos que se han desarrollado para valorar las mejores prácticas de manejo (BMP) en diferentes partes del mundo.

7. FUENTES CONSULTADAS

- Adame Martínez, S., 1991. Cartografía y evaluación de las plantaciones forestales en la parte oriente de la cuenca de México. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Adame Martínez, S. y Gómez Guerrero, A., 1999. Cartografía y evaluación de las reforestaciones en la zona oriente de la cuenca de México. *Revista de ciencias forestales* 14-15 (1-2): 19-26.
- Adame Martínez, S. y Martínez Menes, M. R., 1999. Efecto del manejo integral de la cuenca del Río Texcoco, sobre la producción de agua y sedimentos. *Investigaciones geográficas (Mx)* 39: 53-67.
- Adame Martínez, S., Oropeza Mota, J. L., Martínez Menes, M. R., Santoyo Cortés, V. H. y Ramírez Guzmán, M. E., 2000. Evaluación económica del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del Río Texcoco. *Agrociencia* 34: 509-521.
- Avila Foucat, V. S., 2007. Los modelos de economía ecológica: una herramienta metodológica para el estudio de los servicios ambientales. *Gaceta ecológica* 84-85:85-91.
- Balvanera, P. y Cotler, H., 2007a. Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas. *Gaceta ecológica* 84-85: 117-123.
- Balvanera, P. y Cotler, H., 2007b. Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica* 84-85: 8-15.
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>. (Consultada el 23 de agosto de 2011).
- Bayard, B., Jolly, C. M. and Shannon, D. A., 2006. The adoption and management of soil conservation practices in Haiti: the case of rock walls. *Agricultural Economics Review* 7 (2): 28-39.
- Borah, D. K. & Bera, M., 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE* 46: 1553-1566.
- Briseño de la Hoz, V. M., Obregón P, A. y Minjárez C, L.C., 1982. Origen, caracterización y situación actual del Ex-lago de Texcoco. Departamento de Investigación Agropecuaria. Comisión del Lago de Texcoco. México.
- Bühlmann E., Wolfgramm B., Maselli D., Hurni H., Sanginov, S. R. & Liniger, H.P., 2010. Geographic information system-based decision support for soil conservation planning in Tajikistan. *Journal of soil and water conservation* 65: 151-159.

- Burstein, J., Chapela y Mendoza, G., Aguilar, J. y De León, E., 2002. Informe sobre la Propuesta de Pago por Servicios Ambientales en México. México.
- Cardoza Vázquez, R., Cuevas Flores, L., García Carreón, J. S., Guerrero Herrera, J. A., Gonzalez Olarte, J. C., Hernández Méndez, H., Lira Quintero, M. L., Nieves Frausto, J. L., Tejeda Sartorius, D. y Vázquez Martínez C. M., 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. CONAFOR-SEMARNAT. 3ª edición, 4ª reimpression. México
- Chan, K. M. A., Shaw, M. R., Cameron, D. R., Underwood, E. C. & Daily, G. C., 2006. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*. 4 (11): 2138-2152.
- Cho J., Vellidis, G., Bosch, D. D., Lowrance, R. & Strickland, T., 2010. Water quality effects of simulated conservation practice scenarios in the Little River Experimental watershed. *Journal of soil and water conservation* 65: 463-473.
- Chuvieco, E., 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección* 10: 39-48.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007. Regiones hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/rh250kgw> (consultada el 23 de agosto de 2011).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2012. Red de estaciones climatológicas. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz> (consultada el 2 de abril de 2012).
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., *et al.*, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–259.
- Cotler, H., Cram, S., Martinez-Trinidad, S & Quintanar, E., 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena* 104: 280–287.
- Cruickshank García, G., 1998. Proyecto Lago de Texcoco: Rescate Hidroecológico; 2a edición. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México.
- Cruickshank García, G., 2003. La Cosecha del agua. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Proyecto Lago de Texcoco. México. 40 pp.
- Daily, G. C., 1997. Introduction: what are ecosystem services? In: Daily, G.C. (ed.) *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington D.C., E.U.A. 392 p.

- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J., 2002. A typology for description, classification and valuation of ecosystem function, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.
- Delgadillo P., J., y Delgado B., F., 2003. Evaluación de la implementación de prácticas de conservación de suelos: el caso de la comunidad Chullpa K'asa, Bolivia. *LEISA Revista de Agroecología* 19: 24-31.
- Díaz, C., Mamado, K., Iturbe, A., Esteller, M. V. y Reyna, F., 1999. Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del Río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum* 6 (2): 124-134.
- Escalante Sandoval, C. A., Reyes Chávez, L., 2005. *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. 2a Edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 298p.
- FAO, 1989. Manual de campo para el manejo de cuencas hidrográficas. Medidas y prácticas para el tratamiento de pendientes. Guía FAO Conservación 13/3. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO, 2009. Pago por servicios ambientales en áreas naturales protegidas en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Faustino, J., Jiménez, F., Velásquez, S., Alpízar, F. y Prins, C., 2006. Curso Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Colombia, 400 pp.
- Fernández Reynoso, D. S., 2008. Evaluation of sustainable agriculture systems in central Mexico (PhD). The University of Arizona. Docket 3297973.
- Fernández V., J. y Martínez Menes, M. R., (1985). Evaluación de la degradación de los suelos a nivel nacional a partir de cuencas hidrográficas. Publicación especial. Colegio de Postgraduados.
- Ferrer, S. R. D. & Nieuwoudt, W. L., 1998. Choices of soil conservation methods on KwaZulu-Natal commercial sugarcane farms. *Agrekon* 37 (4): 463-471.
- Figueroa Sandoval, B., 1975. Pérdidas de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del Río Tezcoco. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Francisco Nicolás, N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

- GACGC (1994). World in Transition: The Threat to Soils. Annual Report. German Advisory Council on Global Change. Bonn, Economica Verlag GmbH.
- García, I., A. Martínez, A. Ramírez, A. Niño, A. Rivas y L. Domínguez. 2007. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: Cotler, H. (comp.). El manejo integral de cuencas en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, pp: 113-130.
- Heathman, G.C., Larose M. & Ascough, J.C., 2009. Soil and Water Assessment Tool evaluation of soil and land use geographic information system data sets on simulated stream flow. Journal of Soil and water conservation 64: 17-32.
- INE 2005. Manual para el Desarrollo de Programas de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos Locales. México.
- INEGI (2000). Indicadores de desarrollo sustentable en México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. Aguascalientes, México. 204 p.
- INEGI (2011, http://antares.inegi.org.mx/cgi-bin/map4/mapserv_orto) Servicio web de ortofotos de INEGI
- INEGI 1978. Capa de Geología y Uso de suelo y Vegetación.
- INE-TCCCR-CONAFOR (2007). Pago por servicios ambientales en México: Situación actual y objetivos de futuro. Instituto Nacional de Ecología, Tyndall Centre for Climate Change Research, CONAFOR, Comité Técnico Consultivo. Memorias de Taller, México D. F. 18-19 de Julio. http://www.ine.gob.mx/descargas/dgipea/memoria_taller_psa_ver2.pdf (consultado el 20 de noviembre de 2010).
- Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios AGRIFEFOR Chapingo S. C. (INEISA), 1990. Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco, contrato GAVM-PT-FE-02-90. SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos); Comisión Nacional del Agua; Proyecto Lago de Texcoco. México.
- IPCC. 2007. Cuarto informe de evaluación cambio climático 2007 (Resumen). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, E.U.A. 94 pp.
- Jackson-Smith, D.B., Halling, M., de la Hoz, E., McEvoy, J.P. & Horsburgh, J.S., 2010. Measuring conservation program best management practice implementation and maintenance at the watershed scale. Journal of soil and water conservation vol. 65 (6): 413-423.

- Kassie, M., Holden, S., Köhlin, G. & Bluffstone, R., 2008. Economics of Soil Conservation Adoption in High-Rainfall Areas of the Ethiopian Highlands. Environment for Development Discussion Paper Series, EfD DP 08-08.
- Kassie, M., Zikhali, P., Pender, J. & Köhlin, G., 2011. Sustainable agricultural practices and agricultural productivity in Ethiopia: Does agroecology matter? Environment for Development Discussion Paper Series, EfD DP 11-05.
- Lajiao, C., Axing, Z., Chengzhi, Q. & Junzhi, L., 2012. Effectiveness Assessment of Soil Erosion Critical Source Areas for Soil and Water Conservation. *J. Resour. Ecol.* 3 (2): 138-143.
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12(6): 519–539.
- Lee, S., 2004. Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea. *Environmental Geology* 45: 457-465.
- Ley de Aguas Nacionales (LAN) 2012. Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión.
- Lichtenberg, E., 2001. Adoption of soil conservation practices: a revealed preference approach. Working Papers 28609, University of Maryland, Department of Agricultural and Resource Economics.
- Lillesand TM, RW Kiefer, JW Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley. 763 p.
- Lobo, G., 2001. Ecosystem functions classification. Ecological Economics and Environmental Management Centre (ECOMAN). <http://gasa3.dcea.fct.unl.pt/ecoman/delphi/> (consultada el 1 de marzo de 2011).
- Louwagie, G., Gay, S. H. & Burrell, A., 2009. Addressing soil degradation in EU agriculture: relevant processes, practices and policies. SoCo Project, JRC Scientific and Technical Reports. Luxemburg.
- Maderey, L. y Carrillo, J., 2005. El recurso agua en México: un análisis geográfico. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 128 pp.
- Madrigal Ballesteros, R. y Alpízar Rodríguez, F., 2008. Diseño y gestión adaptativa de un programa de pagos por servicios ambientales en Copán Ruinas, Honduras. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17(1): 79-90.
- Mancilla Villa, O. R., Oropeza Mota, J. L. y Martínez Menes, M. R., 2009. Evaluación de terrazas de banco para plantaciones forestales comerciales. *Rev. Ciencia Forestal en México* 34 (105): 99-118.
- Manson, R. H., 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques* 10(1): 3-20.

- Meneses Tovar C. L., 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva* 238 (62): 39-46.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F. y Selzer, F., 2011. Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen, Sección Agronomía, Año XIII* (11).
- Microsoft, 2013a Acerca de las herramientas de análisis estadístico. <http://office.microsoft.com/es-mx/excel-help/acerca-de-las-herramientas-de-analisis-estadistico-HP005203873.aspx> (consultada el 25 de agosto de 2013).
- Millennium Ecosystems Assessment (MEA), 2005. *Ecosystem and human well-being: Synthesis*. Island Press. Washington DC.
- Neef, A., 2001. Land Tenure and Soil Conservation Practices - Evidence From West Africa and Southeast Asia. Pages 125-130. In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (eds). 2001. *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*.
- OCDE (1993) OECD core set of indicators for environmental performance reviews. *Environment Monograph* 83. OECD, Paris.
- Ojeda Trejo, E., 2001. GIS and land use in Texcoco municipality, Mexico: contrasting local and official understandings. Doctoral thesis, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/3854/> (consultada el 10 de marzo de 2013).
- Oropeza Mota, J. L., 1980. Evaluación de la erosión hídrica (sedimentos en suspensión) en las cuencas de los ríos Texcoco y Chapingo. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Oropeza Mota, J. L., Martínez Menes, M. R. y Rios Berber, J. D., 1990. Metodología para la evaluación de sedimentos en terrenos degradados mediante muros de control de azolves. *Agrociencias serie AGUA-SUELO-CLIMA* 1(3): 45-67.
- Palacio Prieto, J. L., Sánchez Salazar, M. T., Casado Izquierdo, J. M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., *et al.*, 2004. Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. SEMARNAT, INE, UNAM, SEDESOL. México.
- Pattanayak, S. K., 2004. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture ecosystems & environment* 104: 171-184.

- Pedraza Cerón, E., Rodríguez FC y Fierros GAM, 1987. Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetates de la zona de Tequexquinahuac a Coatepec, Estado de México. En Ruiz Figueroa, J.F. (ed). Uso y manejo de tepetates para el desarrollo Rural. Universidad Autónoma Chapingo. México pp 128-140.
- Pimentel Bribiesca, L., 1987. Importancia de la roturación del tepetate en plantaciones forestales. En Ruiz Figueroa, J. F. (ed). Uso y manejo de tepetates para el desarrollo Rural. Universidad Autónoma Chapingo. México pp 199-211.
- Pla, I., 2002. Assessment of environmental impacts derived of soil and water conservation practices. 12th ISCO Conference, Beijing.
- Postel, S. L., & Thompson, B. H., 2005. Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum* 29: 98–108.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. & Yoder, D. C., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Dept. of Agriculture, Agric. Handbook No. 703, 404 pp.
- Rivas T, D., 1983. Infiltración en complejos naturales de la cuenca del rio Texcoco. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Rodríguez G, B., 1982. Predicción de los escurrimientos superficiales en los ecosistemas de la cuenca del Río Texcoco. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Rodríguez Solórzano, C., 2002. Diseño de indicadores de sustentabilidad por cuencas hidrográficas. Instituto Nacional de Ecología (INE). México, 22 pp.
- Romero López, A., 2009. Manifestación de impacto ambiental modalidad particular. Construcción de una unidad habitacional ecológica en el predio Las Cruces, Tequexquináhuac, Texcoco, Estado de México. Primera Etapa: Cambio de Uso del Suelo. Documento final. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mex/estudios/2010/15EM2010F0003.pdf> (consultada el 11 de mayo de 2013).
- SAGARPA 2012. Tecnologías a tu alcance del Componente COUSSA. <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Paginas/tecnologiasatualcance.aspx> (consultada el 23 de diciembre de 2012).
- Sanjurjo Rivera, E., 2001. Valoración económica de servicios ambientales prestados por ecosistemas: Humedales en México. Instituto Nacional de Ecología (INE). México.

- Sanjurjo Rivera, E. e Islas Cortés, I., 2007. Retos y perspectivas de la valoración económica de los ecosistemas para la toma de decisiones. *Gaceta ecológica*. 84-85: 93-105.
- Saskatchewan Ministry of Agriculture Factsheet. Organic Crop Production: Soil Conservation Practices. 2008. Saskatchewan, Canada.
- SEMARNAT y CONAGUA, 2003. Boletín hidrológico 55. Datos del Valle de México, Cuenca del río Tula y zona de influencia del Sistema Cutzamala correspondientes al año 2002. pp 116.
- SEMARNAT, 2004. Saber para Proteger. Introducción a los servicios ambientales. México.
- SEMARNAT-UACH, 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana a escala 1: 1000 000. SEMARNAT. México. 2002.
- Singh, A., 1986. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat. En: M.J. Eden y J.T. Parry, eds. *Remote sensing and tropical land management*, pp. 237–254. Chichester, Reino Unido, John Wiley.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A., 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of hydrologic engineering* 7: 270-292.
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology* X (3), 311.
- Universidad Autónoma Chapingo (UACH), 2004. Plan de Consolidación del Rescate Hidroecológico de la Zona Federal del Ex Lago de Texcoco. Segunda parte: evaluación y diagnóstico de acciones de 1971 a 2003. México: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/carl_pdf_fquin.pdf (consultada el 25 de noviembre de 2011).
- USDA-NRCS 2011. Assessment of the effects of conservation practices on cultivated cropland in the Great Lakes region. EUA.
- Vanegas López, M., 2009. Diversidad vegetal en obras de control de azolves sobre el Río Chapingo. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.
- Victoria Hernández, A., Niño Alcocer, M., Rodríguez Avalos, J. A. y Argumedo Espinoza, J. A., 2012. Generación de información de uso de suelo y vegetación proyectos y convenios escala 1: 50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_iberodoc/ET6_46_HERN%C3%81NDEZ.pdf (consultada el 23 de enero de 2013).

- Vitousek, P. M., 1994. Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology* 75: 1861–1876.
- Williams, J. D., Dun, S., Robertson, D. S., Wu, J. Q., Brooks, E. S., Flanagan, D. C. & McCool, D. K., 2010. WEPP simulations of dryland cropping systems in small drainages of northeastern Oregon. *Journal of soil and water conservation* 65: 22-33.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D., 1978. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. U.S. Dept. of Agriculture, Agric. Handbook No. 282.
- World Vision. 2004. Manual de manejo de cuencas. 2a. Edición. República del Salvador. 154 p.
- Wunder, S., 2005. Payments for environmental services: some nuts and bolts. Center for International Forestry Research. Occasional paper 42.
- Wunder, S., 2007. The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation. *Conservation Biology* 21 (1): 48-58.
- Wunder, S., Wertz Kanounnikoff, S. y Moreno Sánchez, R., 2007. Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta ecológica* 84-85: 39-52.
- Yacouba, D., Guangdao, H. & Xingping, W., 2009. Assessment of land use cover changes using NDVI and DEM in Puer and Simao counties, Yunnan province, China. *World Rural Observations* 1(2): 1-11.