



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EN LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA

ISABEL DEL RAYO ESTRADA HERRERA

T E S I S

RESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

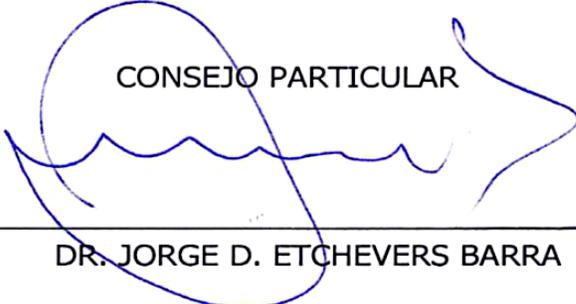
2016

La presente tesis titulada: ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EN LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA realizada por el alumno (a): ISABEL DEL RAYO ESTRADA HERRERA bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

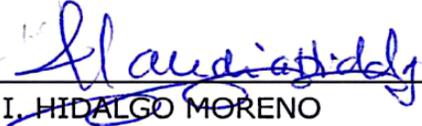
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. JORGE D. ETCHEVERS BARRA

ASESOR:



DRA. CLAUDIA I. HIDALGO MORENO

ASESOR:



DR. JUAN JOSÉ ALMARÁZ SUÁREZ

ASESOR:



DR. HERMILIO NAVARRO GARZA

ASESOR:



DR. REMIGIO GUZMÁN PLAZOLA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2016

ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EN LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA

Estrada Herrera Isabel del Rayo, Dra.

Colegio de Posgraduados, 2016

RESUMEN GENERAL

La Mixteca Alta Oaxaqueña es una de las regiones con mayor degradación de México. En ella existen áreas con evidencias de erosión alarmantes y a simple vista, aparentemente, imposibles de revertir. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) caracterizar cartográficamente la Región de la Mixteca Alta Oaxaqueña y seleccionar un área representativa (cinco municipios de la zona alta de esta región, denominados área de estudio) para el estudio de la degradación; 2) Identificar los tipos, niveles y grados de degradación en esa área de estudio, evaluar propiedades específicas como indicadores de calidad de suelo en bosques y áreas agrícolas degradadas y estudiar el efecto de la degradación en la calidad del mismo; 3) proponer alternativas de recuperación de suelos a corto, mediano y largo plazo, basadas en experiencias exitosas y que se puedan adoptar por los habitantes del área de estudio. Los resultados de la caracterización del área de estudio, muestran que la problemática común que origina la degradación de los suelos son la sobreexplotación y manejo inadecuado de los bosques, el sobrepastoreo, la escasez de prácticas de conservación de suelo, entre ellas las que impliquen incorporación de materia orgánica al suelo, la insuficiencia de conciencia social por la conservación del suelo, y las deficientes prácticas agrícolas, principalmente el monocultivo, todas ellas relacionadas con aspectos socio-culturales difíciles de modificar. Los indicadores de calidad de suelos muestran que hay un efecto de todos ellos en la degradación del suelo, que afectan la calidad del suelo de los bosques y las zonas agrícolas. Las alternativas propuestas a corto plazo, implican el uso de residuos orgánicos y su incorporación al suelo, así como la adopción o resurgimiento de prácticas clásicas de conservación del suelo; a mediano plazo, se requiere la transformación de las prácticas de pastoreo libre a pastoreo semiestabulado para disminuir el efecto negativo de esa actividad, que contribuye a la degradación del suelo. Los estudios de degradación de suelo en Oaxaca son escasos y locales por lo que es necesario generar información específica del tema que genere información integral y soluciones que resuelvan el problema.

Palabras clave: *degradación de suelos, fertilidad de suelos, Mixteca Alta Oaxaqueña, alternativas.*

ALTERNATIVES TO RECOVER DEGRADED SOIL FERTILITY IN MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA

Estrada Herrera Isabel del Rayo, Dra.

Colegio de Posgraduados, 2016

ABSTRACT

The Oaxacan Mixteca Alta is one of the regions with the greatest degradation Mexico. In it there are areas with evidence of alarming erosion and at first glance, apparently impossible to reverse. The objectives of this study were: 1) cartographically characterize the region of the Mixteca Alta Oaxaqueña and select a representative area (five municipalities in the upper area of this region, called the study area) for the study of degradation; 2) Identify the types, levels and degrees of degradation in that area of study, evaluate specific properties as indicators of soil quality in degraded forests and agricultural areas and study the effect of degradation in quality; 3) propose alternative land reclamation short, medium and long term, based on successful experiences and that may be adopted by the inhabitants of the study area. The results of the characterization of the study area show that the common problem that causes the degradation are overexploitation and inadequate management of forests, overgrazing, lack of practice soil conservation, including those involving incorporation organic matter to the soil, inadequate social conscience soil conservation, and poor agricultural practices, mainly monoculture, all related to difficult socio-cultural aspects of change. The soil quality indicators show that there is an effect of all of them in soil degradation, affecting soil quality of forests and agricultural areas. The alternatives proposed in the short term, involve the use of organic waste and soil incorporation as well as adoption or revival of classical soil conservation practices; the medium term, the transformation of free grazing practices to partial barn grazing is needed to reduce the negative impact of this activity, which contributes to soil degradation. The soil degradation studies in Oaxaca are scarce and local so it is necessary to generate topic-specific information to generate comprehensive information and solutions that solve the problem.

Keywords: *land degradation, soil fertility, Mixteca Alta Oaxaqueña, alternatives.*

AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de mi consejo particular, por la paciencia y el tiempo tomado para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Al Dr. Etchevers y Dra. Claudia por su incondicional apoyo en todo momento y por su invaluable amistad, sin ustedes esto no sería posible.

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

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme un espacio para mi formación académica.

A la M.C. Juliana por las facilidades prestadas en el Laboratorio de fertilidad de suelos.

A mi familia, Donato por tu comprensión y apoyo en toda la fase de campo.

A mi Papá, Sabino Estrada[†] por todo lo que en vida nos amaste... y a Mi Mamá, Paulina Herrera, por su incondicional apoyo y ejemplo de constancia y lucha.

A mi hermanita Laura y su combo (Toño, Dani, Vale)... su ayuda, su apoyo... su cariño

A todas las personas que siempre me motivaron a seguir adelante, mis amigas y amigos, que por bendición de dios son muchos, todos los que en algún momento formaron parte de esta travesía.

A Carmelita, por todo el apoyo burocrático y su valiosa amistad, a Luci, Luciana...don Uriel...muchas gracias....

A los productores del área de estudio que nos abrieron las puertas de sus terrenos con amabilidad y atención... que requieren que nos ocupemos más por el campo.

Al equipo de trabajo de la ADR Yukukuixi, por el inmenso apoyo en el trabajo de campo.

*El suelo productivo es el fundamento de la agricultura
Perdurable, sin la cual no puede haber prosperidad ni progreso.*

Dr. Hugh Hammond Bennett

DEDICATORIAS

A mi familia... Donato.. Abril.. Nathan... por el sacrificio que les impuse durante estos cinco largos años...con infinito amor...

A mis padres...papá que desde el cielo nos bendices y acompañas...mamá por estar siempre con nosotros... aún en los momentos de desacuerdo...

A mis hermanos, los que estuvieron y los que se ausentaron...

A todos y cada uno de mis amigos y amigas que siempre confiaron en mí y me alentaron a seguir adelante...

A todos los productores de las zonas rurales de México...

**"La agricultura es la profesión propia del sabio,
la más adecuada al sencillo y la ocupación más digna
para todo hombre libre".**

Cicerón.

**Si supiera que el mundo se ha de acabar mañana,
Yo hoy aún plantaría un árbol...**

Martin Luther King, Jr

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	ii
ABSTRACT	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatorias	v
Contenido	vi
Índice de cuadros	vii
Índice de figuras	xi
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVOSE HIPÓTESIS.....	5
LITERATURA CONSULTADA.....	6
CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA Y ÁREA DE ESTUDIO.....	8
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
CONCLUSIONES.....	78
LITERATURA CITADA.....	79
CAPITULO II. FERTILIDAD Y CALIDAD DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	84
RESUMEN.....	85
ABSTRACT.....	87
INTRODUCCIÓN.....	88
MATERIALES Y MÉTODOS.....	92
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	98
CONCLUSIONES.....	111
LITERATURA CITADA.....	112
CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	117
INTRODUCCIÓN.....	118
MATERIALES Y MÉTODOS.....	125
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	131
CONCLUSIONES.....	152
LITERATURA CITADA.....	153
CONCLUSIONES GENERALES.....	160
ANEXO	161

INDÍCE DE CUADROS
CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE LA MIXTECA ALTA
OAXAQUEÑA Y DEL ÁREA DE ESTUDIO

	CONTENIDO	Página
Cuadro 1.	Número y nombre de los Distritos que integran la Región Mixteca Oaxaqueña.....	14
Cuadro 2.	Comunidades del área de estudio.....	16
Cuadro 3.	Superficie Fisiográfica en la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	19
Cuadro 4.	Topoformas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	19
Cuadro 5.	Clase y rango de pendiente de la Mixteca Alta Oaxaqueña...	20
Cuadro 6.	Tipos de rocas y superficie que cubren la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	24
Cuadro 7.	Unidades climáticas y Tipos de climas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	26
Cuadro 8.	Regiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	28
Cuadro 9.	Subregiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	28
Cuadro 10.	Tipo de suelo de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	31
Cuadro 11.	Uso del suelo y vegetación de la Mixteca Alta Oaxaqueña....	33
Cuadro 12.	Grado y Porcentaje de Erosión de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	35
Cuadro 13.	Nivel de afectación de la degradación del suelo en la MAO...	37
Cuadro 14.	Tipo de Degradación en la MAO.....	37
Cuadro 15.	Causa de Degradación en la MAO.....	38
Cuadro 16.	Fisiografía del área de estudio.....	42
Cuadro 17.	Climas del área de estudio.....	42
Cuadro 18.	Topoformas del área de estudio.....	46
Cuadro 19.	Hidrología del área de estudio.....	46
Cuadro 20.	Geología del área de estudio.....	47
Cuadro 21.	Vegetación y uso de suelo del área de estudio.....	47
Cuadro 22.	Tipo de suelo del área de estudio.....	48
Cuadro 23.	Erosión del área de estudio.....	49
Cuadro 24.	Nivel de degradación del área de estudio.....	49

Cuadro 25.	Tipo y Causa de degradación del suelo del área de estudio..	50
Cuadro 26.	Clases de pendiente del área de estudio.....	62

**CAPÍTULO II. DEGRADACIÓN E ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELOS DEL ÁREA
DE ESTUDIO**

CONTENIDO		Página
Cuadro 1.	Atributos químicos usados como indicadores de calidad de suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca y valores límites.....	96
Cuadro 2.	Clases de calidad propuestas para suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.....	97
Cuadro 3.	Atributos químicos evaluados en los suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.....	102
Cuadro 4.	Indicadores de calidad de los suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.....	105

CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

	CONTENIDO	Página
Cuadro 1.	Grados de erosión considerados en los sitios estudio.....	129
Cuadro 2.	Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santo Domingo Tonaltepec.....	132
Cuadro 3.	Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal de degradación y grado de erosión de los sitios estudiados en Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.....	133
Cuadro 4.	Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en San Bartolo Soyaltepec.....	134
Cuadro 5.	Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.....	135
Cuadro 6.	Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en San Miguel Chicahua.....	136
Cuadro 7.	Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Cerro Prieto, San Miguel Chicahua.....	137
Cuadro 8.	Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santiago Apoala.....	137
Cuadro 9.	Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Nduayaco, Santiago Apoala.....	138
Cuadro 10	Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santa María Apazco.....	139
Cuadro 11.	Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Pericón, Santa María Apazco.....	140
Cuadro 12.	Calidad de suelos promedio de las propiedades evaluadas en los suelos agrícolas del área de estudio en la mixteca Alta Oaxaqueña.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA Y DEL ÁREA DE ESTUDIO

	CONTENIDO	Página
Figura 1.	Ubicación del área de estudio.....	15
Figura 2.	Municipios y localidades que comprenden el área de Estudio.....	17
Figura 3.	Fisiografía de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	21
Figura 4.	Topoformas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	22
Figura 5.	Pendientes de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	23
Figura 6.	Geología de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	25
Figura 7.	Tipos de climas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	27
Figura 8.	Regiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	29
Figura 9.	Subregiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	30
Figura 10.	Unidades de suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	32
Figura 11.	Uso del suelo y vegetación de la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	34
Figura 12.	Grado de Erosión Actual en la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	36
Figura 13.	Grado de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	39
Figura 14.	Tipo de de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña.....	40
Figura 15.	Causa de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña..	41
Figura 16.	Subprovincias Fisiográficas del área de estudio.....	43
Figura 17.	Tipos de clima del área de estudio.....	44
Figura 18.	Topoformas del área de estudio.....	45
Figura 19.	Regiones hidrológicas del área de estudio.....	51
Figura 20.	Cuencas hidrológicas del área de estudio.....	52
Figura 21.	Subcuencas hidrológicas del área de estudio.....	53
Figura 22.	Geología del área de estudio.....	54
Figura 23.	Vegetación del área de estudio.....	55
Figura 24.	Vegetación y Uso de Suelos del área de estudio.....	56
Figura 25.	Tipos de suelos del área de estudio.....	57
Figura 26.	Grado de erosión actual del área de estudio.....	58

Figura 27.	Grado de degradación del área de estudio.....	59
Figura 28.	Tipo y causa de degradación del suelo del área de estudio.....	60
Figura 29.	Clases de Pendiente del área de estudio.....	61
Figura 30.	Aspecto de áreas degradadas en Santo Domingo Tonaltepec.....	66
Figura 31.	Aspecto de suelos degradados en Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.....	69
Figura 32.	Aspecto de suelos degradados en Cerro Prieto, San Miguel Chichahua.....	72
Figura 33.	Aspecto de suelos degradados en Nduayaco, Apoala.....	74
Figura 34.	Aspecto de suelos degradados en Pericón, Santa María Apazco..	77

CAPÍTULO II. DEGRADACIÓN E ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

	TÍTULO	PÁGINA
Figura 1.	Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo de suelos.....	92
Figura 2.	Sitios de muestreo y tipo de degradación de suelos de la Mixteca Alta de Oaxaca.....	99
Figura 3.	Grados de erosión en los suelos del área de estudio en la Mixteca Alta-Oaxaca.....	101
Figura 4.	Cartografía de niveles de degradación e indicadores de calidad obtenidos para los suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.....	109

**CAPÍTULO III. ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE
SUELOS DEGRADADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO**

	TÍTULO	PÁGINA
Figura 1.	Dendograma que agrupa las muestras en función de la calidad del suelo.....	131

INTRODUCCIÓN GENERAL

Uno de los grandes problemas que aquejan actualmente a la humanidad es la destrucción acelerada de los recursos naturales. Entre estos, el suelo es quizás el que ha sufrido el mayor daño por intervención humana, a pesar de ser el que suministra la mayoría de los requerimientos diarios de alimentación para la misma humanidad. En países como México, donde el aumento de la población ha sido progresivo, la demanda por la producción de alimentos es cada vez mayor, lo que ha resultado en la necesidad de extender más la frontera agrícola, muchas veces sin tomar las mínimas precauciones de conservación del recurso suelo. Como consecuencia de ello el suelo ha ido perdiendo aceleradamente parte de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo cual a través del tiempo se ha reflejado en la disminución de su capacidad productiva. La situación se ha visto agravada con mayor intensidad en los lugares donde se practica la agricultura empresarial, comercialización moderna, pero aquellos lugares en que aún persiste la agricultura comunitario (ejidos), el problema también está presente.

Desde hace décadas los ecosistemas han sufrido modificaciones en sus condiciones físicas, químicas y biológicas, provocadas principalmente por actividades antropogénicas que han intensificado y cambiado el uso de suelo, lo cual ha generado procesos de degradación de esas tres naturalezas en diferentes grados (Bradomín, 1992). Entre los procesos de degradación química más importantes, que se considera afectan directamente la fertilidad y capacidad productiva de los suelos, se encuentra la pérdida de materia orgánica y de nutrientes por alteraciones a los sistemas agrícolas y cambios de uso de suelo. En cuanto a la degradación física, la erosión es la más importante, por su impacto destructivo y por ser el proceso de carácter irreversible que causa mayor deterioro en los suelos (Ortiz *et al.*, 1994, Torres *et al.*, 2003). Por su parte, ambas inciden en la degradación biológica, en particular, la microbiológica, responsable de las transformaciones de los residuos vegetales y animales que entran al suelo como residuos orgánicos, liberando de paso nutrientes para las plantas y moléculas orgánicas que actúan como material de agregación de las partículas elementales y los agregados del suelo.

La fertilidad del suelo tiene diversas definiciones, los cuales han ido evolucionando a través del tiempo. En general, la definición clásica, ya superada, era la capacidad del mismo para suministrar nutrientes para el desarrollo de las plantas. Algunos investigadores consideran que en el concepto de fertilidad se deben incluir componentes naturales además del suelo, como el clima y la planta y componentes no naturales como la sociedad y la tecnología, debido a que la alteración de estos modifica a su vez la fertilidad del suelo.

La definición moderna de fertilidad incluye componentes químicos, físicos y biológicos, algunos autores la relacionan con el potencial productivo del suelo (Young, 1976). Pieri (1987) indicaba que la fertilidad del suelo, era la capacidad para suministrar los nutrimentos para el desarrollo de los cultivos. De acuerdo a Ojeda y Ojeda (1996), los factores que determinan la fertilidad del suelo se pueden clasificar en a) físicos, que condicionan el desarrollo del sistema radical y sus aportes hídricos, b) químicos y c) biológicos. La fertilidad física se identifica por la textura, estructura, porosidad, aireación, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc. La fertilidad química hace referencia a la reserva de nutrientes y su aporte a las plantas. Se caracteriza mediante la capacidad de cambio de cationes, pH, materia orgánica, macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (B, Fe, Mo, Mn, Zn, Cu, Na y Cl), y sus formas químicas en el suelo que condicionan su biodisponibilidad. La fertilidad biológica está determinada por la actividad de los microorganismos del suelo. La microbiota del suelo utiliza la materia orgánica como sustrato y fuente de energía, interviniendo en la producción de enzimas, ciclo del carbono y nitrógeno, transformaciones biológicas de nutrientes y procesos de humificación y mineralización.

Para aspirar a conservar y restaurar la fertilidad del suelo se deben realizar actividades que eviten su disminución. Ejemplos de ello son la rotación y diversificación de cultivos, los aportes de materia orgánica y prácticas de conservación de suelo que eviten su pérdida (barreras, vivas, terrazas sucesivas, etc.) (Bravo *et al.*, 2004).

La evaluación de la calidad del suelo es un referente confiable de la fertilidad del suelo. En México los estudios y criterios para evaluarla han sido poco explorados, y hay referencias de que el 47% de la superficie nacional presenta algún grado de

degradación (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002). En la Región Mixteca de Oaxaca se observan evidencias de este fenómeno a simple vista, la degradación de tierras en esta región ha alcanzado niveles muy serios después de años de deforestación, sobrepastoreo y expansión agrícola, lo que se suma a su compleja topografía y sus suelos someros (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002). En el estado de Oaxaca, principalmente en la región mixteca se han hecho estudios sobre la erosión, Pérez (1996) reportó que en 1983 el 86% de la superficie de la Mixteca se encontraba erosionada y de ésta el 59% presentaba un grado de erosión entre severa y muy severa, con pérdidas de suelo estimadas hasta en $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ además encontró una reducción en la productividad del suelo del 40 y 87 % del suelo al remover artificialmente 20 cm de suelo.

Las opciones para contrarrestar la degradación del suelo, tienen diversas implicaciones, ya que las causas de esta degradación son principalmente inducidas por el hombre, y es él mismo quien puede realizarla las prácticas para su conservación. La concientización acerca de la importancia del recurso en sus distintas dimensiones, principalmente productivas, de educación social y capacitación son fundamentales para llevar a cabo su conservación, ya que este problema se da principalmente en zonas rurales de alta y muy alta marginación (Ceja, 2008). La participación de la sociedad rural, las autoridades locales, los recursos financieros y la voluntad política son imprescindibles. Para los investigadores en ciencia del suelo, este desafío se traduce en la necesidad de desarrollar tecnologías que, además de ser altamente productivas, conduzcan a mejorar los suelos y a su sostenibilidad. Sólo es posible desarrollar agricultura sostenible sobre suelos sostenibles. El suelo se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años por la interacción del clima, topografía, biota y material parental, por lo que hay autores que lo consideran como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo (Porta *et al.*, 1999).

La materia orgánica incrementa la fertilidad química, física y biológica del suelo (Kalantari *et al.*, 2010). Sin embargo, su capacidad como fuente de nutrientes es baja respecto a los fertilizantes minerales (Álvarez *et al.*, 2010). Éstos se deben usar conjuntamente con estrategias que mantengan e incrementen la materia orgánica del

suelo. Las propiedades del suelo que muestran mayor grado de sensibilidad al manejo del hombre son la materia orgánica, el fósforo asimilable, la estabilidad estructural, los agregados estables y la relación agua-aire-planta (Crespo, 2010). Por lo que las alternativas propuestas deben ir enfocadas principalmente a incrementar el contenido de materia orgánica del suelo, en conjunto con prácticas y obras de conservación de accesible adopción local.

Dada la importancia productiva de contribuir a la recuperación de la fertilidad de los suelos e incrementar su capacidad productiva del área de estudio, se plantean los siguientes objetivos e hipótesis.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo General

Caracterizar cartográficamente el área de estudio, identificar los diferentes grados de degradación y describir sus principales causas, evaluar el efecto de la degradación en la calidad del suelo y proponer alternativas para la recuperación de la fertilidad del suelo.

Objetivos específicos

- 1.- Describir cartográficamente la Mixteca Alta Oaxaqueña, con énfasis en cinco localidades de alta y muy alta marginación, e identificar las principales causas de la degradación del suelo.
- 2.- Identificar mediante índices de calidad del suelo el grado de afectación de la degradación en la calidad de suelos del área de estudio.
- 3.- Proponer alternativas de recuperación de la fertilidad de los suelos del área de estudio en referencia a alternativas probadas previamente en condiciones iguales o similares a las del área de estudio.

Hipótesis

- 1.- El perfeccionamiento de los estudios cartográficos de la zona y en particular de las cinco localidades de alta y muy alta marginación de la Mixteca Alta Oaxaqueña seleccionadas como estudios de casos, contribuirán a identificar y precisar las principales causas de la degradación del suelo de esas regiones.
- 2.- La degradación del suelo es la causa principal de los bajos niveles de calidad y fertilidad de los mismos.
- 3.- Alternativas tecnológicas apropiadas permiten recuperar a corto, mediano y largo plazo a fertilidad del suelo del área de estudio.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, S. J. D.; Gómez, V. D. A.; León, M. N. S. y Gutiérrez, M. F. A. 2010. Integrated management of inorganic and organic fertilizers in maize cropping. *Agrociencia* 44:575-586
- Bradomín, J. M. 1992. "Toponimia de Oaxaca (Crítica Etimológica)", Tercera Edición, Oaxaca, Oax. pp. 171 y 172.
- Bravo, C., Lozano, Z., Hernández, R. M., Piñango, L., Moreno, B. 2004. Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16: no. 3 Barquisimeto 2004. Pp. 163-172.
- Ceja, M. Ma. Concepción. 2008. Degradación de suelos y pobreza en México. *Pesquisas. Economía Informa. No. 350. Universidad Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras, México, Distrito Federal. México. pp. 89-93.*
- Crespo, G. 2010. Utilización de residuales de las instalaciones pecuarias para la producción de pastos y forrajes tropicales. Resúmenes. Congreso 45 Aniversario del Instituto de Suelo y VII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. Ciudad de La Habana, Cuba. p. 41.
- Kalantari, S.; Hatami, S.; Ardalan, M. M.; Alikhani, H. A., and Shorafa, M. 2010. The effect of compost and vermicompost of yard leaf manure on growth of corn. *African J. Agric. Res.* 5:1317- 1323.
- Ojeda, D. y E. Ojeda T. 1996. Suelos cultivados de la República Mexicana, contenido medio de nutrimentos minerales aprovechables. México, Universidad Nacional Autónoma Chapingo. En estadísticas del Medio Ambiente 1999. Capítulo II. Medio ambiente y recursos naturales. (www.inegi.gob.mx/espanol/bvinegi/), México, p. 10.
- Ortiz S., Ma de la L., M. Anaya, y W. J. Estrada. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra, Universidad Autónoma

Chapingo-Comisión Nacional de Zonas Áridas-Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.

Pérez, N. J. 1996. Efectos de la erosión y sistemas de labranza sobre la productividad y rentabilidad de dos suelos de Oaxaca. Tesis de Doctor. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 178 p.

Pieri, C. 1992. Fertility of Soils. Springer Series in Physical Environment No. 10, Springer Verlag, Germany.

Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de L. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2a ed. Mundi-Prensa, España. Pp-56.

Torres B. E., B. J. Cortes., S. E. Mejía., A. G. Exebio., A. L. H. Santos., Ma. E. P. Delgadillo. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Joselito", Jesús María, Jalisco. TERRA Latinoamericana. 2:enero-marzo 2003, pp. 117-126.

SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D. F. México. Escala 1:250 000. Memoria Nacional.

Young, A. 1976. Tropical soils and soil survey. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Great Britain. Pp 468.

**CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN Y
DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE
LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA Y
ÁREA DE ESTUDIO**

RESUMEN

Para conocer las características de un lugar que permitan relacionar procesos con la naturaleza del sitio de estudio y su afectación, es recomendable el empleo de métodos modernos o sistemas de información geográfica (SIG), ya que facilitan el manejo de información digital, plasmándola en mapas que son descripciones o documentos de información gráfica, que los distingue de cualquier otro tipo de descripción, escrita, verbal u otra naturaleza. Estos métodos contribuyen a identificar y precisar las principales causas de la degradación del suelo. Para describir la región y área de estudio, se compiló la información cartográfica existente, se procesó y sistematizó para obtener una descripción cartográfica de las características biofísicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO). Ante la imposibilidad de abarcar toda la MAO por razones de tiempo y presupuesto, se seleccionó un área de estudio compuesta de cinco municipios. De todos ellos se realizó una descripción físico – social. La base de esta descripción fue la cartografía proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La región de la MAO forma parte de la Mixteca Oaxaqueña (MO), se ubica al noroeste del estado de Oaxaca, su extensión es de 8709.52 km² (870 952 has) (INEGI, 2000). Los cinco municipios (Santo Domingo Tonaltepec, San Bartolo Soyaltepec, San Miguel Chicahua, Santiago Apoala y Santa María Apazco) poseen altos y muy altos índices de marginación. Todos ellos se ubican en la zona más alta de la MAO. En cada municipio se seleccionó una comunidad con productores cooperantes con parcelas localizadas en los suelos representativos del área en las cuales se realizó colecta de suelo y su posterior análisis. Las coordenadas aproximadas del área de estudio son 17° 30' y 17° 45' latitud Norte y los 97° 00' y 97° 25' longitud Oeste (Oeidrus, 2007) y tiene una superficie de 329.19 km² (32 919.1 has). Se trata de una zona sumamente accidentada con topoformas de Sierra (98 % de la superficie) con cumbres tendidas y sierra baja compleja con cañadas. El clima representativo es templado subhúmedo y la geología consiste en rocas sedimentarias del tipo caliza y lutita. Aquí se encuentran seis tipos de suelo, predominando los Fluvisoles. La vegetación principal es el pastizal, como resultado de la perturbación

que produce el hombre al abrir la vegetación del bosque para sustituirla por pastizal para uso principalmente ganadero, y donde hay cobertura forestal ésta consiste en asociaciones de pino-encino. La agricultura es mayormente de temporal, la degradación es leve en 47.7 % del área de estudio, pero de moderada a extrema en 41.8 %, principalmente del tipo químico con declinación en la fertilidad y decremento en contenido de materia orgánica (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002). Las causas principales de la degradación son la deforestación, la remoción de la vegetación y las actividades agrícolas (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002), la erosión es principalmente hídrica con pérdida de suelo y la causa principal es el cambio de uso de suelo y la sobreexplotación de los bosques (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002).

Palabras clave: *Descripción cartográfica, Mixteca Alta Oaxaqueña, área de estudio, degradación de suelos.*

INTRODUCCIÓN

El uso de los SIG se remonta a los años 60 y se puede definir como un método o técnica de tratamiento o procesamiento de información geográfica, mediante lo cual obtenemos información derivada gráfica y estadística (Domínguez, 2000). Los campos de aplicación de un SIG son numerosos y la elaboración de mapas como representación de la realidad es relevante cuando se requiere conocer características específicas de grandes superficies. La descripción cartográfica desempeña un papel importante para la toma de decisiones ya que permite identificar áreas de alto riesgo o grado de degradación.

La degradación de la tierra es el conjunto de procesos dinámicos (físicos, químicos y biológicos) que afectan la productividad de los ecosistemas, este daño puede ser irreversible y con consecuencias negativas en los ámbitos sociales, económicos, ecológicos e inclusive políticos. La degradación del suelo se relaciona con factores de influencia principalmente antropógena como el uso inadecuado de los recursos naturales, sobreexplotación, cambios de uso, etc. El suelo y el agua son la base fundamental para el abastecimiento de alimentos para las plantas, los animales y el hombre (Ortiz *et al.*, 1994; Torres *et al.*, 2003). La erosión es una de las principales causas de la desertificación y un problema severo de degradación física. De acuerdo a la SEMARNAT (2002) las principales causas de la degradación del suelo en México son la deforestación (24%), el cambio de uso de suelo (25%), el sobrepastoreo (25%) y las prácticas agrícolas (16%) y en la mixteca Alta Oaxaqueña se reporta degradación hasta en el 70 % de la región (Bradomín, 1992).

En este contexto son necesarias acciones urgentes que permitan detener, contrarrestar y/o mitigar la degradación de los suelos, si bien la erosión es el proceso más destructivo. La degradación química se manifiesta en la declinación de la fertilidad del suelo. Como resultado se tienen suelos poco productivos, lo cual es importante ya que en el área de estudio se tiene una agricultura de subsistencia que en la mayoría de los casos es insuficiente para satisfacer el consumo familiar.

La evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre (ASOD) es una metodología que se aplica para medir el impacto de la intervención antrópica en un sistema natural. La degradación se determina con base en observaciones hechas en campo, lo cual permite identificar el tipo de degradación, los factores causativos y la tasa con que está afectada una unidad cartográfica.

El presente capítulo es la parte inicial donde se describe la zona de estudio, con el objetivo de identificar las áreas más degradadas y que requieren de atención prioritaria, así como de caracterizar la zona para seleccionar sitios de muestreo de suelos que será la base de la evaluación química de los mismos y en conjunto permitan proponer alternativas de recuperación de estas zonas degradadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización cartográfica

Se compiló la información cartográfica existente sobre la región de estudio. Como fuentes de información se consultó la cartografía generada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y la Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO). La información fue procesada y estandarizada mediante el programa Arc Gis versión 10.1 (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California) Se generaron capas geográficas específicas de la Región Mixteca Oaxaqueña (RMO), de la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) y del área de estudio. Mediante técnicas de análisis geográfico se interpretaron y analizaron las capas generadas para relacionar las características del área de estudio con los problemas de degradación del suelo y se calcularon las áreas de las capas obtenidas para identificar las zonas más representativas de cada mapa, así como conocer el % de afectación de los niveles y grados de erosión.

Área de Estudio

El área de estudio está ubicada en la Región Mixteca Oaxaqueña (RMO), pertenece a la subregión de la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) y forma parte de los distritos de Teposcolula y Coixtlahuaca. La RMO está ubicada en la parte Norte del Estado de Oaxaca; colinda al este con los estados de Puebla, Guerrero y la Región de la Cañada del propio estado de Oaxaca. Al sureste colinda con la región de Los Valles Centrales y al sur con la Sierra Sur, ambos del estado de Oaxaca. De acuerdo al Gobierno de ese Estado (e-local, 2009) la RMO se encuentra integrada por 7 de los 30 Distritos Rentísticos que integran la entidad con un total de 155 municipios, que equivalen al 27.2 % de los 570 que conforman el Estado de Oaxaca. La extensión territorial de la RMO es de 16,333 km², que representan 17.1 % del estado que consta de 95,364 km², por cual ocupa el segundo lugar en extensión después de la Región del Istmo (19,975 km²). La RMO está integrada principalmente por los distritos de Silacayoapan, Huajuapán, Juxtlahuaca, Coixtlahuaca, Nochixtlán, Teposcolula y Tlaxiaco (Cuadro1), pero otros 14 de municipios, pertenecientes a los distritos de

Cuicatlán (8), Zaachila (2), Sola de Vega (1), Etna (2) y Juquila (1), son considerados mixtecos por razones étnicas. De acuerdo al censo nacional de población y vivienda de INEGI (2010) la RMO tiene una población de 683,957 habitantes, con una tasa de crecimiento del 0.11 %. De esta población, 32.5% es urbana y 67.5% es rural; 35% de ese total es considerada indígena.

Cuadro 1. Número y nombre de los Distritos que integran la Región Mixteca Oaxaqueña (Gobierno del Estado de Oaxaca)*.

Número de Distrito	Nombre del Distrito	Número de Municipios
01	Silacayoapam	19
02	Huajuapam	28
03	Coixtlahuaca	13
08	Juxtlahuaca	07
09	Teposcolula	21
10	Nochixtlán	32
16	Tlaxiaco	35
Total		155

* 14 municipios más no se ubican dentro de estos distritos pero son considerados parte de la Mixteca Oaxaqueña por razones étnicas (no incluidos en este cuadro).

La región Mixteca se encuentra dividida en dos subregiones: la Mixteca Alta, que comprende los distritos de Coixtlahuaca, Nochixtlán, Teposcolula y Tlaxiaco y la Mixteca Baja que está conformada por los distritos de Huajuapam, Juxtlahuaca y Silacayoapam. Además, otras poblaciones consideradas mixtecas, por etnia, se ubican en diferentes partes de la entidad, como en las regiones del Istmo, los Valles Centrales y la Cañada (Gobierno del Estado de Oaxaca (e-local), 2009).

La Mixteca Alta Oaxaqueña está ubicada al noroeste del estado de Oaxaca. Tiene una extensión de 8,709.52 km² (870,952 has (INEGI, 2000); abarca los distritos de Tlaxiaco (35 municipios), Teposcolula (21 municipios), Nochixtlán (32 municipios) y Coixtlahuaca (13 municipios), con un total 101 municipios. Las coordenadas aproximadas del área son 17° 00' y 18° 10' latitud Norte y los 97° 00' y 98° 00' longitud Oeste (OEIDRUS, 2007) (Figura 1).

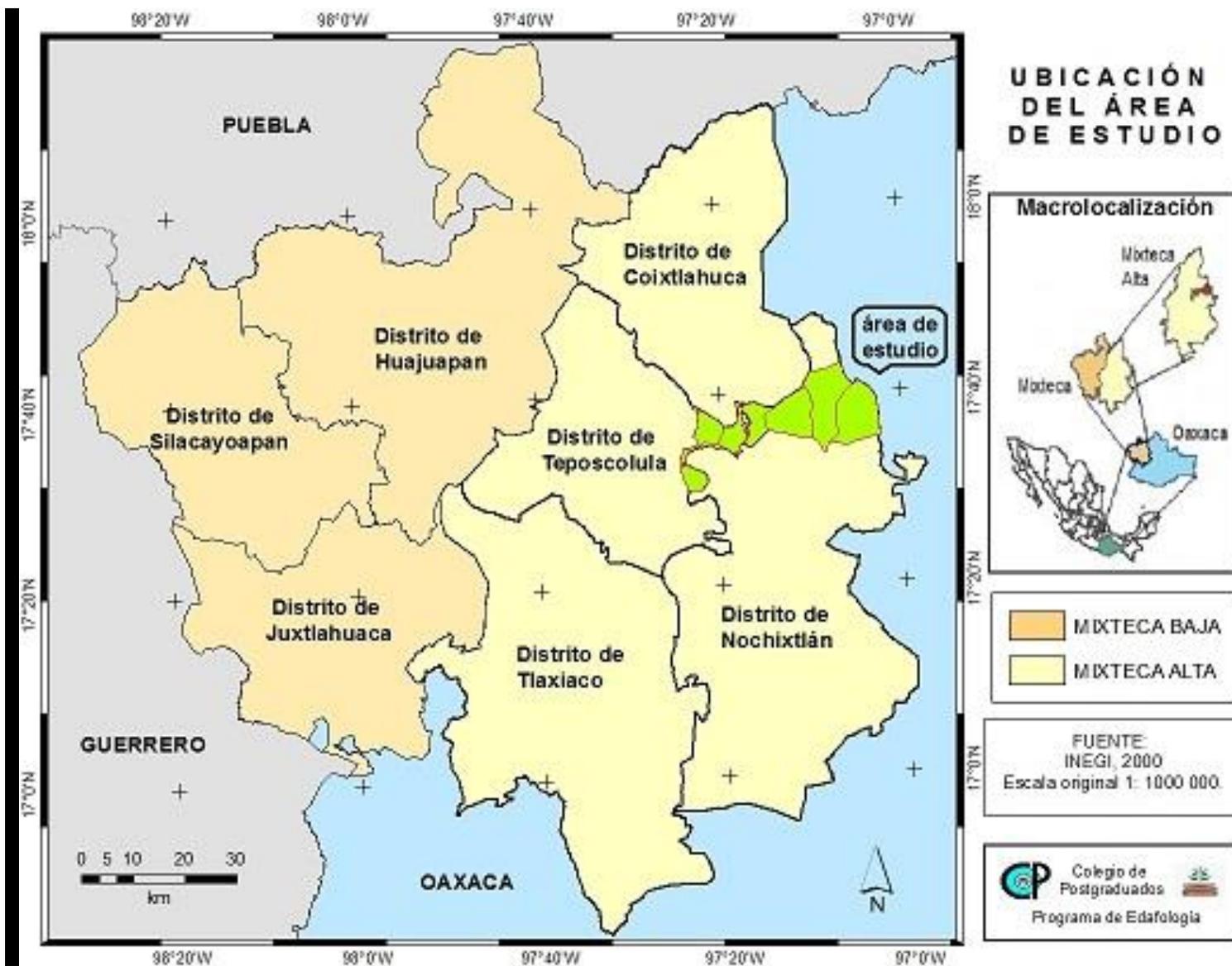


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La Mixteca Alta es una zona sumamente accidentada; está formada por la conjunción de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Oriental o de Oaxaca, a la que se denomina usualmente "Nudo Mixteco". Entre sus escarpadas montañas se localizan valles angosto y cañadas profundas; de los primeros, los más importantes son los de Nochixtlán, Coixtlahuaca, Teposcolula y Tlaxiaco.

Se eligieron cinco comunidades que forman parte de cinco municipios ubicados en la MAO. El área de estudio se delimitó con base en tres criterios; 1) que las comunidades pertenecieran a la misma cuenca (Papaloapan); 2) que fueran comunidades de alta y muy alta marginación de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010); y 3) que fueran comunidades ubicadas en la parte más alta de los municipios para enfocar las propuestas de control de la erosión a la disminución del aporte de sedimentos a las partes bajas de la cuenca. En esta región las delimitaciones territoriales no corresponden exactamente a la misma extensión de la demarcación político-administrativa. Para los efectos de este trabajo, los límites reportados corresponden a esta última, de acuerdo con lo reportado por el INEGI (2009). Los municipios y comunidades seleccionadas se reportan en el Cuadro 2 y su ubicación geográfica se indica en la Figura 2.

Cuadro 2. Comunidades del área de estudio.

Municipio	Comunidad	Superficie municipal (ha)
Santo Domingo Tonaltepec	Tonaltepec	2652.2
San Bartolo Soyaltepec	Guadalupe Gavillera	7490.2
Santa María Apazco	Pericón	8047.3
Santiago Apoala	San Antonio Nduayuaco	8576.3
San Miguel Chicahua	Cerro Prieto	6153.1
	Superficie total	32919.1

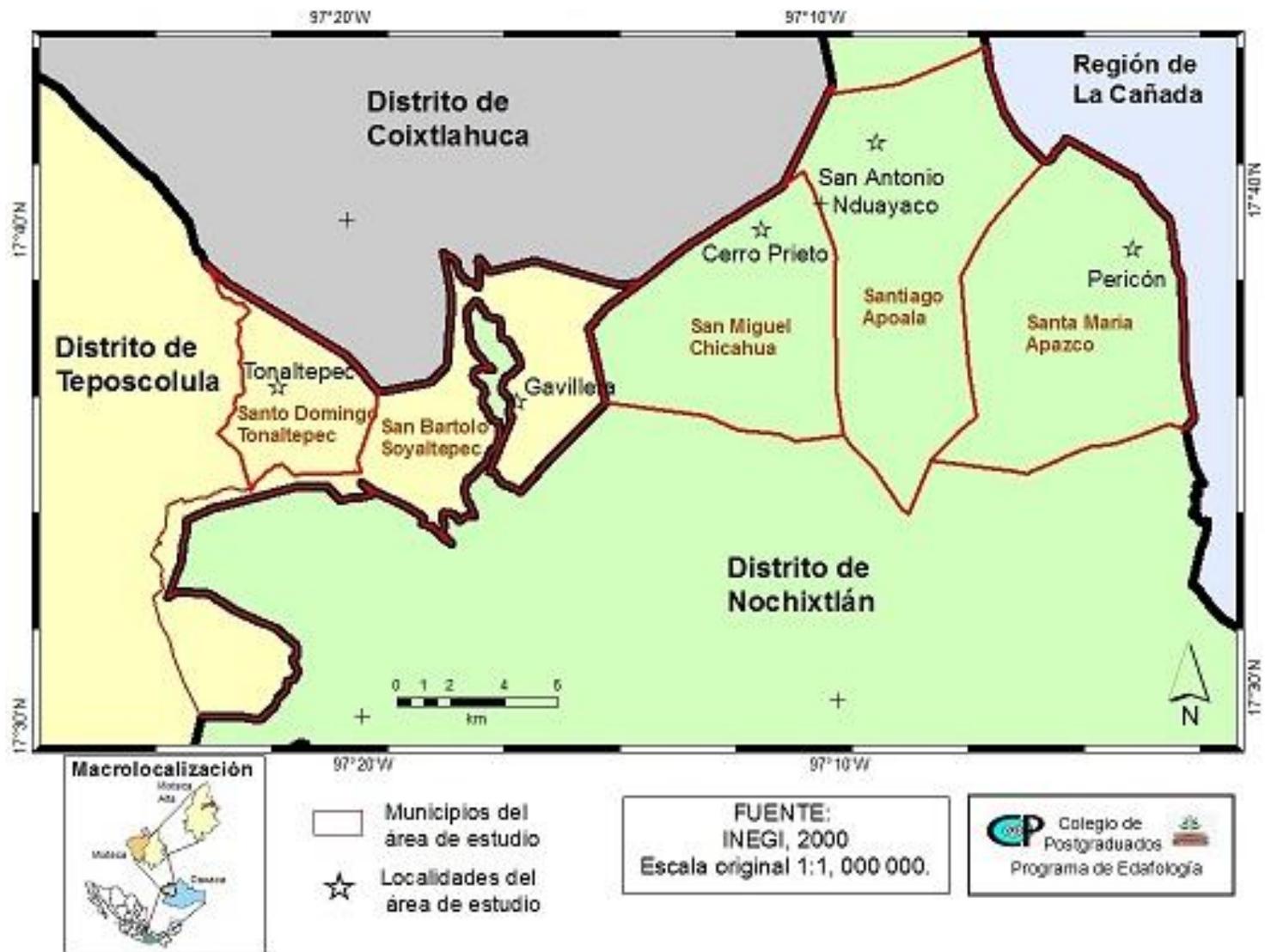


Figura 2. Municipios y localidades que comprenden el área de Estudio.

Descripción Físico – Social de los municipios del área de estudio

La caracterización Físico – Social se realizó con base en la información existente de las comunidades de estudio generada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), el Gobierno del Estado de Oaxaca mediante el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), y los Planes de Desarrollo Municipal Disponibles en la Secretaría de Finanzas del Estado de Oaxaca (<https://www.finanzasoaxaca.gob.mx/pmds.html>).

Con la información recabada se sintetizó la información cotejando la que fuese repetitiva y se describieron los aspectos más relevantes que influyen en el deterioro de los recursos naturales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la Mixteca Alta Oaxaqueña

Fisiografía

La MAO se ubica en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, de la cual abarca parte de tres subprovincias: la Subprovincia de Sierras Centrales de Oaxaca (34.9 %), que cubre la porción oriental de la subregión; la Subprovincia de la Mixteca Alta (55.7 %) que cubre la parte central y la Subprovincia de la Cordillera Costera del Sur (9.4 %), ubicada al sur de la subregión (Cuadro 3, Figura 3).

Cuadro 3. Superficie Fisiográfica en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Subprovincia Fisiográfica	Superficie (ha)	%
Cordillera Costera del Sur	81520.3	9.4
Sierras Centrales de Oaxaca	303992.9	34.9
Mixteca Alta	485439.0	55.7

La topoforma dominante es de sierra (83.2 %), seguida de valles (7.94 %) y lomeríos (6.19 %) (Figura 4, Cuadro 4). Su gradiente altitudinal varía de 1700 hasta 3000 msnm (INEGI, 2000b).

Cuadro 4. Topoformas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Topoforma	Superficie (ha)	%
Sierra	724738.5	83.2
Cañón	8573.8	1.0
Valle	69166.6	7.9
Lomerío	53949.1	6.2
Meseta	14524.3	1.7

Pendientes

El mapa de pendientes se generó a partir del Modelo de Elevación de Elevación Digital (MDE), el MDE tiene una resolución de 15 m, los valores de "z" son de altitud o de alturas ortométricas, en unidades enteras de metro y están referidos al nivel medio del mar, con base en el Datum correspondiente a ITRF92 época 1988, elipsoide GRS80, coordenadas geográficas. El error medio cuadrático es de 4.9 m y su publicación fue en el año 2013. Este MDE se utilizó para generar los mapas de clases y forma de la pendiente tomando como base la clasificación de FAO (2009).

De acuerdo a la clasificación de FAO (2009) adaptada para la representatividad del área, la pendiente en la mayoría del territorio de la MAO es de 15 a 30 % con forma fuertemente inclinada ocupando el 39.4 % del total de la Región (Cuadro 5), seguida de las pendientes de 5 a 15% (34.9 % de la Región) con forma moderadamente inclinada, en menor proporción la forma algo escarpada (14 % de la Región) y ligeramente inclinada con pendiente de 0 a 5 % (11.7 % de la Región) y una pequeña área que abarca penas el 0.03 % de forma muy escarpada con pendientes mayores al 60 % (Figura, 5).

Cuadro 5. Clase y rango de pendiente de la Mixteca Alta Oaxaqueña*

Forma de la pendiente	Clase de pendiente (%)	Ha	%
Ligeramente inclinado	0 - 5%	101673.0	11.7
Moderadamente inclinado	5 – 15%	303665.5	34.9
Fuertemente inclinado	15 – 30%	342814.2	39.4
Algo escarpado	30 – 60%	122174.5	14.0
Muy escarpado	> 60	239.3	0.03

*Elaboración propia con datos de INEGI (2012). Clasificación de la pendiente FAO, 2009, adaptado a características específicas del área.

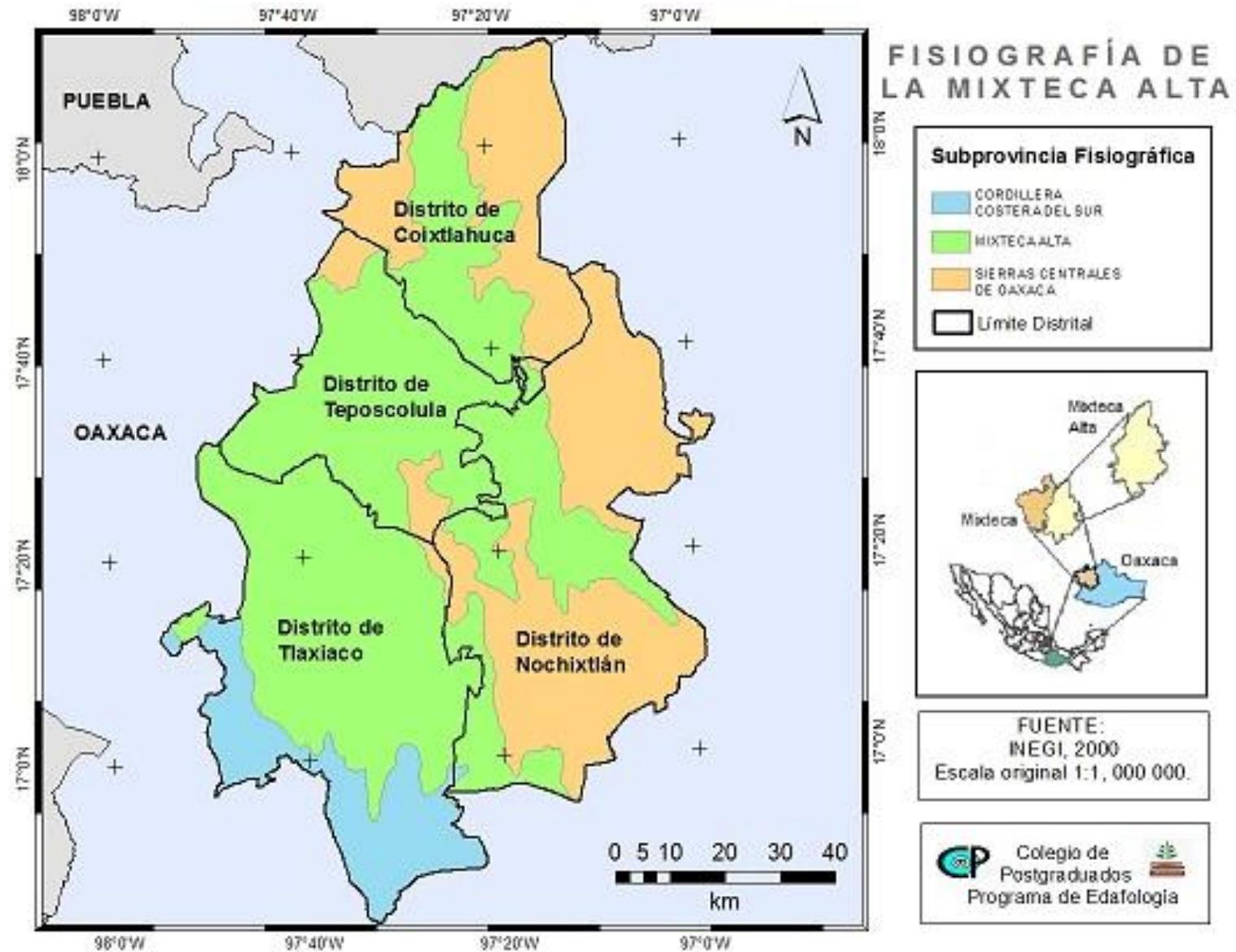


Figura 3. Fisiografía de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

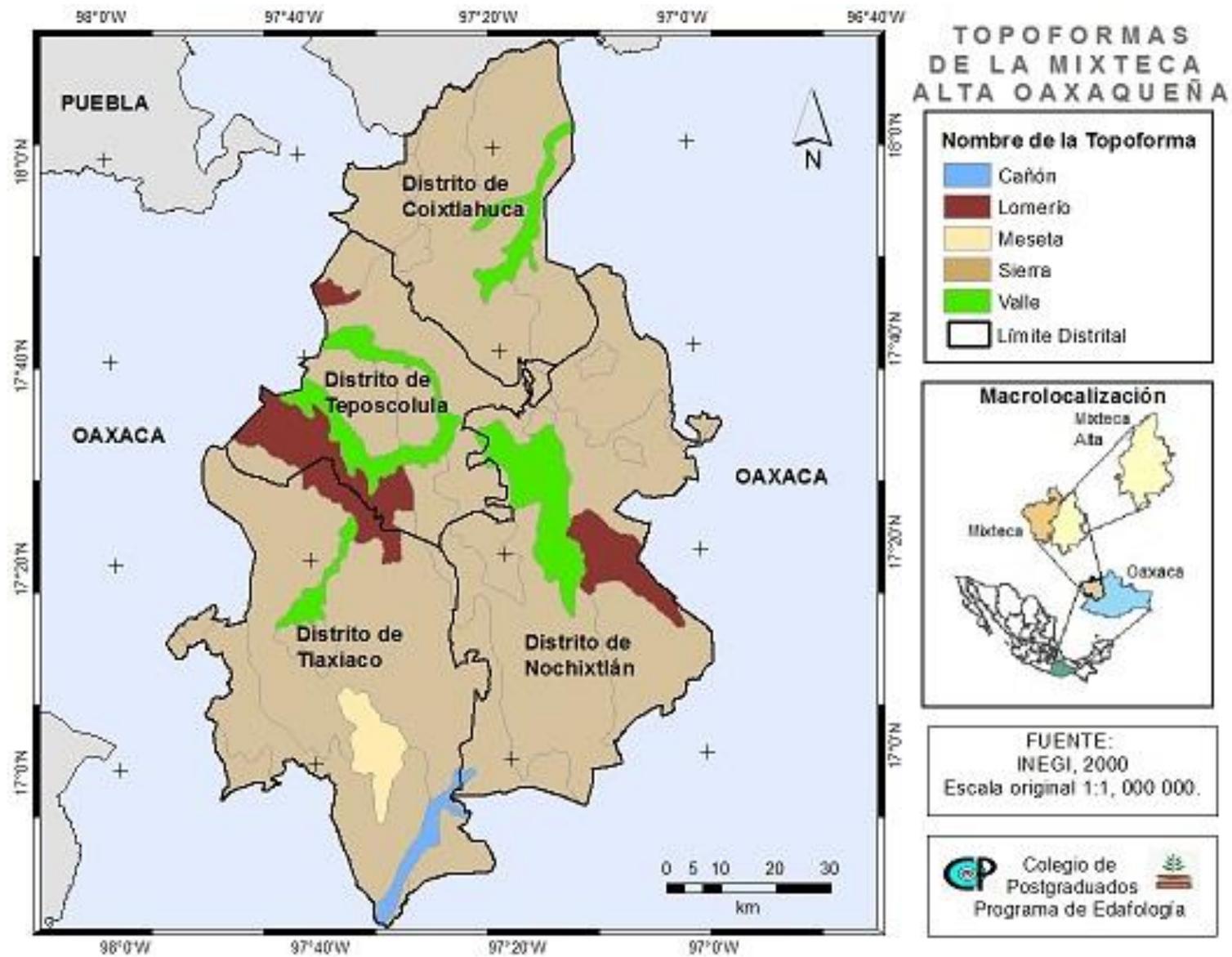


Figura 4. Topoformas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

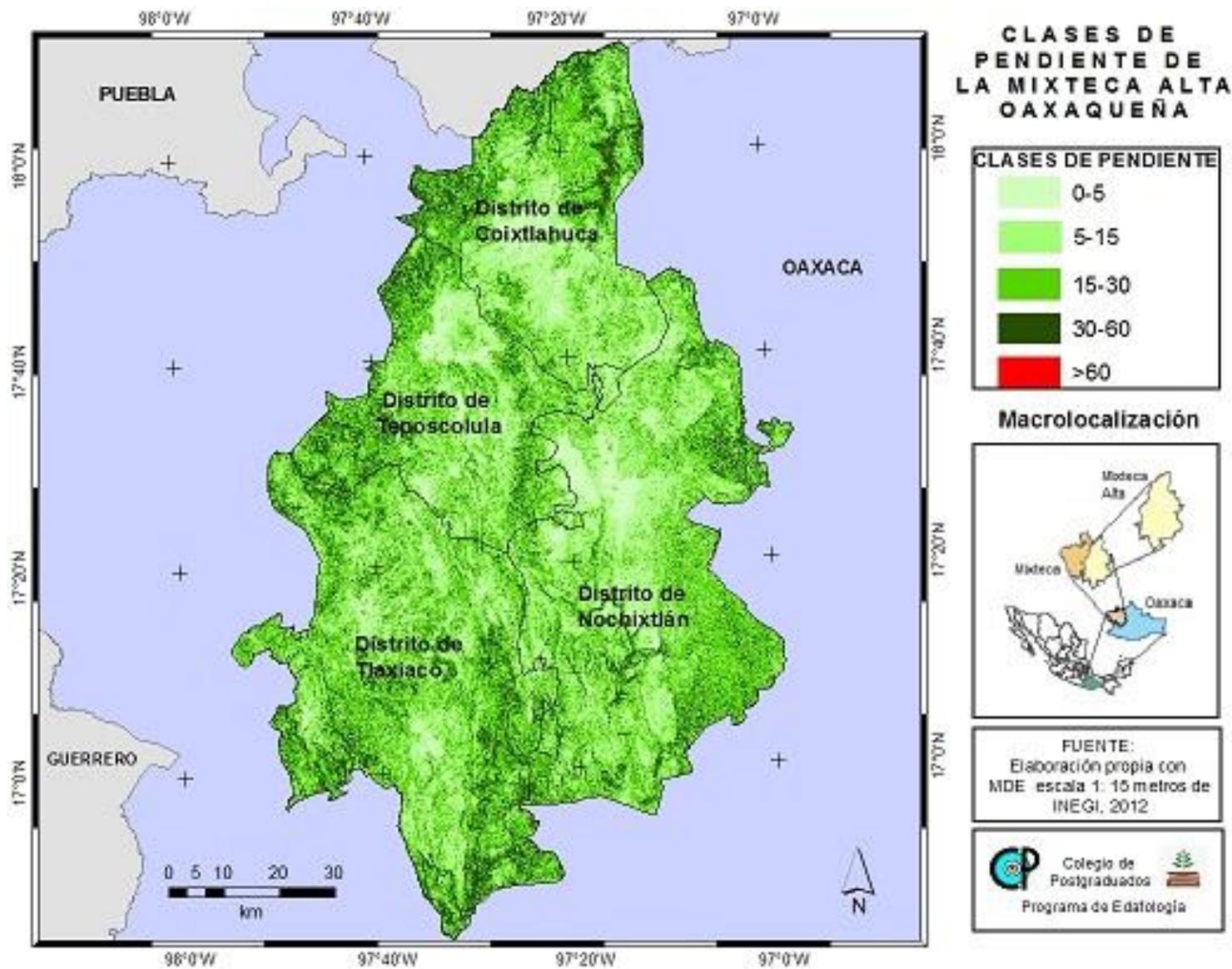


Figura 5. Pendientes de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Geología de la MAO

En el Cuadro 6 se indica la superficie y proporción de la MAO que cubren diferentes tipos de rocas y en la Figura 6 se muestra su distribución. Las rocas calizas comprenden la mayor parte de la geología de la zona de estudio (36.2%); le siguen en importancia las rocas ígneas extrusivas básicas (18 %) y la Limolita-arenisca (11.8%), mezclas de Caliza - lutita (7.7 %) y arenisca conglomerado (7.6%) y Gneiss (7.6 %), además de áreas de menor tamaño con areniscas, conglomerados, esquistos, Lutitas-areniscas, rocas ígneas intrusivas ácidas, rocas ígneas extrusivas intermedias y material volcanoclástico.

Cuadro 6. Tipos de rocas y superficie que cubren la Mixteca Alta Oaxaqueña*

Tipo de Roca	Superficie (Ha)	Proporción (%)
Arenisca	7702.7	0.9
arenisca conglomerado	66250.2	7.6
Caliza	314935.8	36.2
caliza lutita	67372.2	7.7
Conglomerado	13618.5	1.6
Esquisto	19975.2	2.3
Gneis	66448.7	7.6
limolita-arenisca	103130.3	11.8
lutita arenisca	14111.1	1.6
ígneas intrusivas ácidas	5494.2	0.6
Volcanoclástico	7950.2	0.9
ígneas extrusivas básicas	156844.4	18.0
Ígneas extrusivas ácidas	11017.7	1.3
ígneas extrusivas intermedias	2710.8	0.3

*Fuente: INEGI (2005)

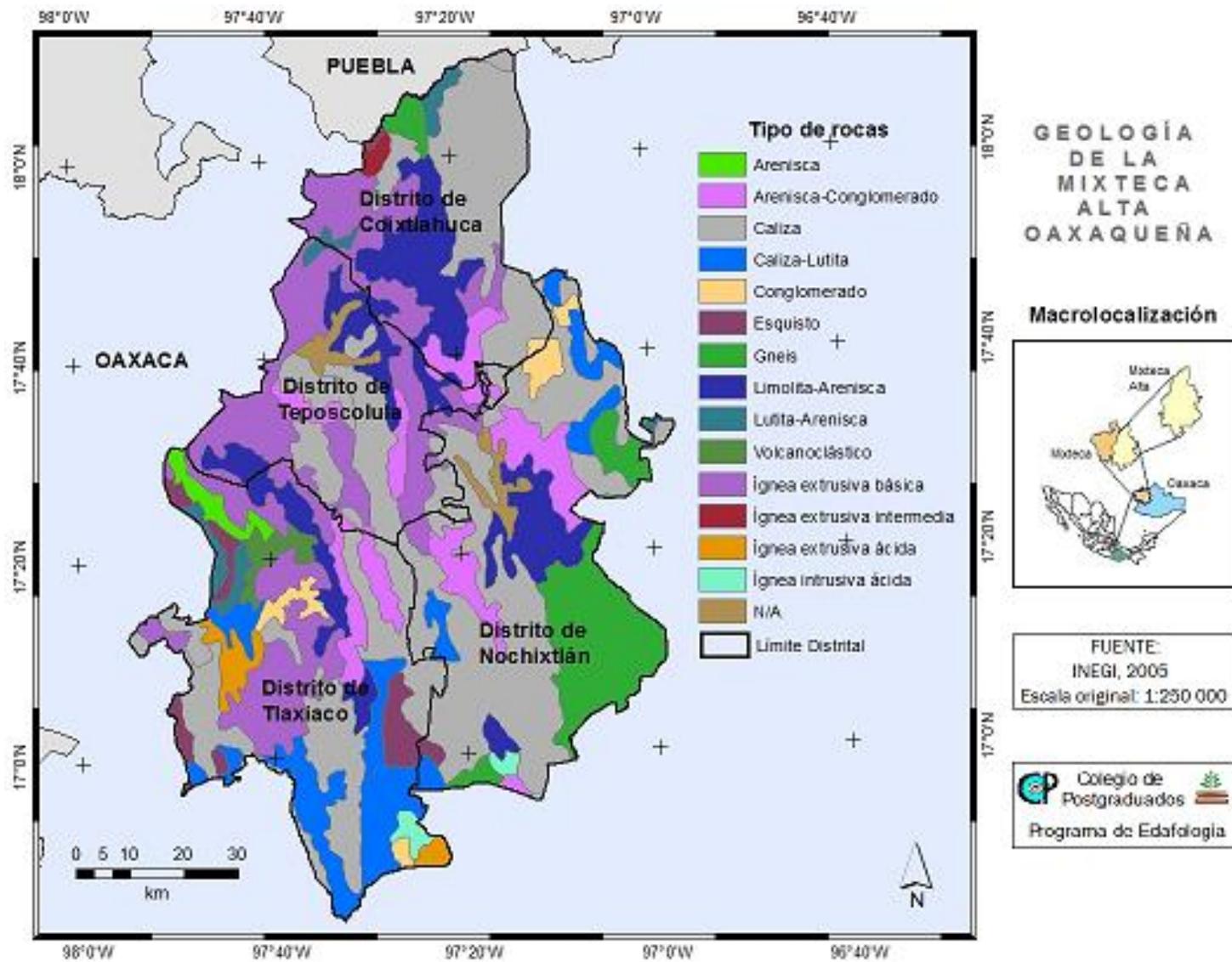


Figura 6. Geología de la Mixteca Alta Oaxaqueña (INEGI, 2005).

Clima

En el Cuadro 7 se indican los tipos climáticos, la superficie y proporción que abarcan en la MAO. Su distribución geográfica está indicada en la Figura 7. El clima dominante es el templado subhúmedo (64.1%), el cual tiene una temperatura media anual entre 12 y 18 C. La precipitación pluvial en esa subregión varía entre 600 y 1,500 mm, pero en algunas áreas, donde llueve todo el año, puede alcanzar los 3,000 mm. El siguiente clima e importancia es el semicálido subhúmedo que cubre 17.3 % de la MAO. Además ocurren otros tipos de clima en esta parte de la Mixteca pero su importancia relativa es considerablemente menor.

Cuadro 7. Unidades climáticas y Tipos de climas de la Mixteca Alta Oaxaqueña*.

Tipos climáticos	Clave	Superficie (ha)	(%)
cálido subhúmedo	Aw2(w)	21131.6	2.4
seco muy calido	BS0(h')w(w)	4857.3	0.6
seco semicalido	BS0hw(w)	3868.4	0.4
semicalido subhúmedo	A(C)w2(w)	151081.7	17.3
semifrio subhúmedo	C(E)(w2)(w)	3404.8	0.4
semiseco semicalido	BS1hw(w)	41830.7	4.8
semiseco templado	BS1kw(w)	76144.9	8.7
templado húmedo	C(m)(w)	10207.7	1.2
templado subhúmedo	C(w2)(w)	558425.2	64.1

Fuente: INEGI, 1998. Unidades climáticas.

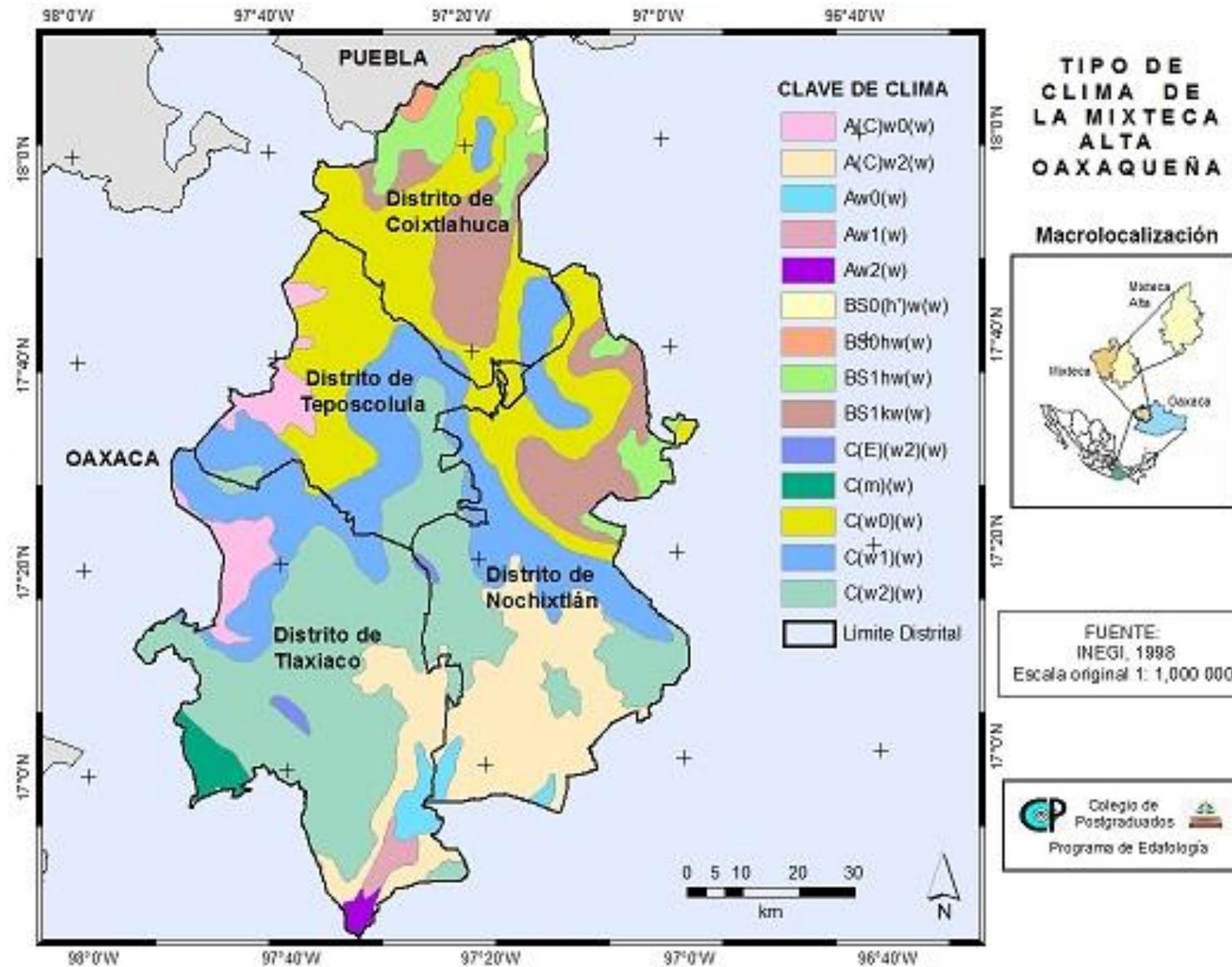


Figura 7. Tipos de clima de la Mixteca Alta Oaxaqueña (INEGI, 1998).

Hidrología superficial

De acuerdo a CONABIO (2009) la MAO forma parte de las Regiones Hidrológicas, Medio Balsas, Río Papaloapan y Costa Chica de Guerrero (Cuadro 8) y comprende parte de las cuencas del río Balsas, Papaloapan y Río Verde. La región con mayor superficie en la MAO es la de la Costa Chica de Guerrero (46.1 %), que cubre gran parte de los distritos de Nochixtlán y Tlaxiaco (Figura 8), seguida de la de Medio Balsas (27.1%) y en menor proporción la del Río Papaloapan (26.8 %).

Cuadro 8. Regiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Región Hidrológica	Cuenca	Superficie (Ha)	Proporción (%)
Medio Balsas	Río Balsas	236285.4	27.1
Río Papaloapan	Río Papaloapan	233739.2	26.8
Costa Chica de Guerrero	Río Verde	400927.6	46.1

Las Regiones Hidrológicas a su vez se dividen en Sub regiones hidrológicas, su distribución y área se muestran en el Cuadro 9, Figura 9 (CONABIO, 2009). La mayor superficie del área la cubre la subregión Sordo-Peñoles (40.2%) abarcando parte de tres de los cuatro distritos que conforman la MAO, seguida de la Subregión del Papaloapan (25.7 %).

Cuadro 9. Subregiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Subregión Hidrológica	Tipo	Superficie (ha)	Proporción (%)
Esmeralda	Microcuenca	13065.1	1.5
Huajuapan	Subcuenca	1304.2	0.1
Mixtepec	Subcuenca	99254.5	11.4
Oaxaca	Microcuenca	489.8	0.06
Papaloapan	Cuenca	224158.8	25.7
Río Putla o de la Cucaracha	Subcuenca	11144.1	1.3
Santiago Teotongo	Subcuenca	34388.6	3.9
Sordo-Peñoles	Subcuenca	350264.2	40.2
Tezoatlan	Subcuenca	11262.4	1.3
Xatan	Subcuenca	12486.5	1.4
Yutama	Microcuenca	16784.3	1.9
Acatitlan – Acatepec		0.8	0.00
Río del Oro		89914.5	10.3

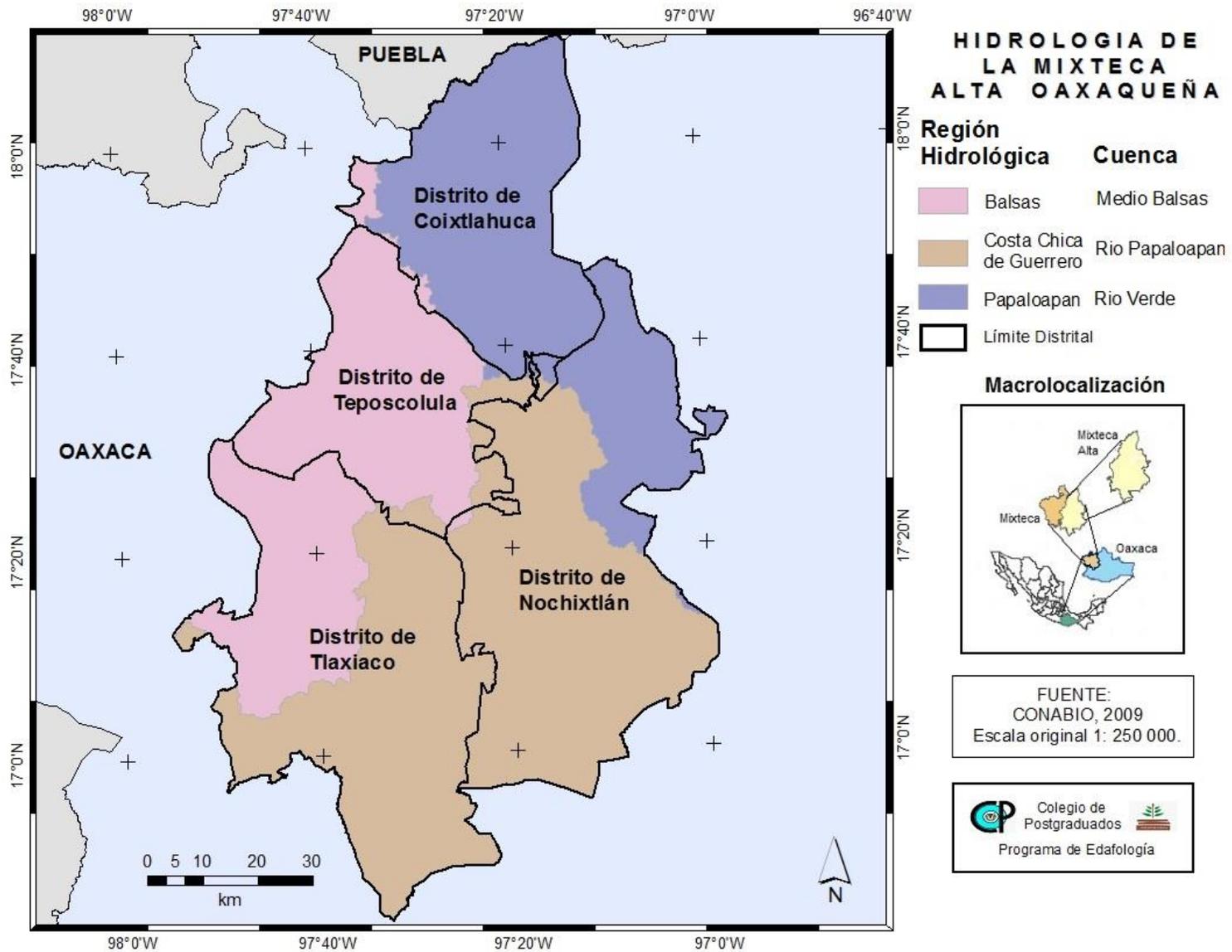


Figura 8. Regiones Hidrológicas de la Mixteca Alta Oaxaqueña (CONABIO, 2009).

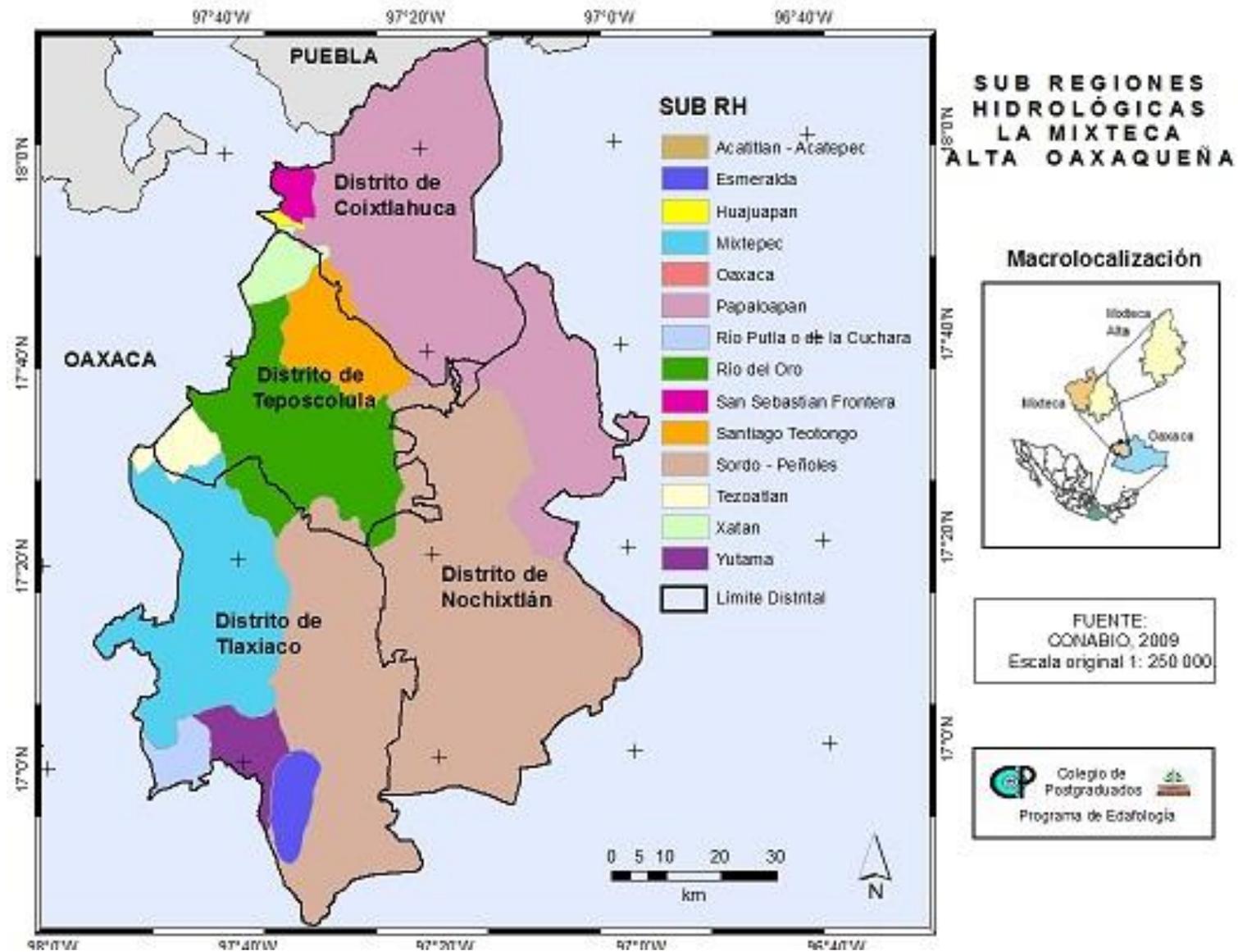


Figura 9. Subregiones Hidrológicas superficial de la Mixteca Alta Oaxaqueña (CONABIO, 2009).

Suelos

Los suelos del área se muestran en la Figura 10 (INEGI, 2006; IUSS Working Group WRB, 2014). En el Cuadro 10 se detallan la superficie cubierta por los diferentes grupos de suelo, se observa que dominan los Leptosoles (48.74%) que son característicos de la zona, hacia el sur oeste de la región hay más presencia de Regosol (28.54%), se tienen áreas importantes de Feozem (9.92%) y en menor proporción Cambisoles (4.12%), en menos del 3% los Luvisoles, Leptosol rendzico y Vertisoles. La mayoría de los suelos son de textura media, sólo con algunas porciones de texturas finas y gruesas. En general, la mayor parte de la zona presenta fase lítica y solo el Vertisol presenta fase pedregosa.

Cuadro 10. Tipo de suelo de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Tipo	Superficie (ha)	Proporción (%)
Cambisol	35921.1	4.1
Castañozem	30019.7	3.4
Feozem	6370.7	9.9
Leptosol	424480.9	48.7
Luvisol	14286.9	1.6
Regosol	248529.1	28.5
Leptosol réndzico	12184.8	1.4
Vertisol	19158.9	2.2

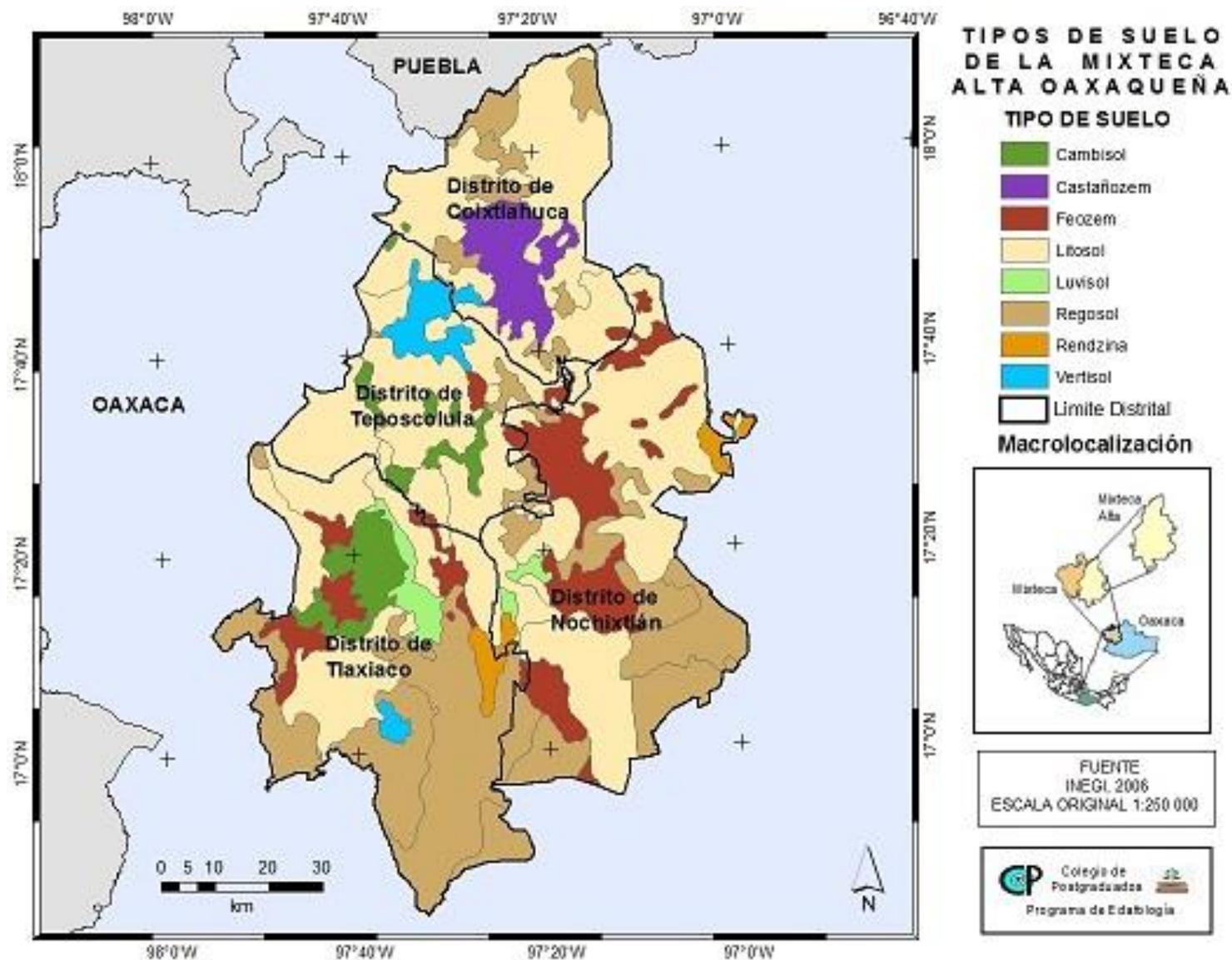


Figura 10. Unidades de suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña (INEGI, 2008).

Uso de Suelo y Vegetación

En la Figura 11 se muestra la distribución del uso del suelo y la vegetación de acuerdo a las Serie V (INEGI, 2012) y en el Cuadro 11 se muestra el área del uso de suelo y la vegetación.

Cuadro 11. Uso del suelo y vegetación de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Uso del Suelo y Vegetación	Superficie (Ha)	Proporción (%)
agricultura de riego	6072.7	0.7
agricultura de temporal	232490.6	26.7
asentamientos humanos	993.7	0.1
bosque de encino	180703.7	20.7
bosque de encino-pino	38577.3	4.4
bosque de pino	48987.2	5.6
bosque de pino – encino	94886.4	10.9
bosque de táscate	3261.9	0.4
bosque mesofilo de montaña	5478.6	0.6
Chaparral	16550.1	1.9
cuerpo de aga	16.0	0.0
matorral crasicaule	473.7	0.1
matorral desertico rosetofilo	1275.1	0.1
palmar inducido	19080.6	2.2
pastizal inducido	173660.2	19.9
Sabanoide	149.1	0.002
selva baja caducifolia	44484.1	5.1
sin vegetación aparente	3811.1	0.4

La mayoría de la superficie de la región la cubre el uso de suelo de agricultura de temporal (26.7 %) y solo el 0.7 % es de agricultura de riego. La primera vegetación de importancia es el bosque de encino (20.7 %), seguido del pastizal inducido (19.9 %) y se aprecia la mezcla de pino-encino (10.9 %). El bosque de pino y la selva baja caducifolia cubren casi la misma extensión (5.6 y 5.1 %, respectivamente).

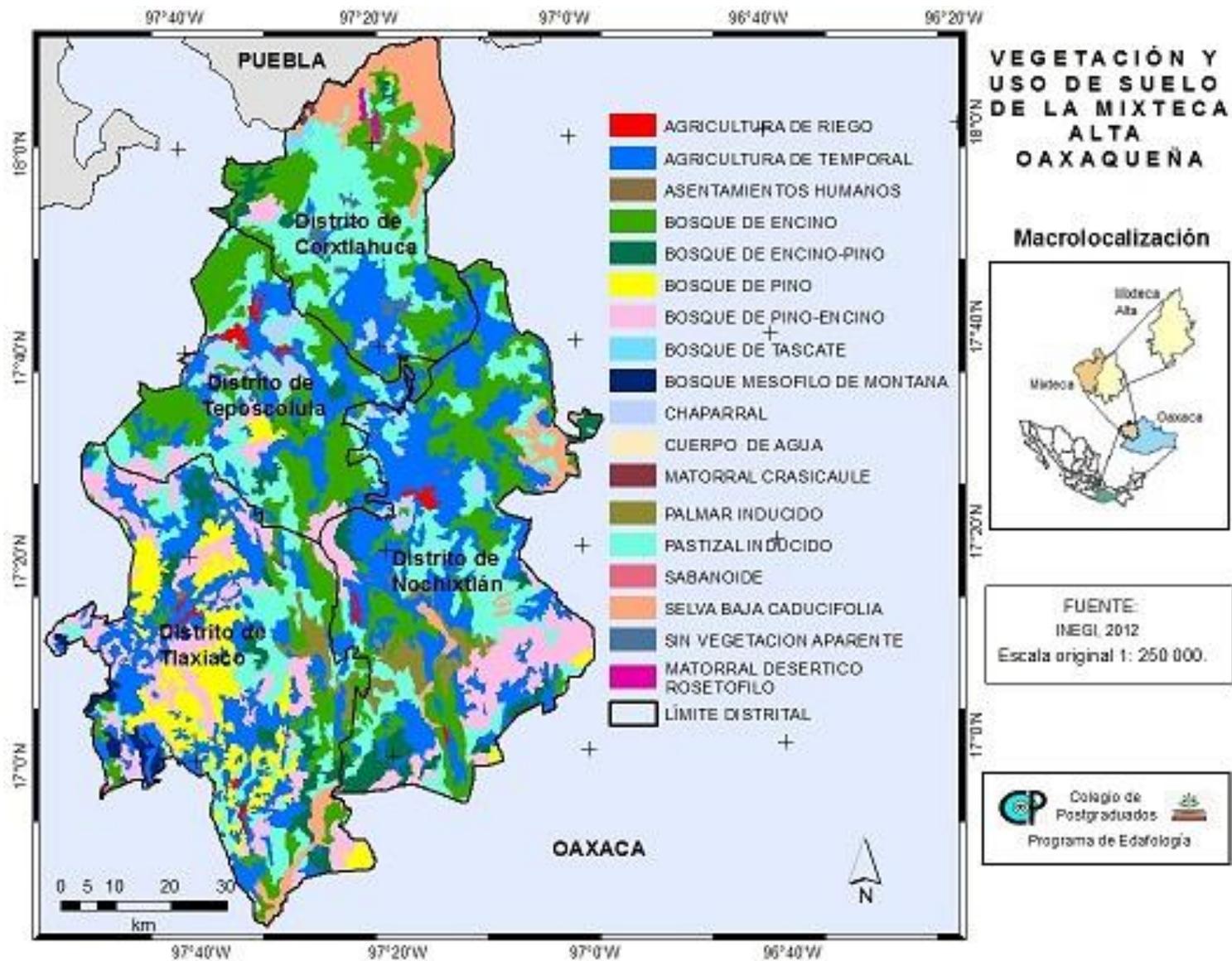


Figura 11. Uso de suelo y vegetación de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Erosión Actual

En el Cuadro 12 se muestran los tipos de erosión y área que abarcan en la Mixteca Alta Oaxaqueña, como están distribuidos se observa en la Figura 12.

Cuadro 12. Grado y Porcentaje de Erosión de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Grado de erosión	Superficie (Ha)	Proporción (%)
EXTREMA	169801.2	19.5
FUERTE	26096.3	3.0
LEVE	398715.8	45.8
MODERADA	50696.3	5.8
NO APLICA	225642.6	25.9

La mayoría del territorio (45.8%) presenta erosión leve, sin embargo un 19.5% presenta erosión extrema, sumado a la erosión fuerte (3.0 %) el área más erosionada representa 22.5 % de la superficie, es decir la cuarta parte de la región. Las áreas con mayor erosión se distribuyen en toda la región, sin embargo se observa más concentración en los distritos de Coixtlahuaca y Nochixtlán (Figura 12).

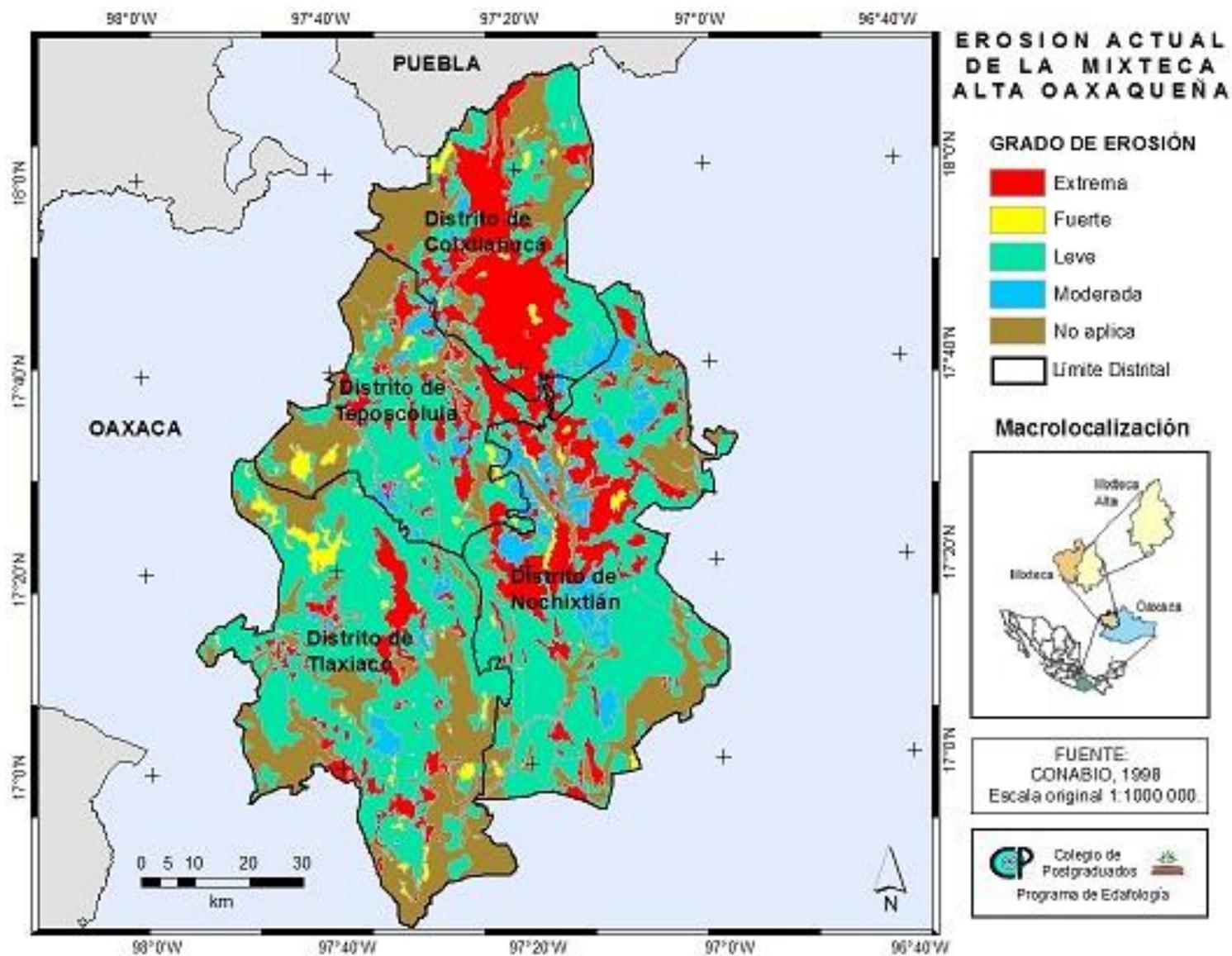


Figura 12. Grado de Erosión Actual en la Mixteca Alta Oaxaqueña (CGG-SAGARPA-2009).

Degradación

El nivel de degradación, tipo y causa de la degradación del suelo en la MAO, se observa en las Figuras 13, 14 y 15. El área que abarcan se reporta en los Cuadros 13, 14 y 15 (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002). Los niveles de afectación de la degradación del suelo están evaluados en términos de la reducción de la productividad biológica de los terrenos y considera cuatro niveles (Cuadro, 13). En la mayoría de la MAO (78.8%) el nivel de afectación es ligero lo cual se traduce en una reducción apenas perceptible de su productividad, seguido de un nivel moderado en un 11.3 % de la MAO aunque en un 9.5 % se reporta como extremo.

Cuadro 13. Nivel de afectación de la degradación del suelo en la MAO.

Grado de degradación	Superficie (Ha)	Proporción (%)
Ligero	686012.8	78.8
Moderado	98034.7	11.3
Fuerte	4572.6	0.5
Extremo	82341.8	9.5

Respecto al tipo de degradación, dentro de la MAO se tienen cinco tipos (Cuadro 14), de los cuales la erosión hídrica con pérdida de suelos es la que abarca más superficie de la MAO (29 %), de igual representatividad es la erosión hídrica con deformación del terreno y las áreas estables bajo condiciones naturales (10.5 y 10.2 % respectivamente). El 9.5 % del área de la MAO presenta degradación con declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica.

Cuadro 14. Tipo de Degradación en la MAO.

Tipo de degradación	Superficie (Ha)	Proporción (%)
Compactación	8594.3	1.0
Erosión hídrica con deformación del terreno	91649.7	10.5
Erosión hídrica con pérdida del suelo	258880.9	29.7
Declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica	82341.9	9.5
Estable bajo condiciones naturales	88910.6	10.2

Las causas del tipo de degradación se detallan en el Cuadro 15. La principal causa de degradación en la MAO es el sobrepastoreo (12.0 %) seguido de la sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico (7.1 %), los principales efectos son a compactación y la disminución de la cubierta vegetal provocando erosión por agua y viento (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002).

Cuadro 15. Causa de Degradación en la MAO.

Clave del factor Causativo	Descripción del factor Causativo de degradación	Superficie (Ha)	Proporción (%)
A	Actividades agrícolas	59524.9	6.8
A/E	Actividades agrícolas / Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico	4122.3	0.5
A/F	Actividades agrícolas / Deforestación y remoción de la vegetación	17347.1	2.0
A/G	Actividades agrícolas / Sobrepastoreo	19680.7	2.3
E/A	Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico/ actividades agrícolas	62162.9	7.1
E/F	Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico/ Deforestación y remoción de la vegetación	8300.5	1.0
E/G	Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico/Sobrepastoreo	12061.9	1.4
F	Deforestación y remoción de la vegetación	7295.9	0.8
F/A	Deforestación y remoción de la vegetación/ Actividades agrícolas	56067.9	6.4
F/E	Deforestación y remoción de la vegetación para uso doméstico	16656.9	1.9
F/G	Deforestación y remoción de la vegetación/ sobrepastoreo	11192.9	1.3
G	Sobrepastoreo	104472.2	12.0
G/A	Sobrepastoreo/ Actividades agrícolas	40759.9	4.7
G/E	Sobrepastoreo/ Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico	23369.2	2.7
G/F	Sobrepastoreo/ Deforestación y remoción de la vegetación	5021.4	0.6
S/N	Sin información disponible	422926.4	48.6

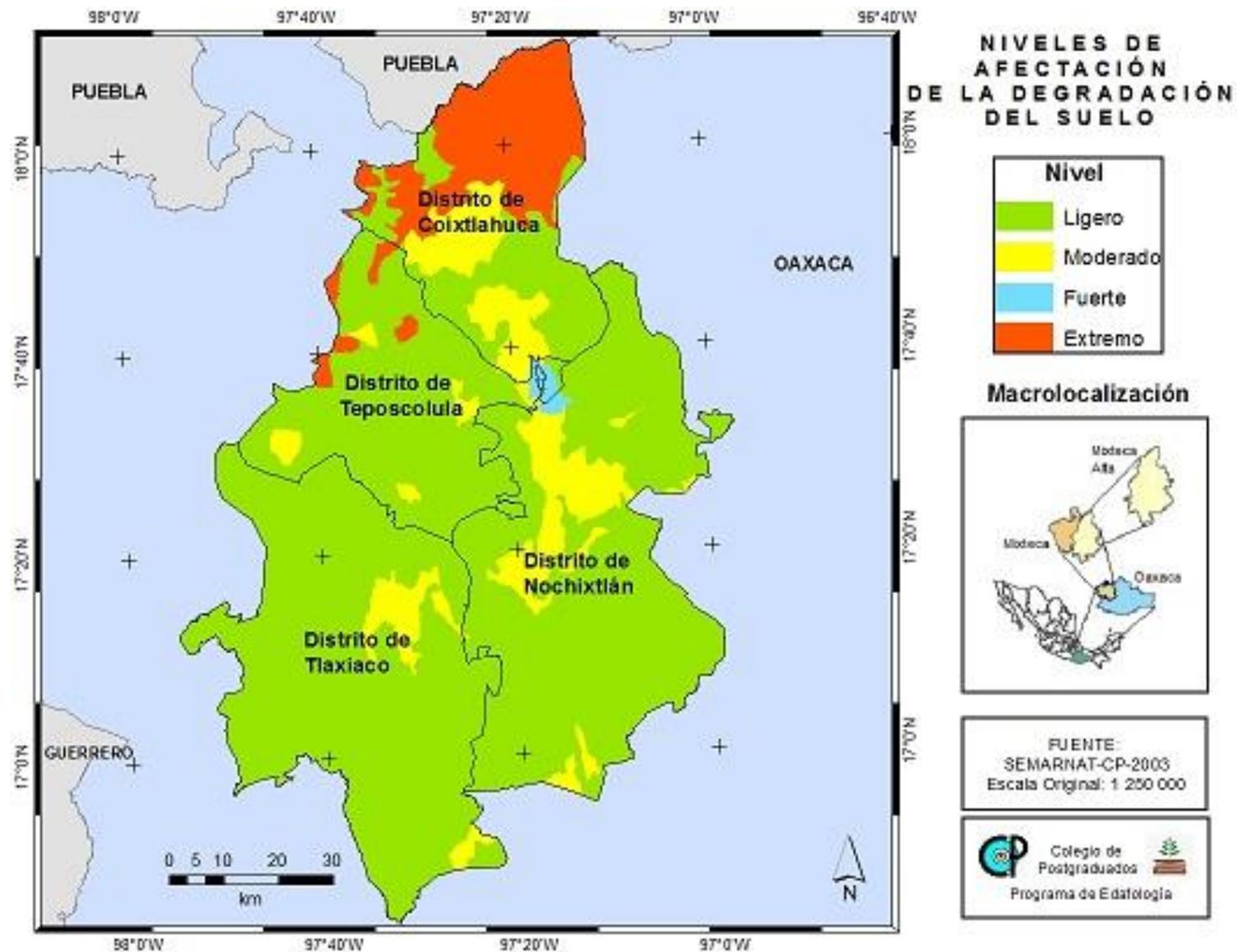


Figura 13. Grado de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

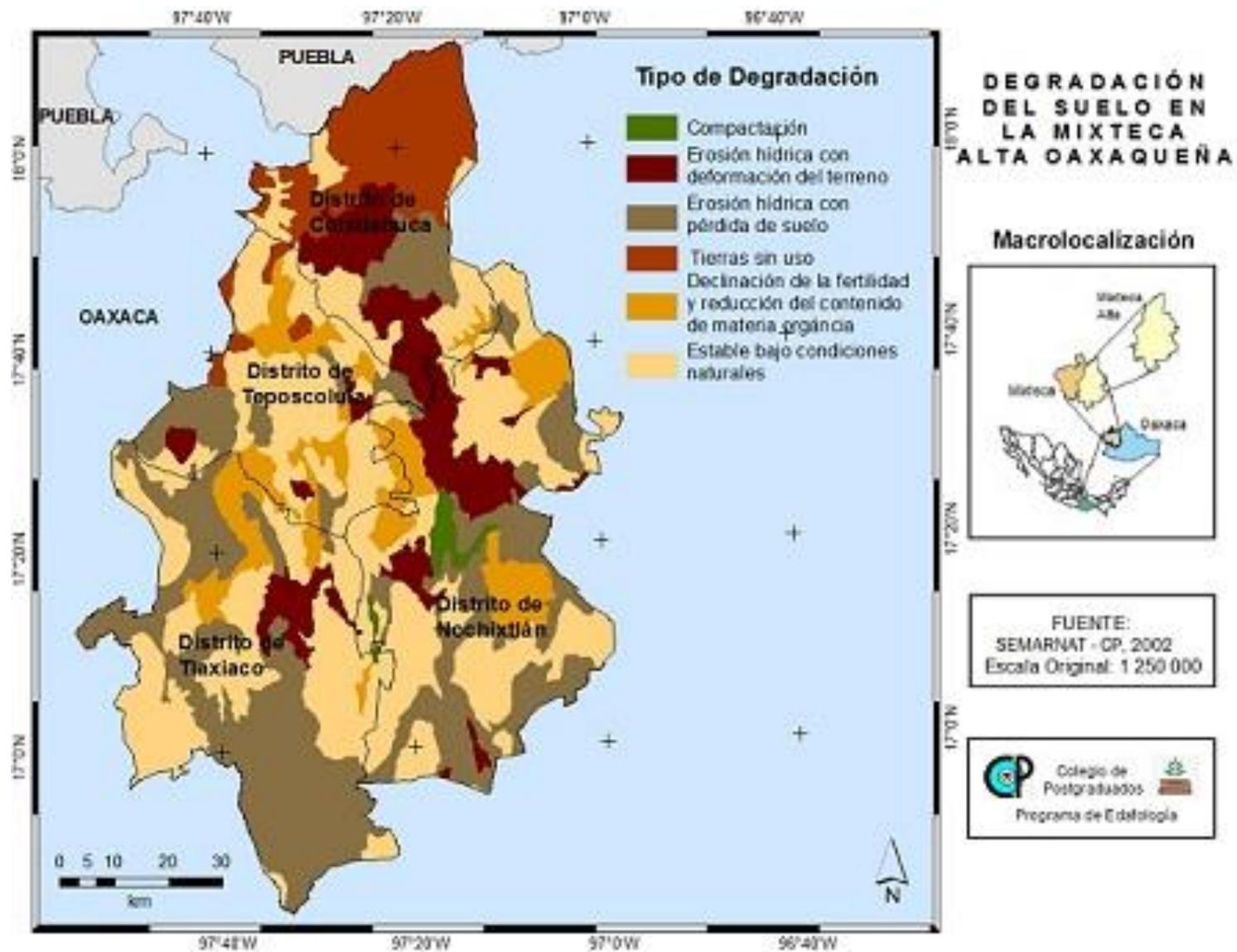


Figura 14. Tipo de de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

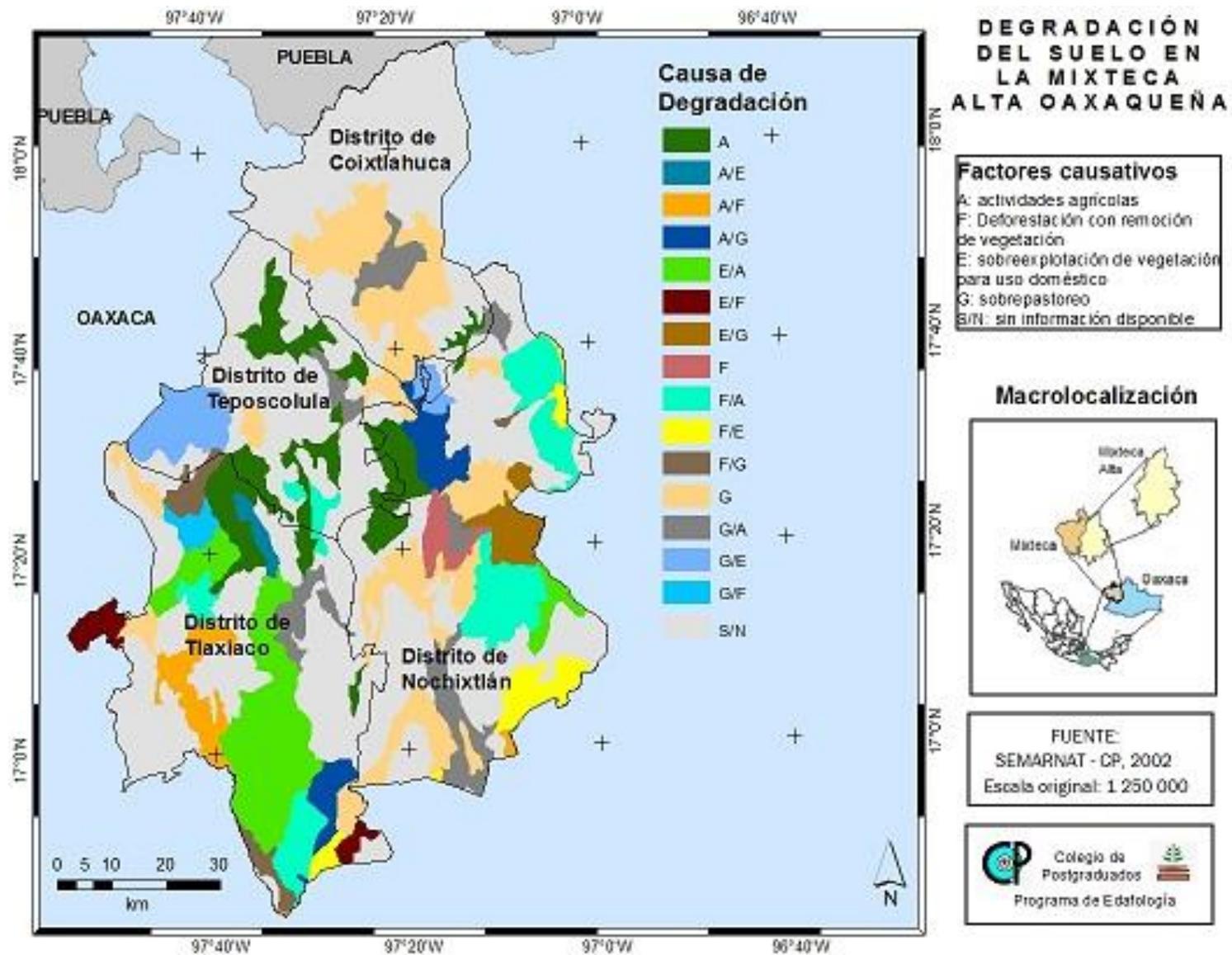


Figura 15. Causa de Degradación de suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Caracterización del Área de Estudio

La información cartográfica disponible del área de estudio se describe a continuación, los municipios que comprenden el área de estudio pertenecen a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y a las subprovincias fisiográficas de la Mixteca Alta y las Sierras Centrales de Oaxaca (Figura 16, Cuadro 16) (INEGI, 2000; INEGI 2000a). La Sierra Madre del Sur, está formada por rocas de diversa naturaleza geológica, es una Sierra muy compleja, montañosa, con predominancia de rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, constituye el parteaguas de la vertiente del Golfo y del pacífico, está considerada como la más compleja y menos conocida de todo el país (INEGI, 2000), tiene una litología muy compleja en la que las rocas intrusivas cristalinas, especialmente los granitos y las metamórficas, tienen más importancia que en la mayoría de las provincias del norte.

Cuadro 16. Fisiografía del área de estudio.

Subprovincia Fisiográfica	Área (ha)	%
Sierras Centrales de Oaxaca	23517.4	71.4
Mixteca Alta	9401.7	28.6

El clima predominante es el templado subhúmedo abarcando el 48.2 %, seguido del semiseco templado con 23.7 % del área de estudio (Figura, 17). El área que abarca cada tipo de clima se reporta en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Climas del área de estudio.

Tipo de clima	Área (ha)	%
BS1hw(w) (Semiseco semicálido)	2243.4	6.8
C(w0)(w) (Templado subúmedo)	15883.2	48.2
BS1kw(w) (Semiseco templado)	7802.1	23.7
C(w1)(w) (Templado subhúmedo)	5507.5	16.7
C(w2)(w) (Templado subhúmedo)	1428.8	4.5

El sistema de topofomas del 98% del área es Sierra, predominando la sierra de cumbres tendidas y la sierra baja compleja con cañadas (INEGI, 2000b) (Figura 18).

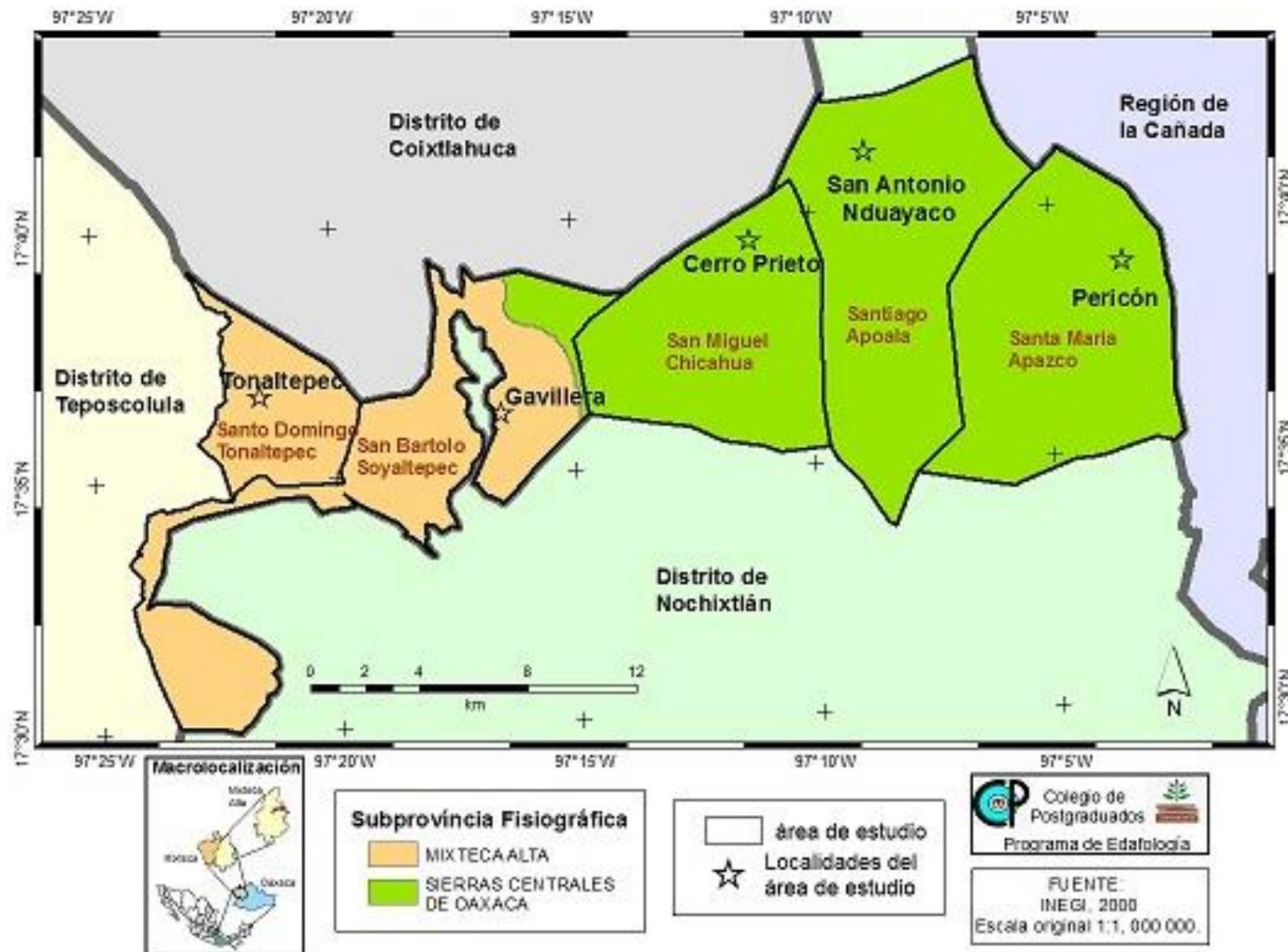


Figura 16. Subprovincias Fisiográficas del área de estudio.

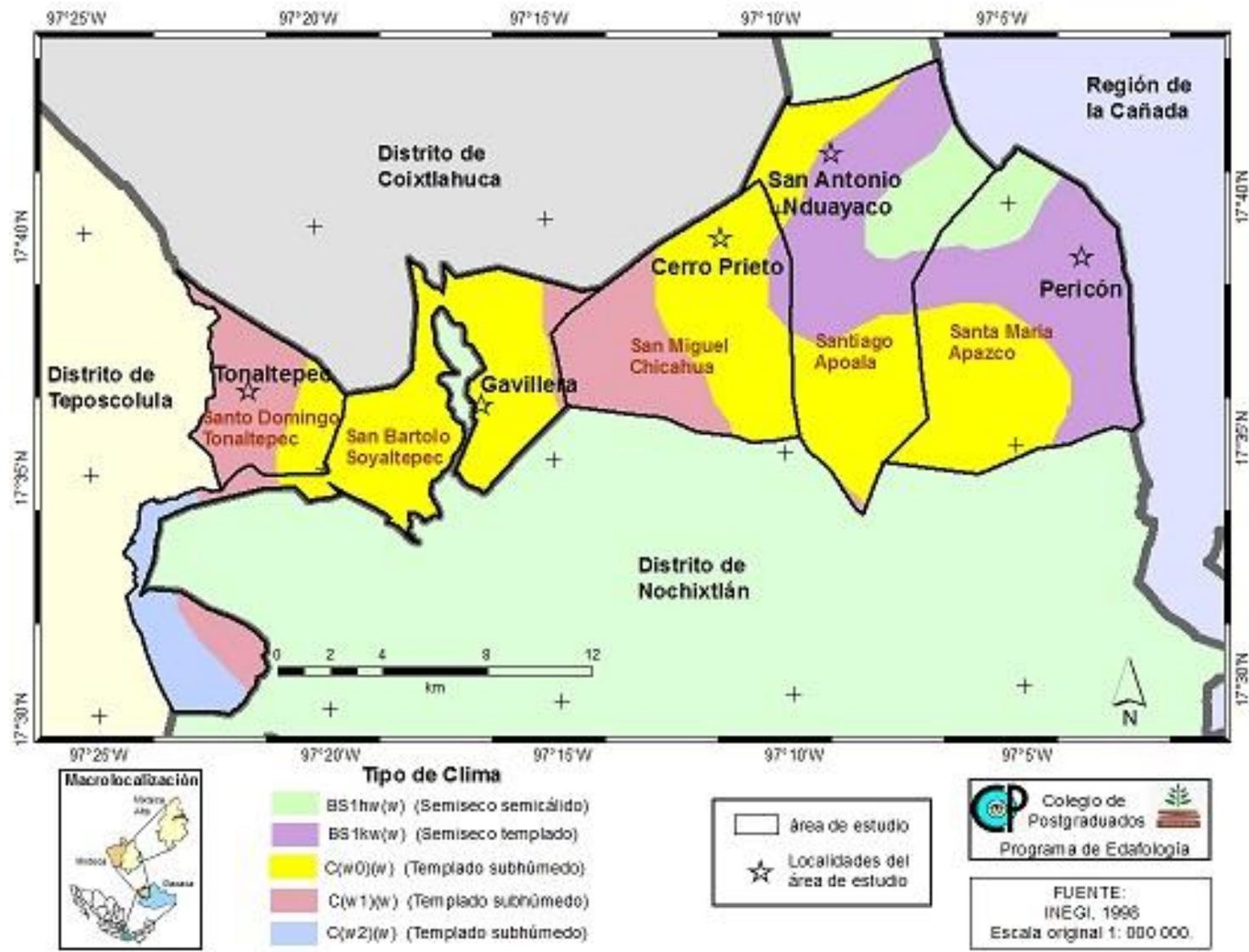


Figura 17. Tipos de clima del área de estudio.

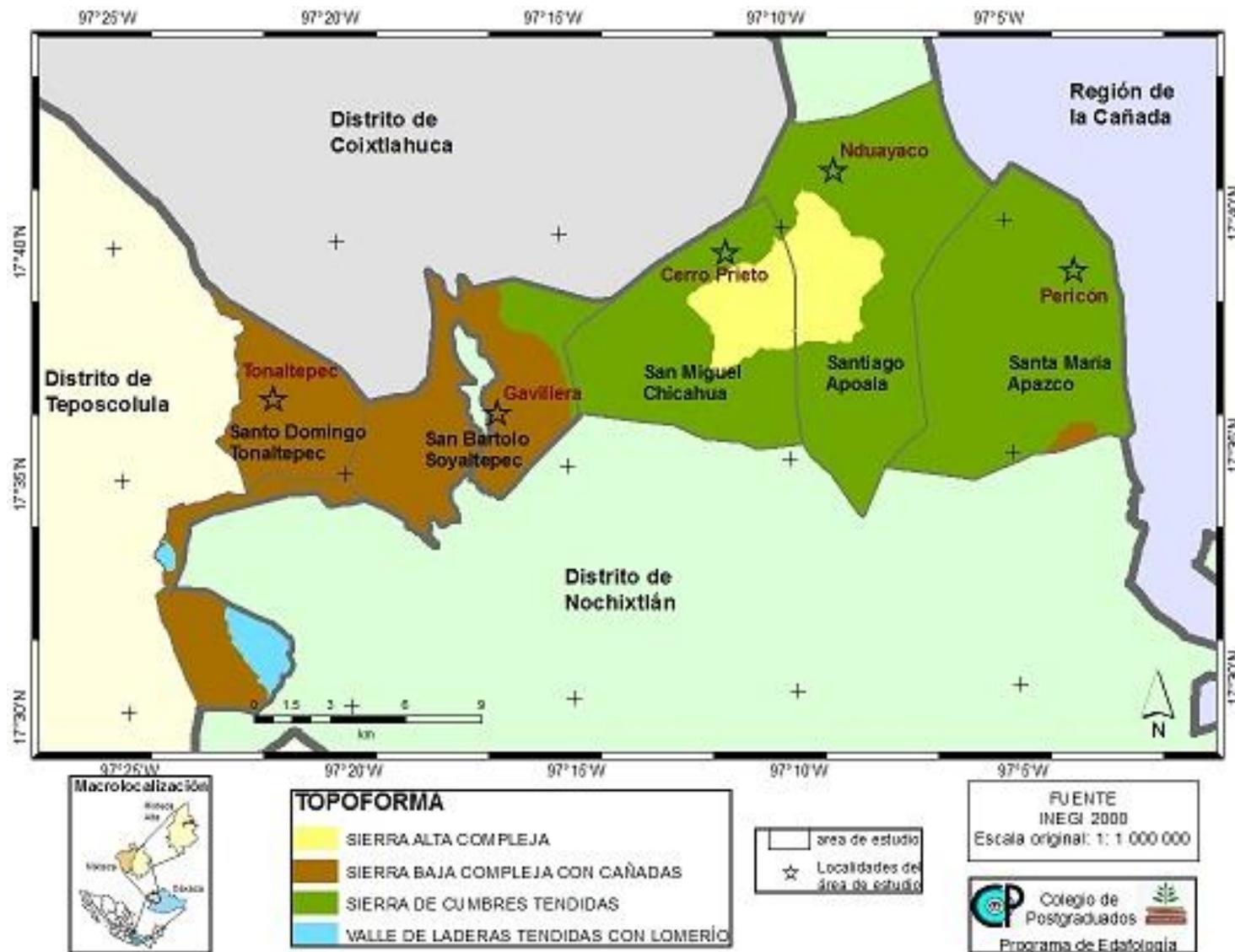


Figura 18. Topofomas del área de estudio.

El área que ocupa cada sistema de topoformas se reporta en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Topoformas del área de estudio.

Topoforma	Área (ha)	%
Sierra alta compleja	2931.51681	8.91
Sierra baja compleja con cañadas	8979.3763	27.28
Sierra de cumbres tendidas	20448.50712	62.12
Valle de Laderas tendidas con lomerío	559.6090208	1.70

El área comprende tres regiones hidrológicas (Figura 19), la Región Balsas, La Región de la Costa chica de Guerrero y parte de la del Papaloapan, predomina está última (71.5 %) (Cuadro19), abarca dos cuencas hidrológicas (Figura 20) y cuatro subcuencas (Figura 21) (INEGI-INE-CONAGUA. 2007); de las cuales la Cuenca del Río Papaloapan abarca el 71.5 % del área de estudio que su vez pertenece a la sub cuenca del Río Quiotepec.

Cuadro 19. Hidrología del área de estudio.

Región Hidrológica	Cuenca	Sub cuenca	Área (ha)	%
Papaloapan	Río Papaloapan	Río Salado	2552.2	7.8
Balsas	Río Atoyac	Río Mixteco	374.4	1.1
Papaloapan	Río Papaloapan	Río Quiotepec	23553	71.5
Costa Chica de Guerrero	Río Atoyac	Río Sordo	6439.4	19.6

La geología en el área de estudio es muy variada (Figura 22), predominan las rocas sedimentarias y en menor superficie las ígneas extrusivas (básicas), principalmente de la era del Cenozoico y Mesozoico, una pequeña área del municipio de Apazco tiene rocas del Paleozoico, de los sistemas cretácico (Caliza y caliza-lutita) y paleoceno (conglomerado) en su mayoría. En la mayoría de área de la zona de estudio predominan las rocas del tipo calizas (47.1%), seguidas por las Andesitas (11.7 %) y la asociación Caliza-lutita (10.9). En el área de estudio se presentan rocas de menor importancia en superficie, como el conglomerado, la asociación Arenisca-conglomerado y la Limolita-arenisca (Cuadro 20).

Cuadro 20. Geología del área de estudio.

Tipo de roca	Área (ha)	%
Aluvial	85.5	0.3
Andesita	3851.7	11.7
Arenisca	1262.4	3.8
Arenisca-Conglomerado	2459.4	7.5
Caliza	15516.2	47.1
Caliza-Lutita	3601.3	10.9
Conglomerado	3249.2	9.9
Gneis	596.8	1.8
Limolita-Arenisca	2187.3	6.6
Lutita-Arenisca	109.3	0.3

La vegetación del área de acuerdo a la serie V de INEGI (2012), es en su mayoría pastizal inducido (25.9 %), con una superficie apreciable (Figura 23 y Figura 24). Las áreas más conservadas están cubiertas de Encino, pino y la asociación Pino-Encino, denominadas como bosque de Encino (INEGI, 2012).

Cuadro 21. Vegetación y uso de suelo del área de estudio.

Tipo de vegetación	Área (ha)	%
Agricultura de riego anual	155.3	0.5
Agricultura de temporal anual	11282.8	34.3
Bosque de encino	6.4	0.0
Bosque de táscate	160.9	0.5
Chaparral	1.5	0.0
Pastizal inducido	8183.5	24.9
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	2533.3	7.7
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	10595.3	32.2

El uso de suelo más representativo del área de estudio está clasificado como pastizal inducido, una parte importante es agricultura de temporal y bosque de encino (Figura 25).

Los suelos en el área de estudio corresponden a cinco grupos principales de suelo en base a la WRB, predominando los Luvisoles, secundados por los Phaeozem y en menor superficie los Leptosoles (INEGI, 2006, IUSS Working Group WRB, 2014) (Cuadro, 22).

Los Luvisoles son suelos arcillosos mayormente en el subsuelo que en la superficie y ocurren en superficies jóvenes, la mayoría son fértiles pero los que contienen cantidades elevadas de limo, son susceptibles a la al deterioro de su estructura, en pendientes pronunciadas requieren medidas de control de la erosión, en esta región son cálcicos o crómicos, el grupo de los Regosoles, son suelos minerales muy débilmente desarrollados, extendidos en tierras erosionadas y de formación incipiente, son comunes en regiones montañosas y no presentan horizontes de diagnóstico, tienen muy baja capacidad de retención de agua; los Leptosoles se caracterizan por ser delgados y comunes en regiones montañosos, sobre roca calcárea pertenecen a Leptosol Réndzico (IUSS Working Group WRB, 2014).

Cuadro 22. Tipo de suelo del área de estudio.

Grupo	Área (ha)	%
Fluvisol	250.8	0.8
Leptosol	9169.0	27.8
Luvisol	13947.9	42.3
Vertisol	103.6	0.3
Phaeozem	8209.3	24.9
Regosol	1256.4	3.8

De acuerdo al último estudio de erosión en México, realizado por el grupo de trabajo conformado por el CGP-SAGARPA-CP-CONAFOR (2009), el área seleccionada presenta en su mayoría erosión leve (47.7 %) (Cuadro 23), que corresponde a las áreas boscosas, pero las áreas que presentan erosión de moderada a extrema son considerables (Figura 26). Todas las comunidades seleccionadas, se encuentran en áreas donde la erosión es de moderada a extrema.

Cuadro 23. Erosión del área de estudio.

Grado	Área (ha)	%
Extrema	7714.7	23.4
Fuerte	547.3	1.7
Leve	15691.4	47.7
Moderada	5485.1	16.7
No aplica	3480.5	10.5

De acuerdo a la Figura 27, 88.5 % (29146.6 has) presentan degradación ligera (Cuadro 24).

Cuadro 24. Nivel de degradación del área de estudio.

Nivel de afectación de la degradación del suelo	Área (ha)	%
Ligero	29146.6	88.5
Moderado	1294.8	4.0
Fuerte	2477.6	7.5

El tipo y las causas de la degradación del suelo, se describen en el Cuadro 25. El principal tipo de degradación es el químico con declinación en la fertilidad del suelo y un decremento en el contenido de la materia orgánica y las causas principales son la deforestación con remoción de vegetación y las actividades agrícolas (28.6 %) (Figura, 28).

La mayor parte del área de estudio se clasifica como estable en condiciones naturales, y una parte importante (22 % aproximadamente) presenta problemas de erosión hídrica y por viento con pérdida y/o deformación del suelo causados principalmente por sobrepastoreo, sobreexplotación de vegetación para uso doméstico y actividades agrícolas.

Cuadro 25. Tipo de degradación del suelo del área de estudio.

Clave	Descripción	Superficie (Ha)	Proporción (%)
HC/G	Erosión hídrica con deformación del terreno/ Sobrepastoreo	2216.6	6.7
HC/G/A	Erosión hídrica con deformación del terreno/ Sobrepastoreo/actividades agrícolas	161.7	0.5
HC/A/G	Erosión hídrica con deformación del terreno/ actividades agrícolas/Sobrepastoreo	908.1	2.8
HC/G/E	Erosión hídrica con deformación del terreno/Sobrepastoreo/Sobreexplotación de vegetación para uso doméstico	2477.6	7.5
HS/F/E	Erosión hídrica con pérdida del suelo superficial/Deforestación con remoción de vegetación / Sobreexplotación de vegetación para uso doméstico	745.2	2.3
HS/G	Erosión hídrica con pérdida del suelo superficial/Sobrepastoreo	2722.0	8.3
HS/G/A	Erosión hídrica con pérdida del suelo superficial/Sobrepastoreo/Actividades agrícolas	1332.9	4.1
QD/F/A	Declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica/Deforestación con remoción de vegetación/Actividades agrícolas	9402.9	28.6
QD/A	Declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica/Actividades agrícolas	1461.1	4.4
SN	Estable en condiciones naturales	11490.7	34.8

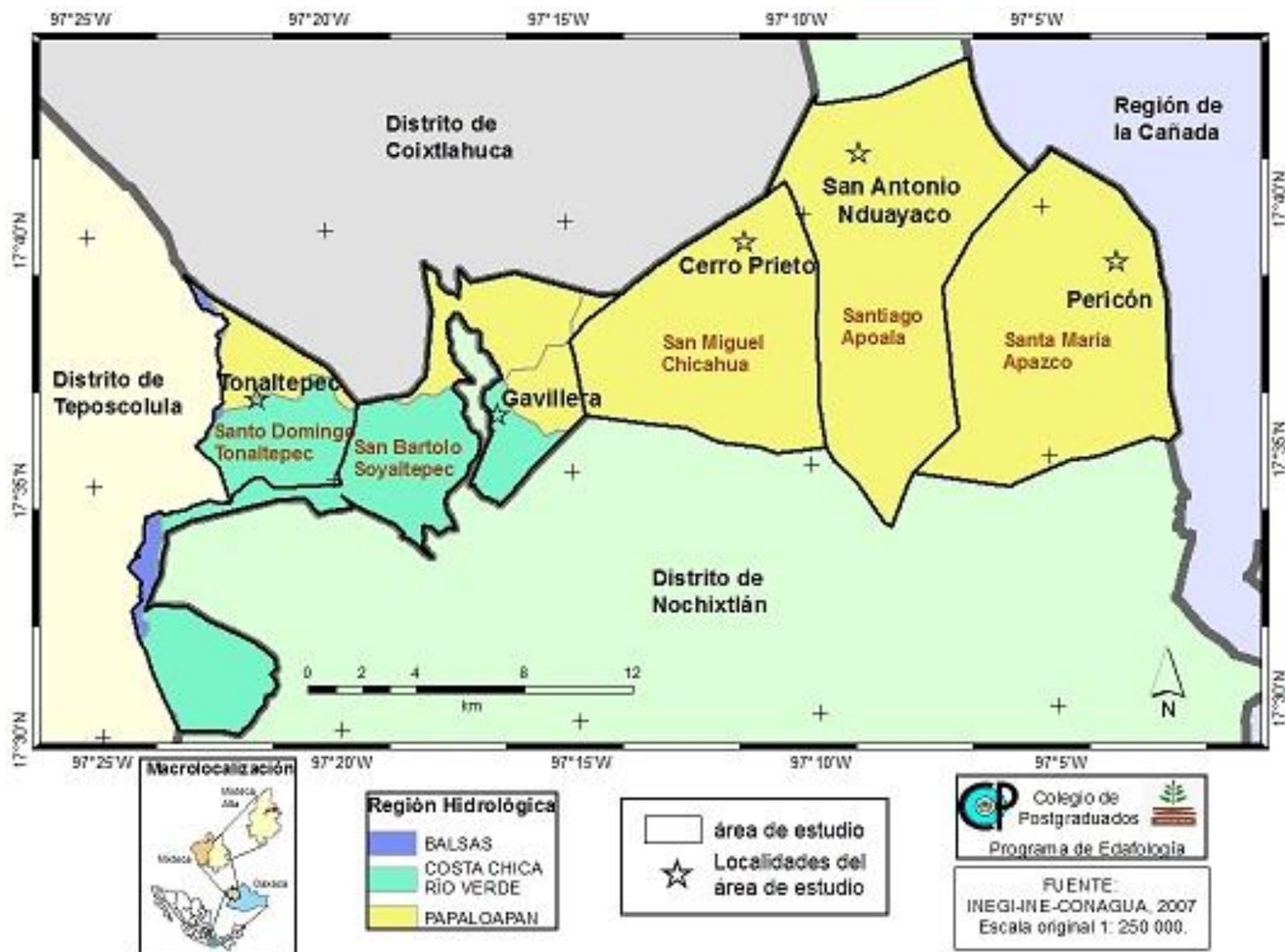


Figura 19. Regiones hidrológicas del área de estudio.

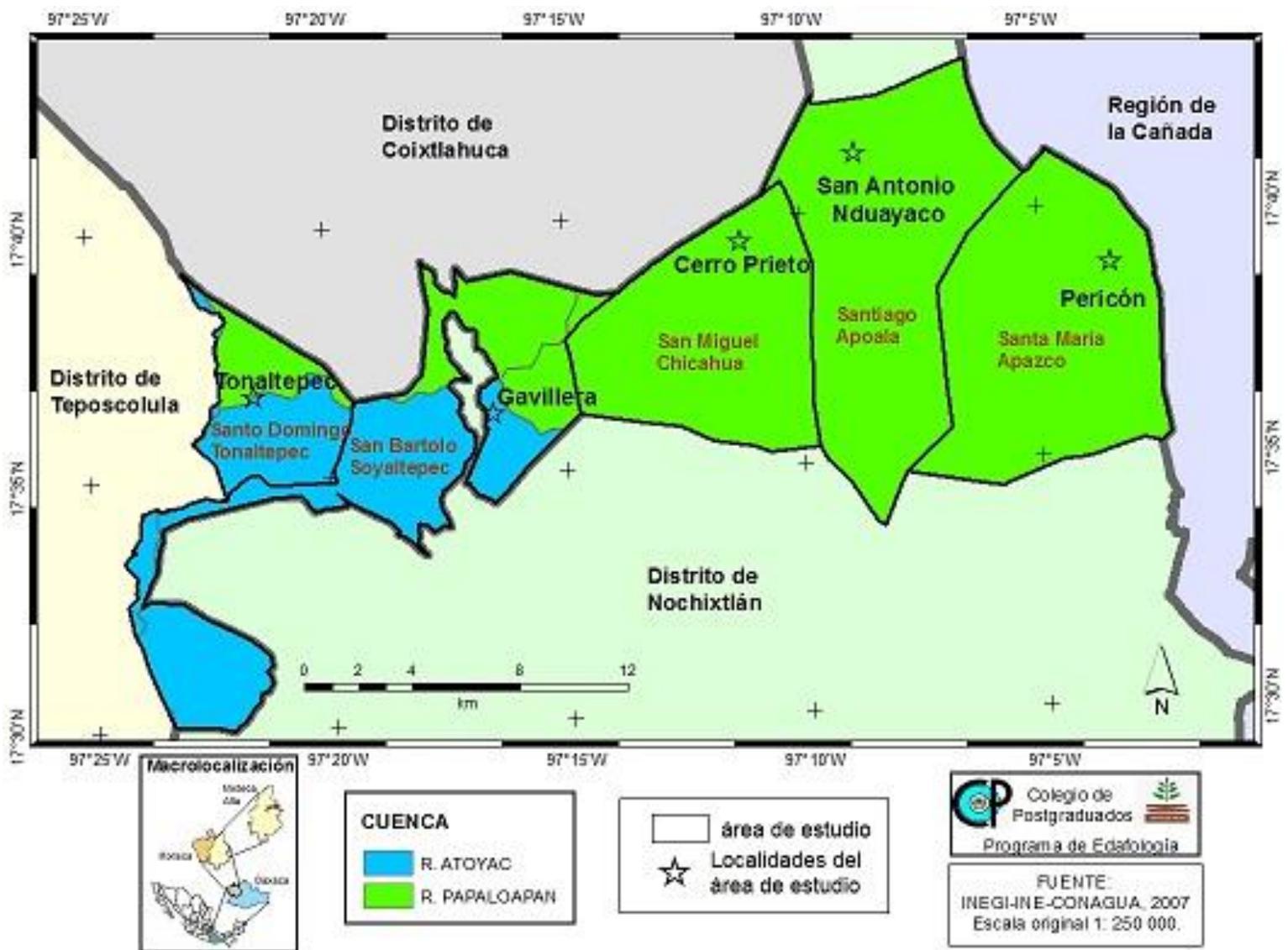


Figura 20. Cuencas hidrológicas del área de estudio.

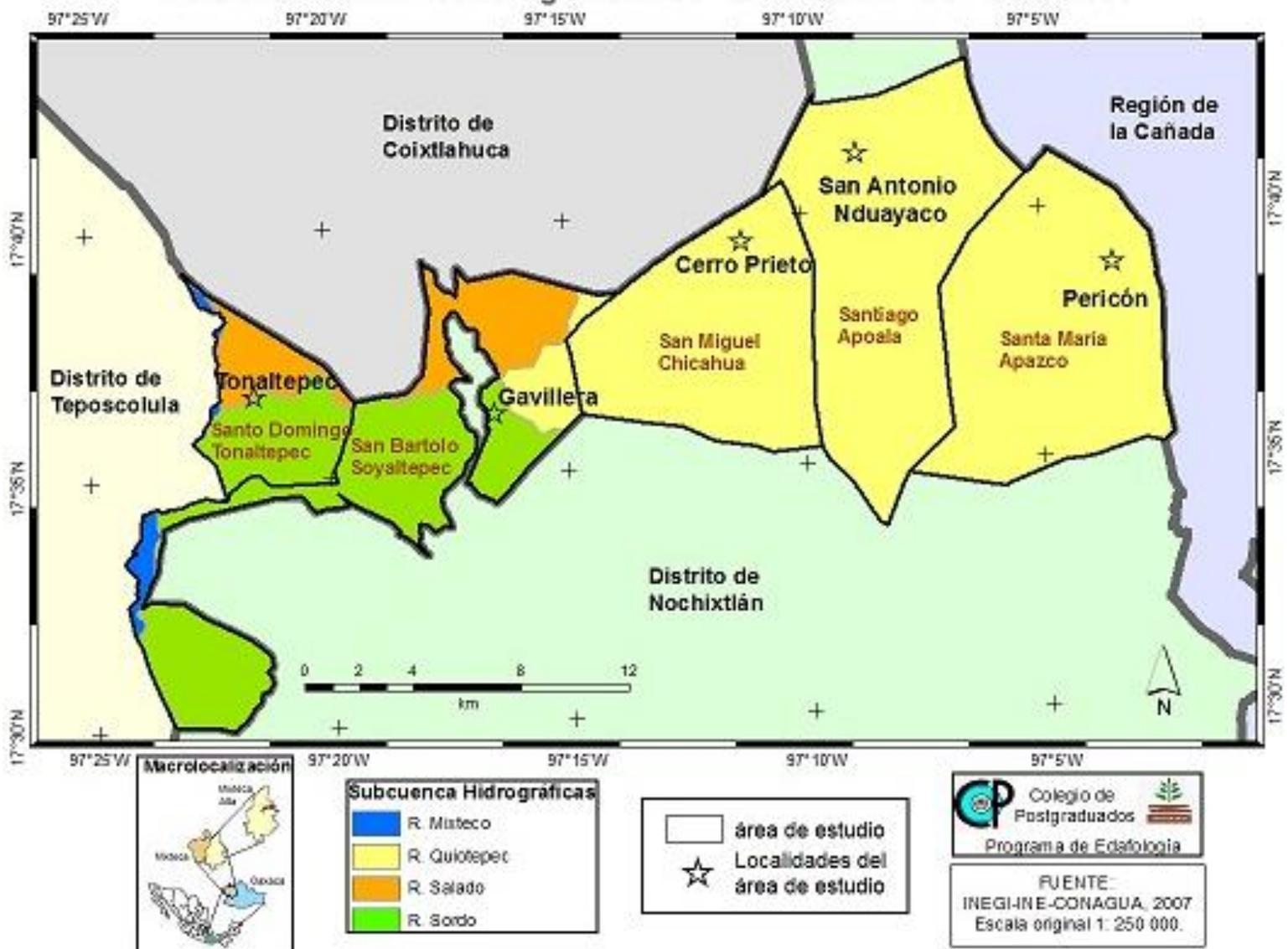


Figura 21. Subcuencas hidrológicas del área de estudio.

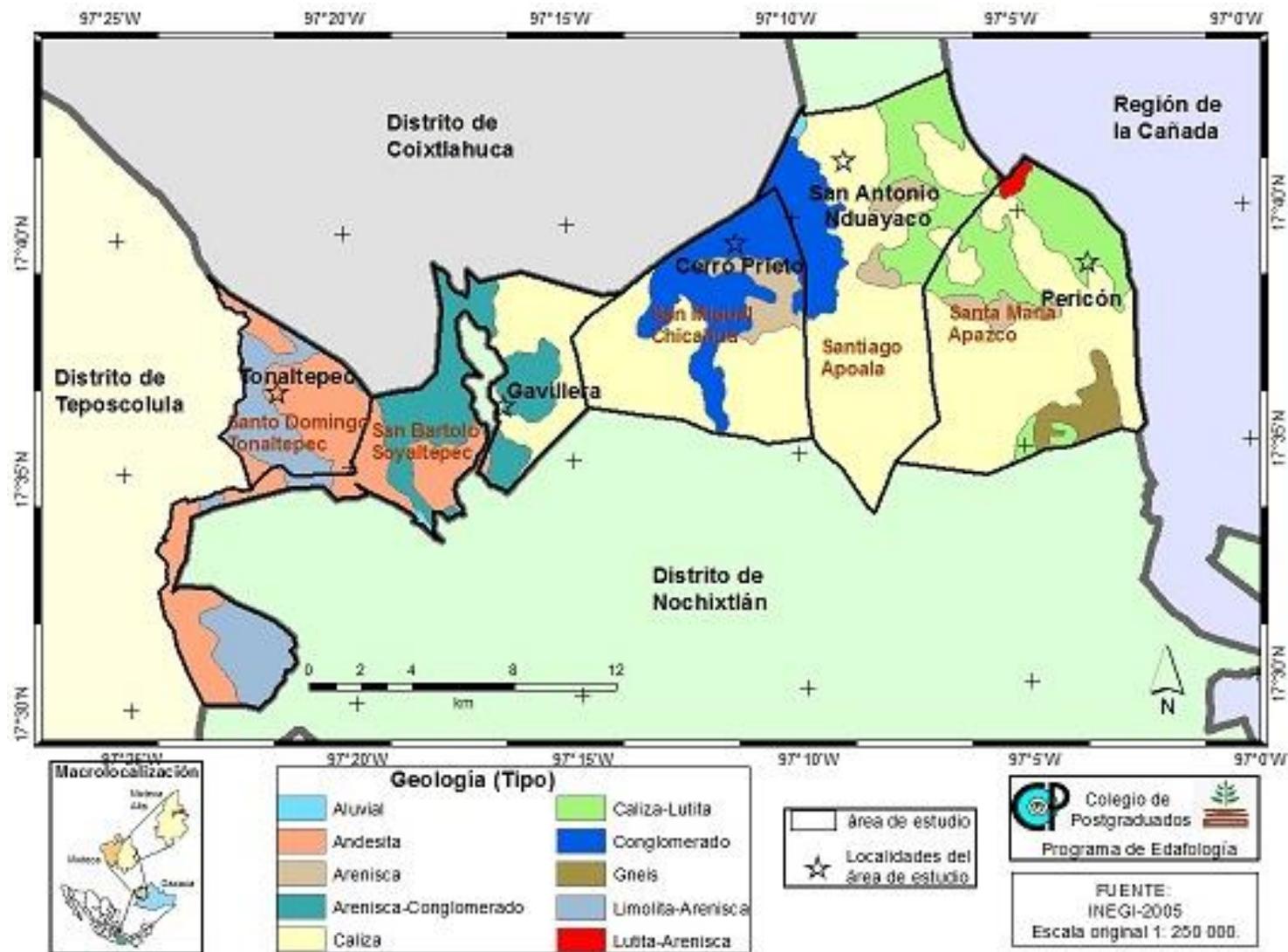


Figura 22. Geología del área de estudio.

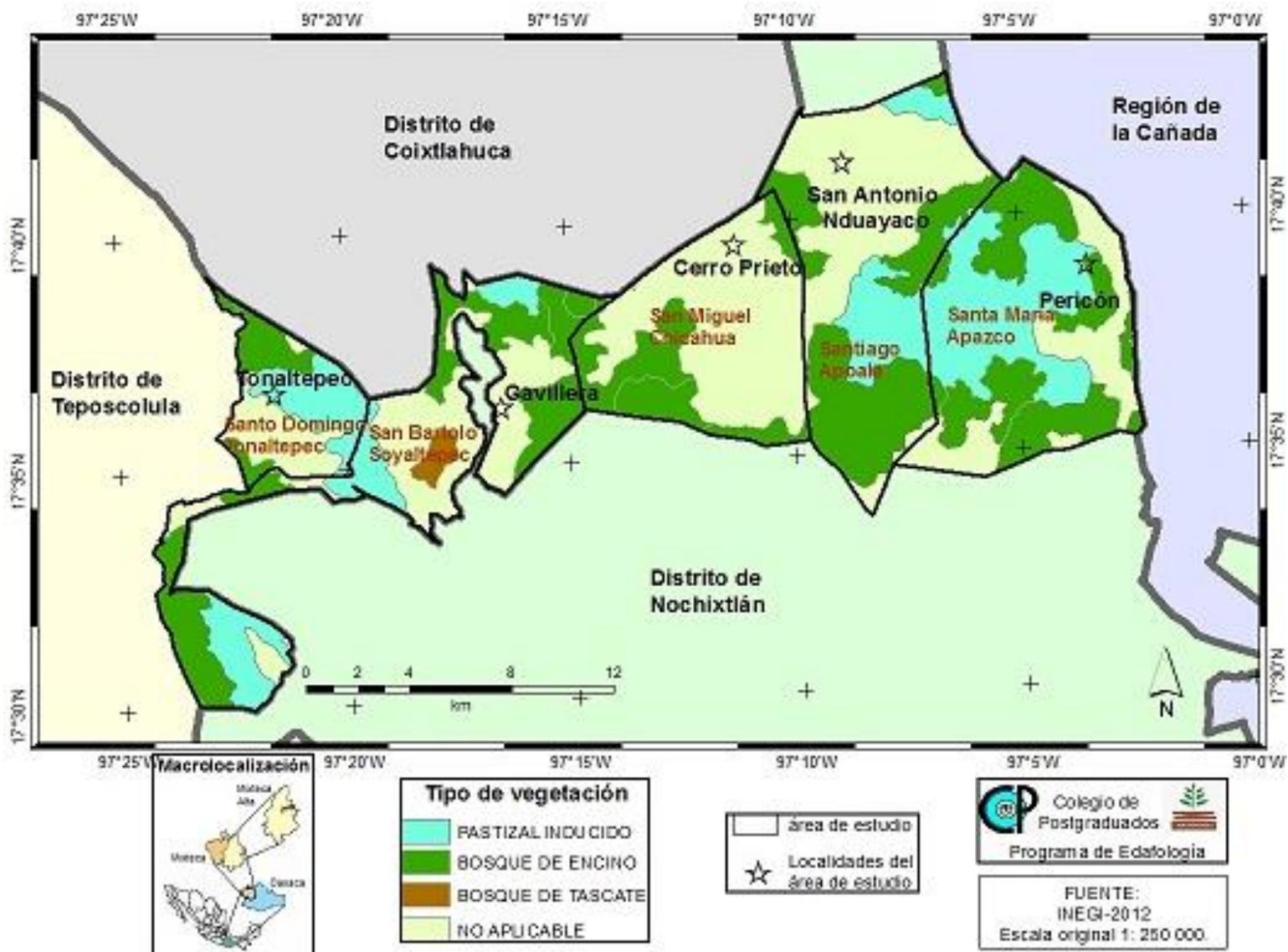


Figura 23. Vegetación del área de estudio.

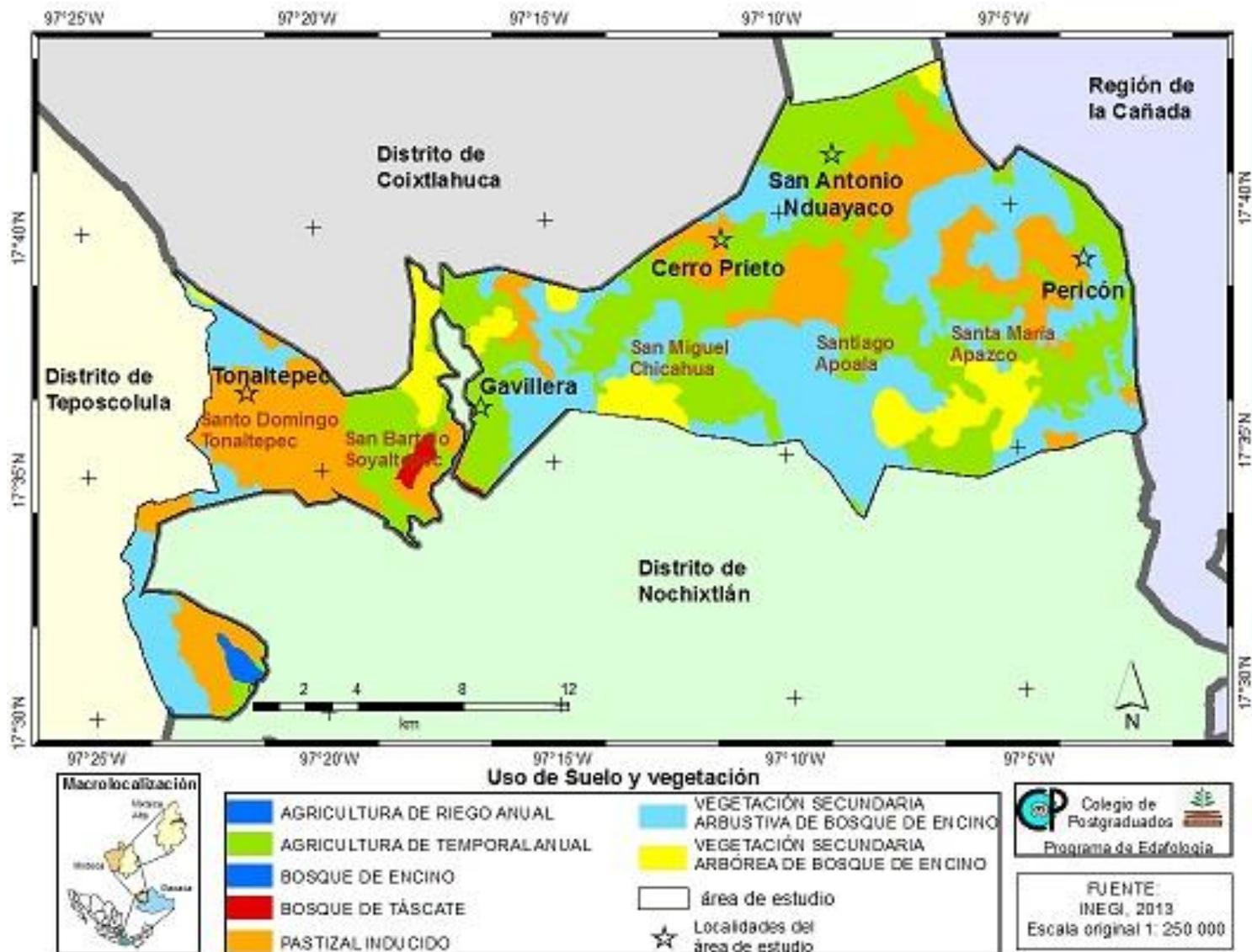


Figura 24 Vegetación y Uso de Suelos del área de estudio.

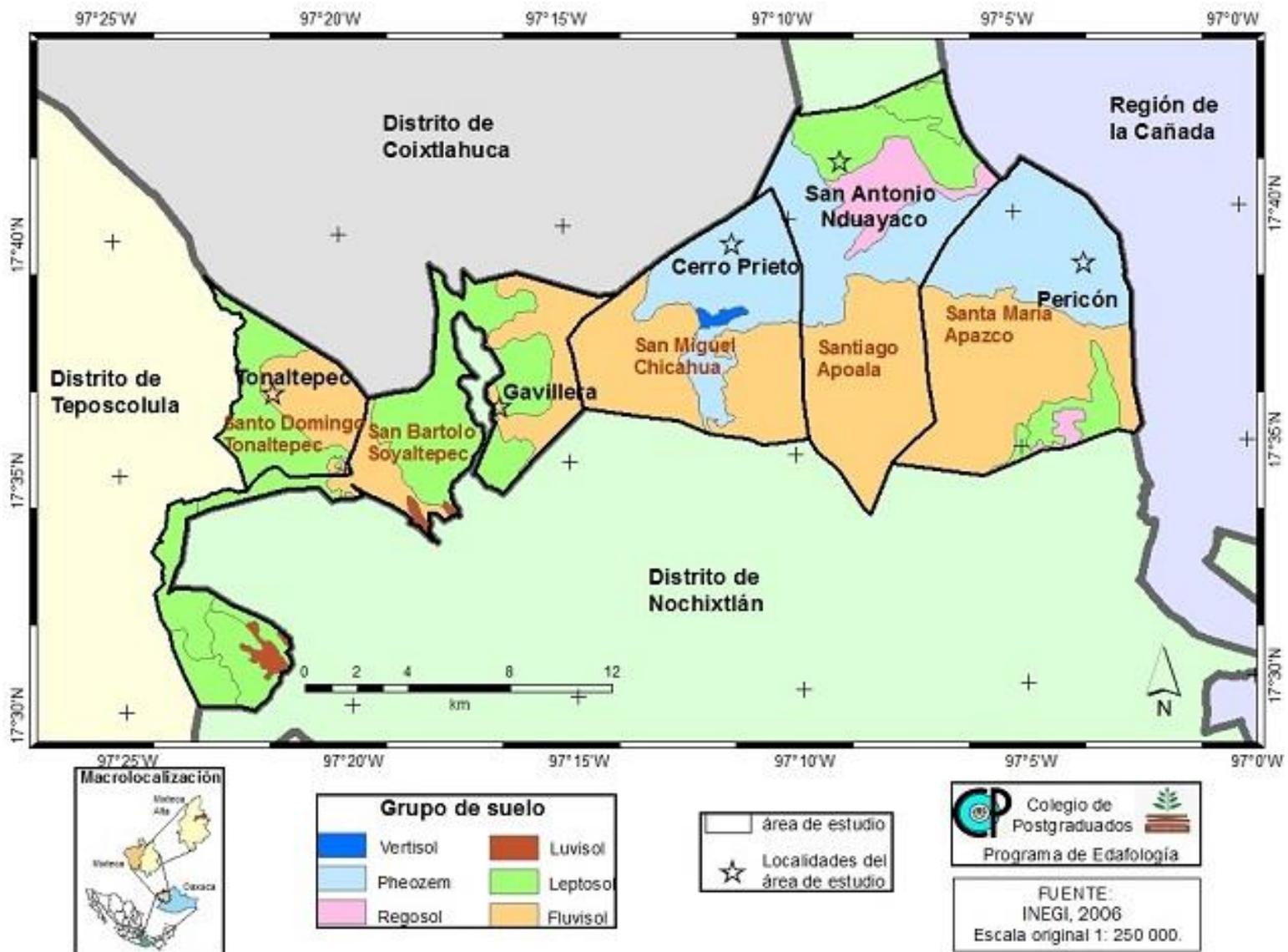


Figura 25. Tipos de suelos del área de estudio.

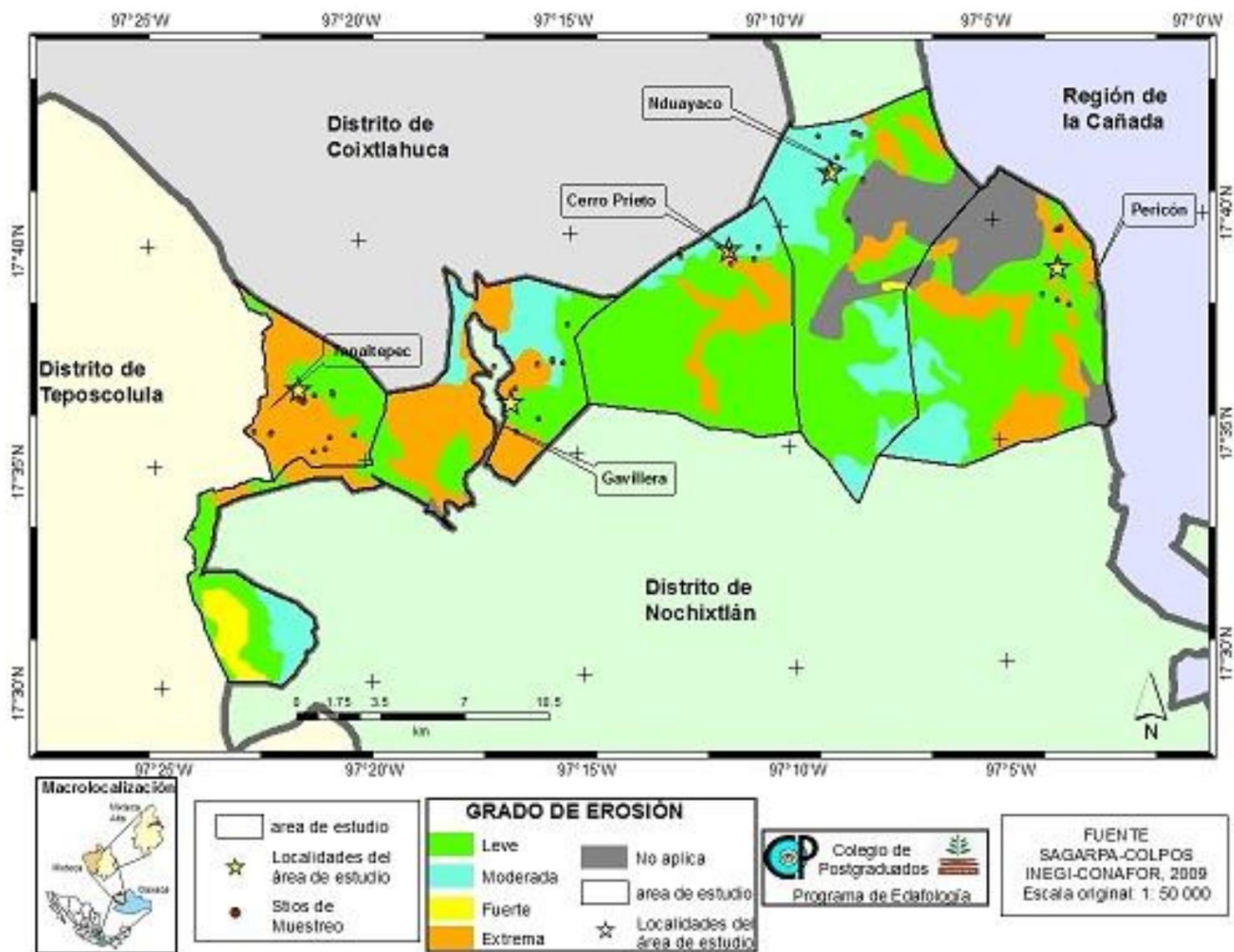


Figura 26. Grado de erosión actual del área de estudio.

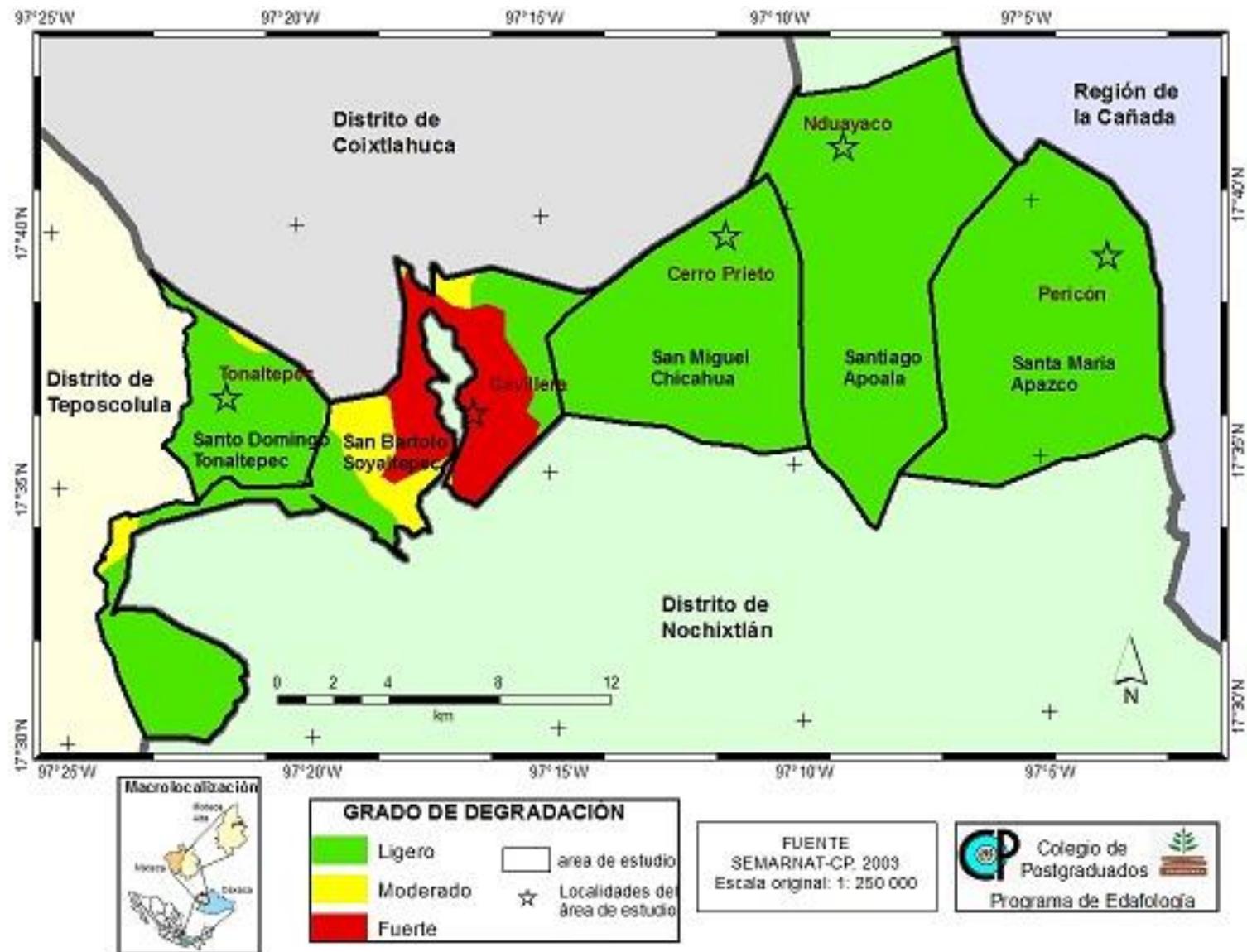


Figura 27. Grado de degradación del área de estudio.

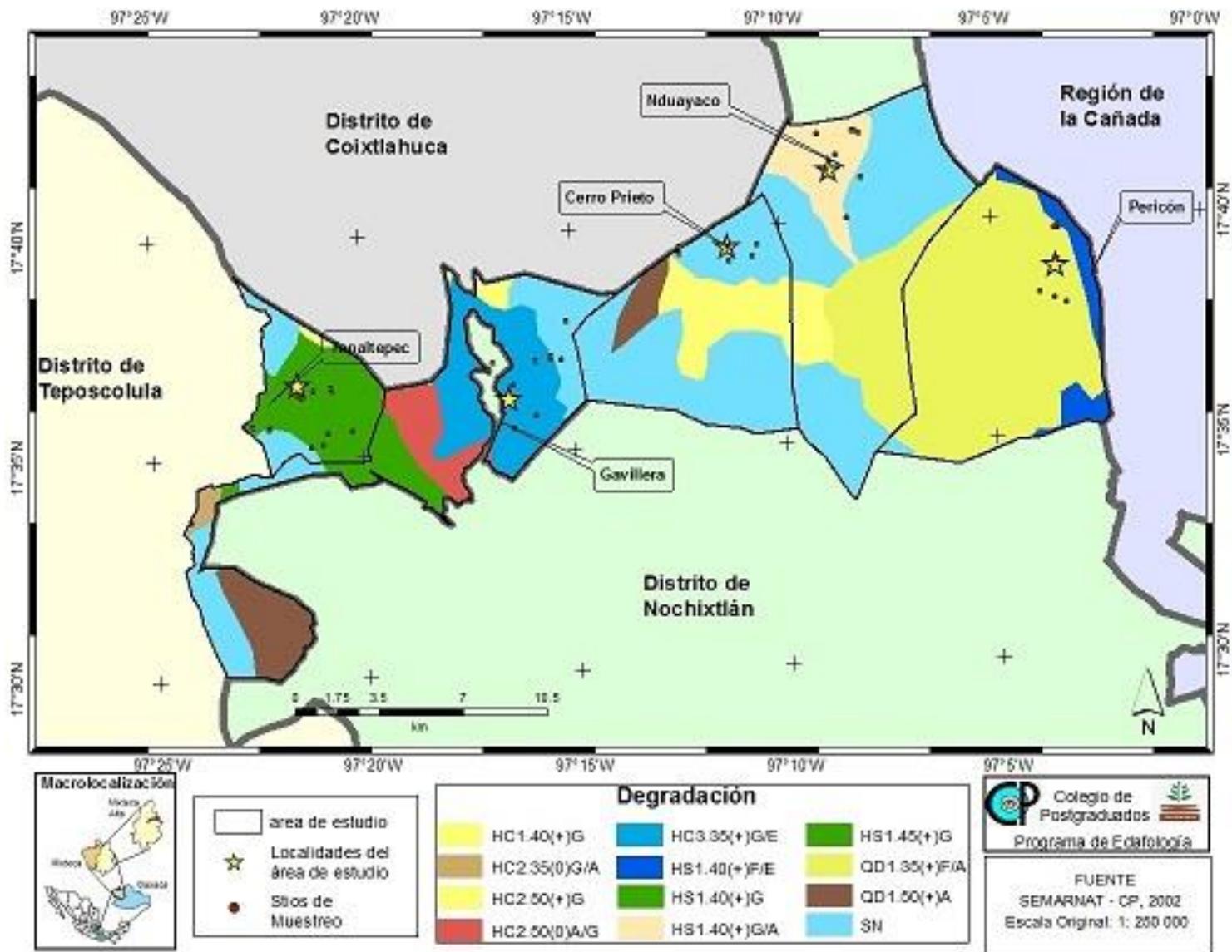


Figura 28. Tipo y causa de degradación del suelo del área de estudio.

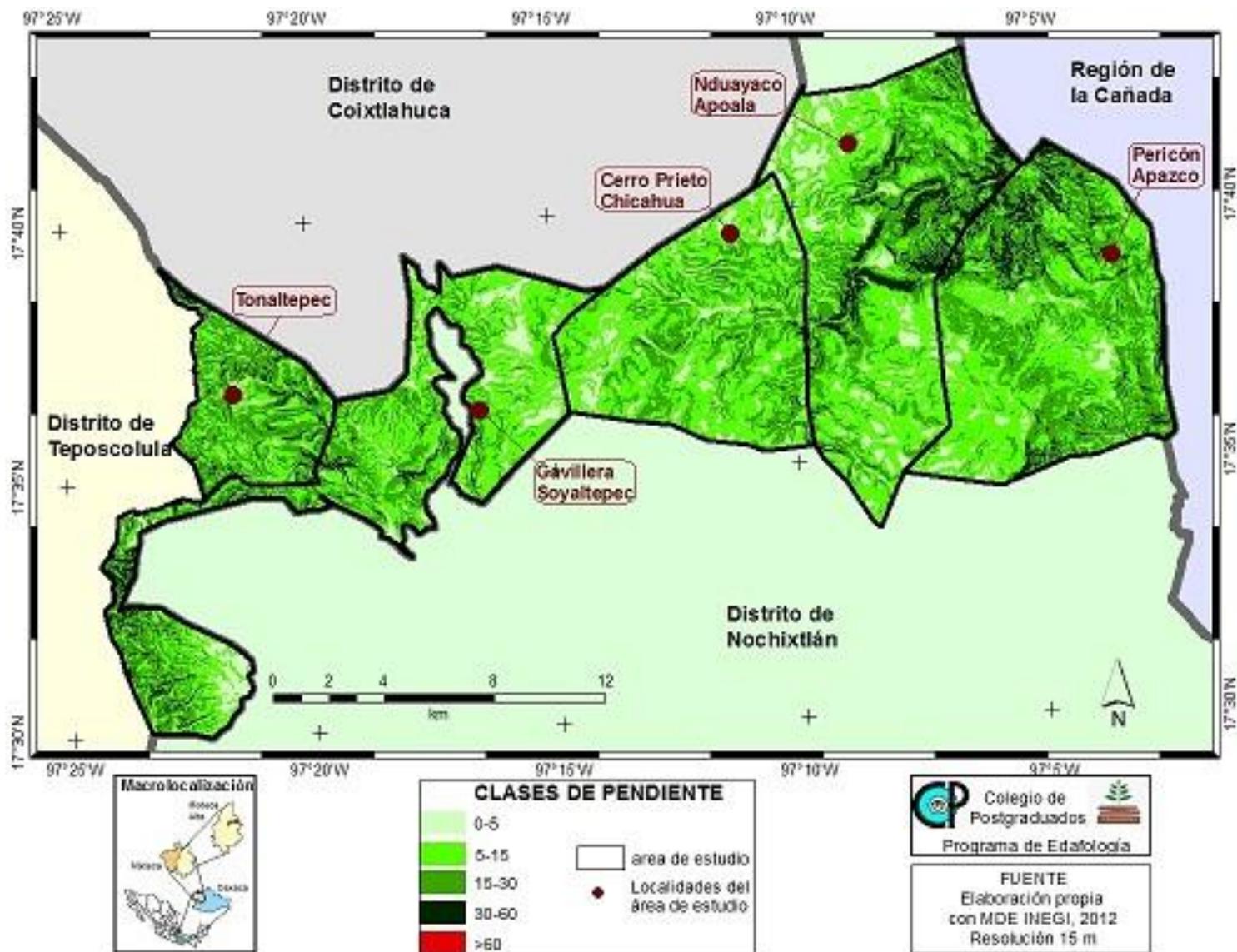


Figura 29. Clases de Pendiente del área de estudio (Clasificación FAO, 1994).

De acuerdo a la clasificación de FAO (2009) adaptada para la representatividad del área, la pendiente en la mayoría del territorio del área de estudio es del 5 al 15 % (14587.1 ha) con forma moderadamente inclinada (Cuadro 26), seguida de las pendientes de 15 a 30% (11698.9 ha) con forma fuertemente inclinada, en menor proporción la forma ligeramente inclinada con pendiente de 0 a 5 % (3969.7 ha) y las áreas algo escarpadas (30 a 60 %) con una superficie de 2663.7 Has y una pequeña área de 4.1 has con pendientes mayores al 60 %. El mapa de pendientes muestra en el mayor porcentaje de su territorio, la pendiente es de forma moderadamente inclinada a fuertemente inclinada (5 a 30%) (Figura 30). Atribuido principalmente a la orografía (sierra) y topofomas del área (Fuente: elaboración propia con información de INEGI, 2012).

Cuadro 26. Clases de pendiente del Área de estudio*

Forma de la pendiente	Clase de pendiente (%)	Ha	%
Ligeramente inclinado	0 - 5%	3969.7	12.1
Moderadamente inclinado	5 – 15%	14587.1	44.3
Fuertemente inclinado	15 – 30%	11698.9	35.5
Algo escarpado	30 – 60%	2663.7	8.1
Muy escarpado	> 60	4.1	0.01

*Elaboración propia con datos de INEGI (2012). Clasificación de la pendiente FAO, 1994, modificada a 5 clases.

La información revisada con anterioridad, muestra que el área de estudio presenta problemas de erosión y degradación de diversos orígenes, naturales, sociales, ambientales, de sobreexplotación y mal manejo de los recursos, naturales, sin embargo el suelo es uno de los que menos ha recibido atención para su conservación, en el siguiente apartado se muestra información específica de los municipios seleccionados, así como de las problemáticas existentes en cada uno de ellos.

Caracterización físico – social de los municipios del área de estudio

La caracterización físico-social, permitió identificar los principales problemas desde el punto de vista de los habitantes, para lo cual se tomaron como base los diagnósticos comunitarios elaborados por prestadores de servicios profesionales del PESA (Programa Especial para la Seguridad Alimentaria) en el año 2010, y los planes de desarrollo municipal del año 2013, en los cuales de manera participativa se detectan los principales y prioritarios problemas comunitarios y municipales mediante en talleres participativos.

Municipio de Santo Domingo Tonaltepec

Tonaltepec proviene del mixteco; Totot = peña, Tepetl = loma, cerro o monte, “Loma de Peña”, porque se encuentra en un lomo, río donde el suelo es de tepetate y peña o roca dura y en el cual nacen los ríos: Papaloapan, que desemboca en el golfo de México y el Verde que desemboca en el océano Pacífico; Tonaltepec también significa “En el cerro del calor”, proviene de las voces tlatayan = debajo de la tierra y atl = agua.

Las principales localidades son; Tonaltepec, San Francisco Río Blanco y Vista Hermosa, las dos últimas con la categoría de agencias de policía y la primera como cabecera municipal (e-Local, 2013). Se localiza en la parte noreste del estado de Oaxaca, sus coordenadas son entre los paralelos 17°34' y 17°40' de latitud norte, 97°19' y 97°23' de longitud oeste, a una altura de entre 2 200 y 2,900 m.s.n.m. Limita al norte con Santa María Nativitas, al sur con San Juan Teposcolula y Santo Domingo Yanhuitlán, al oriente con Santa María Nativitas y San Bartolo Soyaltepec, al poniente con Villa Tejupam de la Unión y San Juan Teposcolula, pertenece al distrito de Teposcolula. Su distancia aproximada a la capital del estado es de 100 km. La superficie total del municipio es de 20.41 km² y la superficie del municipio con relación al estado es de aproximadamente 0.02 %.

En esta comunidad se encuentran suelos muy accidentados, su superficie montañosa tiene diversas elevaciones como la sierra Madre de Oaxaca en donde se forma el Nudo Mixteco, (cerro Verde – Yucu cui), cerro verde (yucu cui), Cerro del sol (yucu nchii), Cerro de ceniza (yucu nsallá), cerro de rana (yucu shaa lelu), cerro de escalera (yucu cuallo), cerro de quince (yucu di sahún), cerro de palo (yuycu yunu), de miel (yuca ndudi) y de bandera (PMD Santo Domingo Tonaltepec, 2013).

Esta comunidad dispone de poca agua, por lo que la gran mayoría de terrenos son temporales y se siembra en los meses de: mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. El agua en su mayoría se destina al consumo doméstico, no alcanza para tener terrenos de riego.

El clima predominante es templado subhúmedo, con lluvias en verano, una parte de otoño, con inviernos fríos debido a su altura sobre el nivel del mar, la precipitación promedio es de 678 mm. La geología del municipio pertenece al periodo terciario y al paleógeno con presencia de rocas ígneas extrusivas en su mayoría (60%) andesita, sedimentarias (40%) limolita-arenisca y arenisca-conglomerado.

El suelo reportado por el estado de Oaxaca es Cambisol cálcico, sin embargo INEGI (2002c) en la carta edafológica, escala 1:250 000, reporta Leptosol (73%) y Cambisol (27%) de la superficie del municipio (INEGI). La flora la conforman especies cultivadas como: maguey para pulque, maíz, frijol negro, trigo, haba, durazno, capulín, tejocote y especies Silvestres: Nopal silvestre, madroño, encino, ocote, enebro (PDM, Santo Domingo, Tonaltepec, 2014).

Podemos también encontrar diversas plantas medicinales en el cerro de 15 y en el cerro Verde como son; Iñu kiu, itavio, San Nicolás, Valeriana, Chepito, Yucusarrianda, Itanducu, Laurel, Ajenjo, Nelto, Hongos curativos (PDM, Santo Domingo, Tonaltepec, 2014). La fauna representativa son calandrias, palomas, águilas, correcaminos, cacalotes, gavilanes, chuparrosa ó colibrí, golondrinas, pájaro cartero, cenzontle, pájaro pecho rojo, jilguero, cuili, codorniz, chachalaca, tecolote,

víbora de cascabel, coralillo, escorpión, lagartijas y diversos mamíferos (oyote, zorro, zorrillo, tlacuaches, comadreas, liebre, conejo, armadillos, rata, ratones, tlacomistle, tejón) (PDM, Santo Domingo, Tonaltepec, 2014).

Los recursos forestales entre los que destacan las siguientes especies de árboles: enebros, encinos, elites, sauce, ocote, madroño, ramonal y fresno (PDM, Santo Domingo, Tonaltepec, 2014). Hidrográficamente, aproximadamente el 60 % de su superficie pertenece a la región hidrológica de la Costa Chica de Guerrero, el 32 % a la región hidrológica del Papaloapan y el 3 % a la región hidrológica del Balsas (CONAGUA, 2007). El uso de suelo en un 100% es agricultura (CGP-SAGARPA-CP, 2009), y aproximadamente un 4% es zona urbana (INEGI, 2005), la vegetación es en un 33 % pastizal inducido y un 26 % es bosque de pino y pino – encino. EL 85 % de la superficie del municipio presenta erosión extrema (CGG-SAGARPA-CP, 2012) y el resto erosión leve. Lo que genera problemas de diversas índoles, productivos, ambientales y sociales.

Problemas principales

Suelos poco productivos; la fertilidad de los suelos se ha deteriorado a través del tiempo debido a diversos factores entre ellos, prácticas agrícolas convencionales a base de fertilizantes, sin aporte de materia orgánica ni residuos, ya que el zacate y residuos agrícolas es para alimento de los animales, aunado al monocultivo de maíz principalmente. Suelos erosionados: la pérdida de suelo es la degradación física más importante en el municipio, la deforestación, el uso de suelo y el sobrepastoreo son las principales causales.

En la Figura 30, se observa el aspecto de la degradación de suelos del Municipio de Santo Domingo Tonaltepec, así como el aspecto de los terrenos agrícolas con problemas de baja productividad.



Figura 30. Aspecto de áreas degradadas en Santo Domingo Tonaltepec.

Municipio de San Bartolo Soyaltepec

El nombre de Soyaltepec significa "En el cerro de las Palmas" proviene de las voces Soyatl - palma, Tepetl - cerro y C- En (E-Local, 2009). El Municipio de San Bartolo Soyaltepec esta formado por dos territorios ubicados en sitios diferentes, el primero está formado por la cabecera municipal, una agencia municipal y tres agencias de policía, y el segundo está formado solamente por la agencia municipal de San Pedro Añañe, el cual está separado por el territorio municipal de Santo Domingo Yanhuitlán. Se localiza en la parte noreste del estado de Oaxaca, entre los paralelos 17°30' y 17°40' de latitud norte; los meridianos 97°13' y 97°25' de longitud oeste. Su altitud se ubica entre 2 100 y 2 800 m. Colinda al norte con Santa María Nativitas, San Juan Bautista Coixtlahuaca y; al sur con San Mateo Coyotepec, al oriente con San Miguel Chicahua, al poniente con Santo Domingo Tonaltepec y Santo Domingo Yanhuitlan. Cuenta con 4 localidades y una población total de 681 habitantes (PDM San Bartolo Soyaltepec, 2010). La superficie total del municipio es de 70.17 kilómetros cuadrados y la superficie del municipio con relación al estado es del 0.07 % (INEGI, 2009). El municipio se encuentra dentro de una zona montañosa de laderas con pendientes que van desde 5% hasta 70 %, existen también pequeñas extensiones de llanos donde se practica gran parte de la agricultura, fisiográficamente, pertenece en un 100 % a la Sierra Madre del Sur, en un 86% a la Subprovincia de la Mixteca Alta y en un 14% a las Sierras Centrales de Oaxaca. El sistema de topofomas predominantemente es Sierra (80%).El clima predominante, es templado subhúmedo con lluvias en verano, la precipitación oscila entre los 600 y 1000 mm anuales. El clima es templado en las partes bajas y frio en las partes más altas del municipio, presentándose lluvias en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre. Existen vientos ocasionales en los meses de enero, febrero y marzo.

El 27 % del territorio Municipal Soyaltepec cuenta con bosques donde predominan algunas especies de encino, seguido de enebro y algunos pinos, en gran parte del bosque se puede observar que los encinos están siendo atacados por plantas parásitas como el muérdago conocido por los productores como injertos. Esta planta

casi terminó con especies de zapote y se ha extendido a otras especies dentro de ellas los encinos. El uso de suelos en su mayoría es de agostadero (PDM, 2010) o como pastizal inducido (CGP-SAGARPA-CP, 2009). El uso que se le da al bosque es la extracción de leña, abono vegetal, pastoreo de animales y en muy baja cantidad madera para casa y corral de animales. Existen diferentes especies de plantas con uso medicinal, algunas las encontramos de manera silvestre y otras son cultivadas en los jardines de las familias. De acuerdo a CGP-SAGARPA-CP (2009), el uso de suelo agrícola en el territorio es en la mayoría agricultura de temporal. A pesar de ser una región con escasa vegetación existen diferentes especies de aves, reptiles y algunas especies que son consideradas plagas, tales como comadreja, conejo, ratas, y coyotes, también quedan algunos ejemplares que están en peligro de extinción tales como venado, armadillos y tejones (PDM San Bartolo Soyaltepec, 2010). El tipo de suelo reportado en el municipio es el tipo luvisol crómico, propicio para la vegetación boscosa de coníferas latifoliadas, se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, de fertilidad moderada y alta (INEGI, 2002c).

Los intentos de reforestación en este municipio iniciaron desde hace 15 años en pequeñas superficies de cada una de las comunidades, en esta actividad ha jugado un papel muy importante el Comisariado de Bienes Comunales, ya que a través de esta institución se han conseguido árboles principalmente de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), sin embargo algunas comunidades han producido sus árboles, como es el caso de La Unión Reforma quien inicio en el año 2000 con producción y plantaciones de 20 mil árboles de *Pinus Oaxacana* por año, actual mente es la comunidad donde se ha realizado la mayor parte de las reforestaciones. Hidrográficamente, aproximadamente el 60 % de su superficie pertenece a la región hidrológica de la Costa Chica de Guerrero y el resto a la región hidrológica del Papaloapan (INEGI-INE-CONAGUA. 2007). EL 85 % de la superficie del municipio presenta erosión extrema y pendientes del 5 a 70% (CGG-SAGARPA-CP, 2009) y el resto erosion moderada. Lo que genera problemas de diversas indoles, productivos, ambientales y sociales.

Problemas principales

En el territorio municipal de San Bartolo Soyaltepec la falta de vegetación y prácticas de conservación de suelo en 3425 hectáreas de un total de 5894, generan el escurrimiento superficial de las aguas pluviales provocando la escasez de agua desde hace 20 años por la escasa filtración hacia los mantos acuíferos. Los productores de las seis comunidades del municipio de San Bartolo Soyaltepec utilizan técnicas tradicionales en la producción agropecuaria las cuales no contemplan prácticas de conservación de los suelos agrícolas, ni mejoramiento de las especies o variedades utilizadas, lo que ocasionado una baja producción del sector agropecuario del municipio en general en los últimos 20 años (PDM San Bartolo Soyaltepec, 2010). En la Figura 31, se observa el aspecto de suelos degradados con erosión severa en la comunidad de Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.



Figura 31. Aspecto de suelos degradados en Gavillera, San Bartolo soyaltepec.

Municipio de San Miguel Chicahua

Chicahua significa “Cerro Fuerte”; Miguel en honor al santo patrono San Miguel Arcángel (e-Local, 2009).

Este municipio es uno de los más grandes del Distrito y se encuentra en las coordenadas 17°38' latitud norte y 97°12' longitud oeste y a una altura de 2,300 metros sobre el nivel del mar; colinda al norte con San Juan Bautista Coixtlahuaca y Santiago Apoala, al sur con Asunción Nochixtlán, al oeste con Santa María Chachoapam y al este con Santa María Apasco y Santiago Apoala. Su extensión es de 94.41 Km² que representan el 0.10% en relación al Estado (PMD San Miguel Chicahua, 2010).

San Miguel Chicahua Nochixtlán, no es un Municipio rico en cuanto a recursos naturales, posee escasa vegetación la cual se compone principalmente por ocotes y encinos, así como palmas, espinos, guajales, tepehuajes y pastizales. Es un municipio que sufre de escasez de agua, ya que las corrientes de agua se secan durante la época de estiaje, el tipo de suelo localizado en el municipio es el Cambisol cálcico, por lo poseen características de ser delgados y de bajos niveles de fertilidad (PMD San Miguel Chicahua, 2010). Fisiográficamente pertenece en un 100 % a la Sierra Madre del Sur y a la subprovincia de las Sierras Centrales de Oaxaca, predominan las topoformas de Sierra de cumbres tendidas (77.91%) y la Sierra alta compleja (22.09), (INEGI).

Es un municipio que se caracteriza por una orografía montañosa como la mayoría de los municipios de la Región Mixteca; la misma cabecera municipal se ubica sobre una ladera de dichos cerros, localmente las principales montañas reciben los nombres de: Cerro de Yucucada y Cerro Yucuyaba, también se cuenta con una cueva denominada: Queyucu, ubicada en el paraje pozo azul. Para la Agencia el Fortín Alto Chicahua: los cerros más importantes son: Yucucada y yucuyaba. Para la Agencia de Tierra Colorada Chicahua, los principales cerros son: cerro de plata, monte alegre, Piedra larga, Yucutonchi, Yucucuixi, Totocuixi, yutuyada (PMD San Miguel Chicahua, 2010). La geología de acuerdo a INEGI (2002) es del período cretácico (56.93%) y

paleógeno (43.07%), lo que genera roca sedimentarias del tipo de las calizas (56.93%), conglomerados (33.20%) y areniscas (9.87%).

Hidrológicamente pertenece a la subcuenca del Río Qioitepec (INEGI 2002b), cuenta con algunos escurrimientos de agua, de los cuales, los principales son río Dicuchillo, ubicado en el paraje cerro prieto, de igual manera se encuentran manantiales como es el caso de Buena vista. donde hay un manantial denominado Yutzañuhunzaño, el otro manantial denominado Yutza Vaa. Este se ubica por llano seco, el otro manantial denominado pozo de Guajolote (Yut-za tiúuhh), está ubicado en Cerro Prieto. Para la agencia de El Fortín Alto Chicahua, el agua que los alimenta proviene de río carrizal (yutza-yó), también cuentan con manantiales denominados manantial Buenavista y yutzanticóo que significa río de plato. Para la corregidora Tierra Colorada: Se cuenta con los siguientes manantiales Yutzatioó, Yutza yututavi, Yutza tikivíi, Yutza Chalma (PDM, San Miguel Chicahua, 2010).

El clima en la mayor parte del año es semifrío subhúmedo, con lluvias en el verano. La temperatura media anual es de 17.2°C, la precipitación anual promedio es de 680 mm¹ (PMD San Miguel Chicahua, 2010). El uso de suelo es en un 72% agricultura, 27.41% forestal y el resto de zona urbana (CGP-SAGARPA-CP, 2009). El municipio de San Miguel Chicahua conjuntamente con sus agencias como son: El Fortín Alto Chicahua y La Corregidora Tierra colorada, como muchos de los municipios de la región Mixteca en el Estado de Oaxaca, sufre un importante grado de erosión, agravado por la constante deforestación de los cerros ocasionando que durante la época de lluvia el agua arrastre el suelo y como consecuencia se formen cárcavas en las partes donde no existe cobertura vegetal, transformándose en terrenos improductivos (Miguel Chicahua, 2010).

De acuerdo a CGP-SAGARPA-CP (2009) la erosión en el municipio es de leve a extrema, siendo extrema en la Comunidad de Cerro Prieto. Entre las actividades que se realizan para contrarrestar los efectos de la erosión son, la siembra de 15 000 árboles de pino-ocote al año y algunas obras como el bordeo de retención de suelo. Elaboración de zangas para de retener el agua y disminuir su velocidad, también se

hacen bordos, bardas de piedra con el fin de retener la tierra, esta actividad se realiza cada año y así evitar deslaves (PMD, San Miguel Chichahua, 2010).

Problemas principales

Actualmente en el Municipio de San Miguel Chichahua, el tipo de suelo no es muy favorable para la producción agrícola ya que se encuentra en distintos grados de erosión, lo que repercute directamente en la producción, debido a que no se tienen los rendimientos óptimos en los cultivos básicos y se ven en la necesidad de tener que abastecerse de granos y semillas adquiridos fuera de la población (PMD San Miguel Chichahua, 2010). En la Figura 32, se observa el aspecto de la deforestación de los bosques y el cambio de uso de suelo a agrícola, así como la abundante pedregosidad en la comunidad de estudio.



Figura 32. Aspecto de suelos degradados en Cerro Prieto, San Miguel Chichahua.

Municipio de Santiago Apoala

En idioma mixteco lleva el nombre de Yutatnoho que quiere decir "río donde salieron los señores" (e-Local, 2009). Entre los paralelos 17°33' y 17°43' de latitud norte; los meridianos 97°05' y 97°11' de longitud oeste; altitud entre 1 400 y 2 700 m. Colinda al norte con los municipios de San Juan Bautista Coixtlahuaca, San Miguel Huautla, San Pedro Jocotipac y Santa María Texcatitlán; al este con los municipios de Santa María Texcatitlán y Santa María Apazco; al sur con los municipios de Santa María Apazco y Asunción Nochixtlán; al oeste con los municipios de Asunción Nochixtlán, San Miguel Chichahua y San Juan Bautista Coixtlahuaca. Ocupa el 0.09% de la superficie del estado (86 km²). Cuenta con 7 localidades y una población total de 815 habitantes (INAFED, 2009).

Fisiográficamente pertenece a la Sierra Madre del Sur y a la Subprovincia de las Sierras Centrales de Oaxaca, las topoformas son en su mayoría (82 %) Sierra de cumbres tendidas y menormente (18 %) Sierra alta compleja (INEGI). Los tipos de climas presentes en este municipio son semiseco templado (42 %), templado subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo (42 %) y semiseco-semicálido (16 %) (INEGI). Geológicamente, las rocas presentes son del periodo Cretácico en un 82% y Paleógeno (18 %), lo cual genera rocas del tipo calizas en la mayoría del territorio (65 %), Caliza-lutita (18 %) y conglomerado (17%) (INEGI). Los suelos predominantes son el Luvisol y Phaeozem (66 %), el Regosol (30%) y el Leptosol (4 %). Hidrológicamente, pertenece a la Región y cuenca del Papaloapan, (INEGI-INE-CONAGUA. 2007).

El Uso de suelo y vegetación es de agricultura 45%, Bosque 38% y pastizal inducido 16 %, el resto se considera zona urbana (1%) (CGP-SAGARPA-CP, 2009). La erosión que se presenta en este municipios de acuerdo a CGP-SAGARPA-CP (2009), es leve en zonas de bosque y de moderada a extrema en la mayoría de su territorio, lo cual genera problemas de distinta índole (agrícolas, sociales, ambientales), los esfuerzos para contrarrestar este problema son enfocados hacia la reforestación,

dado que es un lugar turístico con suficiente agua, tiene una superficie agrícola importante de riego sin erosión aparente.

Problemas principales

Los problemas principales, radican en la falta de producción para autoconsumo y para comercialización, la erosión de los suelos y la falta de conservación de los mismos. En la Figura 33, se observa el aspecto de un suelo agrícola cultivado y un suelo degradado sin cultivar en la comunidad de estudio, así como el aspecto de la deforestación.



Figura 33. Aspecto de suelos degradados en Nduayaco, Apoala.

Municipio de Santa María Apazco

El nombre de Apazco significa “en los apazites” proviene de las voces apaztli “vasija de barro grande” y con- en (e-Local, 2009).

Se localiza en la parte noroeste del estado en la región de la mixteca alta en las coordenadas 17° 34' Y 17° 42' de latitud norte y 97°02' y 97°08' longitud oeste a una altitud entre los 1400 y 2900 m y se ubica a 146 kilómetros de distancia de la capital del estado (INEGI, 2005). El municipio cuenta con una superficie total de 78.86 km², representa el 0.08% de la superficie total del estado (INEGI, 2009). Colinda al norte con los municipios de Santiago Apoala, Santa María Texcatitlán y San Pedro Jaltepetongo; al este con los municipios de San Pedro Jaltepetongo y San Juan Bautista Cuicatlán; al sur con los municipios de San Pedro Coxcaltepec Cántaros y Asunción Nochixtlán; al oeste con el municipio de Santiago Apoala. Ocupa el 0.08% de la superficie del estado.

Pertenece a la provincia de la Sierra madre del Sur y a la subprovincia de las Sierras Centrales de Oaxaca en un 100%, el sistema de toposformas es de Sierra de cumbres tendidas en un 98 % de sus territorio y en Sierra baja completo en el resto de su superficie (2%), (INEGI, 2000, 2000a).

La geología del municipio pertenece al periodo cretácico y al paleógeno con presencia de rocas sedimentarias del tipo Calizas en un 63%, Caliza-lutita (23%), Arenisca (4.19) y Lutita arenisca (09%) y metamórficas del tipo Gneis (9%) (INEGI, 2002).

El suelo reportado por el estado de Oaxaca es Cambisol cálcico, sin embargo INEGI (2000) en la carta edafológica, escala 1:250 000, reporta Leptosol (3.08%), Luvisol (51.30%) y Regosol (45.62 %) de la superficie del municipio (INEGI 2002c).

La flora la conforman especies Cultivadas como; Maguey de pulque, maíz, frijol negro, trigo, haba, durazno, capulín, tejocote y especies Silvestres: Nopal silvestre, madroño, encino, ocote, enebro (INAFED, 2009).

Podemos también encontrar diversas plantas medicinales en el cerro de 15 y en el cerro Verde como son; Iñu kiu, itavio, San Nicolás, Valeriana, Chepito, Yucusarrianda, Itanducu, Laurel, Ajenjo, Nelto, Hongos curativos (PMD Santa María Apazco, 2010).

La fauna representativa son calandrias, palomas, águilas, correcaminos, cacalotes, gavilanes, chuparrosa ó colibrí, golondrinas, pájaro cartero, ceniztonle, pájaro pecho rojo, jilguero, cuili, codorniz, chachalaca, tecolote, víbora de cascabel, coralillo, escorpión, lagartijas y diversos mamíferos (oyote, zorro, zorrillo, tlacuaches, comadreas, liebre, conejo, armadillos, rata, ratones, tacomistle, tejón). Los recursos forestales entre los que destacan las siguientes especies de árboles: Enebros, encinos, elites, sauce, ocote, madroño, ramonal y fresno. Hidrológicamente, pertenece a la región del Papaloapan, cuenca del Río Papaloapan, y a la subcuenca del Río Quiotepec (INEGI, 2000., PMD Santa María Apazco, 2010).

Hidrográficamente, aproximadamente el 60 % de su superficie pertenece a la región hidrológica de la Costa Chica de Guerrero, el 32 % a la región hidrológica del Papaloapan y el 3 % a la región hidrológica del Balsas (INEGI-INE-CONAGUA. 2007).

El uso de suelo en un 100% es agricultura (CGP-SAGARPA-CP, 2009), y aproximadamente un 4% es zona urbana (INEGI, 2009), la vegetación es en un 33 % pastizal inducido y un 26 % es bosque de pino y pino – encino.

De acuerdo a CGG-SAGARPA-CP, 2009, la erosión en el territorio de este municipio es leve, moderada y extrema, principalmente en áreas desprovistas de vegetación, la erosión leve se localiza en algunas áreas agrícolas y en zonas de reforestación.

Problemas principales

Suelos poco productivos, la producción no alcanza para cubrir el consumo de los habitantes. Suelos erosionados, no existen prácticas que ayuden a conservar el suelo. Desorganización social para actividades agrícolas comunitarias.

La Figura 34, permite observar el impacto visual de la deforestación y la abundante pedregosidad en la comunidad de Pericón, así como el contraste de los suelos agrícolas y los suelos degradados.



Figura 34. Aspecto de suelos degradados en Pericón, Santa María Apazco.

CONCLUSIONES

La caracterización de la zona permitió seleccionar comunidades y sitios de muestreo de suelos, este capítulo fue la base para los dos capítulos posteriores que conforman este trabajo de investigación.

Las comunidades de Tonaltepec, Gavillera y Cerro Prieto son las que presentan los niveles más graves de degradación principalmente física (pérdida de suelo).

El factor común de causa de degradación de suelo, es la deforestación, la sobreexplotación del bosque y el cambio de uso de suelo en las 5 comunidades del área de estudio.

La degradación del suelo implica en su mayoría erosión física y pérdida de suelo, por lo que los problemas de baja producción se pueden contrarrestar con prácticas agronómicas que permitan obtener a la par de productos básicos, conservar el suelo e incrementar la fertilidad del mismo.

Los diagnósticos comunitarios revisados reflejan que la degradación del suelo está muy relacionada con aspectos sociales, humanos, culturales y económicos. La pobreza en el área de estudio constituye un factor esencial en la degradación de los suelos. La escasez de recursos económicos, aunado a la pérdida de la cultura acerca de la necesidad de cuidar los recursos naturales, ha tenido un impacto histórico en la degradación de todos ellos y el más descuidado es el suelo.

LITERATURA CITADA

- Bradomín, J. M. 1992. "Toponimia de Oaxaca (Crítica Etimológica)", Tercera Edición, Oaxaca, Oax. pp. 171 y 172.
- Bravo C; Lozano Z; Hernández R.M; Piñango L; y Moreno B. 2004. Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16: 163-172.
- Carabias L. J. 1996. La degradación. Un problema Nacional. *Excelsior*, 18 de Junio. México D.F.
- Castellanos, J; J. X. Uvalle, B; A. Aguilar, S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola, 201. Pág.
- CGP-SAGARPA-CP-CONAFOR, 2009. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación, serie III y IV, Escala 1:250 000. Cartografía en formato digital. México.
- CONABIO. Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/tsuelo/eda251mgw.
- CONABIO, 2009. Cuencas hidrográficas de México, 2007. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/cue250k_07gw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xml&_indent=no
- CONAPO, 2010. Índice de marginación por localidad En línea: http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010

Domínguez, B. J. 2000. Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Informes Técnicos Ciemat, No. 943. Ciemat. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid, España. 38 pp.

ESRI. 2013. Software ArcGIS 10.1. Redlands, CA. USA.

FAO-ISRIC-ISSS. *World reference base for soil resources*. Rome. 1988. Disponible en: www.fao.org/docrep/W8594E/W8594E00.htm Fecha de consulta: 19-08-2008.

FAO. 2001. *Major soils of the world. World reference base for soil resources: Atlas*. CD-Room. Disponible en: www.isric.org/Isric/Webdocs/Docs/Major_Soils_of_the_World/start.pdf Fecha de consulta: 25-09-2008.

FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ª. Ed. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Roma, 2009.

Gobierno del Estado de Oaxaca (e-local) 2009. Disponible en: http://www.e-local.gob.mx/wb/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2009. Conjunto de datos vectoriales. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2010. Manual de cartografía Geoestadística. Censo Nacional de Población y Vivienda. Cartografía básica. En línea, Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/MANUAL%20CartograFIA.pdf>

INEGI-INE-CONAGUA, 2007. Mapa de las Cuencas Hidrográficas de México escala 1: 250 000. Cartografía en formato digital. México. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1998. Unidades Climáticas. Conjunto de Datos Vectoriales Climáticos. Continuo Nacional. Escala

1:1'000,000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000. Provincias Fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000a. Subprovincias Fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000b. Sistema de Topoformas. Conjunto de Datos Vectoriales. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

INEGI, 2005. Geología. Conjunto de Datos Vectoriales. Continuo Nacional. Escala 1:250,000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

INEGI, 2006. Edafología. Conjunto de Datos Vectoriales. Continuo Nacional. Escala 1:250,000. Dirección General de Geografía, Aguascalientes, México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

INEGI, 2012. Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación, Serie V. Escala 1:250'000. Cartografía en formato digital. México.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/topografia_1m.aspx.

INEGI, 2013. Datos de relieve, Continuo de elevaciones mexicano 3.0 CEM 3.0). Disponible en:
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>

- IUSS Working Group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 181 p.
- Ojeda, D. y E. Ojeda T. 1996. Suelos cultivados de la República Mexicana, contenido medio de nutrimentos minerales aprovechables. México, Universidad Autónoma Chapingo. En estadísticas del Medio Ambiente 1999. Capítulo II. Medio ambiente y recursos naturales. (www.inegi.gob.mx/espanol/bvinegi/), México, p. 10.
- Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS). 2007. Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable. En línea: <http://www.oeidrus-oaxaca.gob.mx/fichas/tomol/distrito09.pdf>
- Ortiz S., Ma de la L., M. Anaya, y W. J. Estrada Berg. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra, Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Nacional de Zonas Áridas-Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.
- Pérez N. J. 1996. Efectos de la erosión y sistemas de labranza sobre la productividad y rentabilidad de dos suelos de Oaxaca. Tesis de Doctor. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 178 p.
- Pieri, C. 1992. Fertility of Soils. Springer Series in Physical Environment No. 10, Springer Verlag, Germany.
- Torres B. Elibeth., Cortes B. José., Mejía S. Enrique., Exebio G. Adolfo., Santos H. Ana Laura., Delgadillo P., Ma. Eugenia. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Joselito", Jesús María, Jalisco. TERRA Latinoamericana, Col. 21. 1, enero-marzo 2003, pp. 117-126. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- SEMARNAT, 2002. Informe de la situación del Medio Ambiente en México 2002. Consultada el día 20 de Febrero del 2012. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/03_suelos/ind

SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D. F. México. Escala 1:250 000. Memoria Nacional.

Young, A. 1976. Tropical soils and soil survey. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Great Britain.

**CAPITULO II. DEGRADACION E
INDICES DE CALIDAD DE SUELOS EN
EL ÁREA DE ESTUDIO**

**DEGRADACION E INDICES DE CALIDAD DE SUELOS EN LA MIXTECA ALTA
OAXAQUEÑA, MÉXICO**

**DEGRADATION AND SOIL QUALITY INDEX IN THE MIXTECA ALTA
OAXAQUEÑA, MÉXICO**

Isabel del Rayo **Estrada-Herrera**¹, Claudia **Hidalgo-Moreno**^{1*}, Juan José **Almaraz
Suárez**¹, Hermilio **Navarro-Garza**², Remigio **Guzmán-Plazola**³, Jorge D.
Etchevers-Barra¹ y Carlos **Ortiz-Solorio**¹

RESUMEN

La Mixteca Alta Oaxaqueña, México, presenta niveles moderados a graves de degradación del suelo, se ha reportado que la erosión hídrica y eólica son los principales tipos de degradación y conducen a pérdidas de suelo de entre 50 y 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹, llegando en algunas zonas a ser mayor a los 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Para evaluar la degradación y el estado de la fertilidad del suelo, los indicadores de calidad de suelo son herramientas importantes. El objetivo de este estudio fue definir indicadores de calidad para evaluar el estado de la fertilidad de los suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña y generar una cartografía en la que se asocien estos indicadores (clases de calidad) con los sitios estudiados y el tipo de degradación de los suelos. Para ello, con información disponible, se generaron cartografías de tipo y grado de degradación de los suelos. Se evaluaron atributos químicos (pH, materia orgánica, P, Ca, Mg, K, capacidad efectiva de intercambio catiónico y carbono en biomasa microbiana) que definieron los indicadores de calidad propuestos. Se muestrearon sitios con suelos agrícolas, degradados y de bosque en cinco localidades: Tonaltepec, Gavillera, Cerro Prieto, Nduayaco y Pericón. El diseño experimental fue completamente aleatorio. Los sitios muestreados presentaron erosión hídrica con pérdida de suelo y degradación química con declinación de la fertilidad debido a la pérdida de materia orgánica. El indicador de calidad para la MO fue el que mejor define la calidad de los suelos de las cinco localidades estudiadas. Otros indicadores importantes fueron P_{ext} y $C_{biomasa}$. Los indicadores de calidad generados para los suelos agrícolas, degradados y de bosque de la Mixteca Alta Oaxaca, evidencian el estado de degradación de suelos de esta

región del país, y permiten proponer medidas correctivas para evitar una mayor degradación de éstos.

Palabras clave: índices de calidad de suelo, suelos degradados, Mixteca Alta Oaxaqueña.

ABSTRACT

The Mixteca Alta Oaxaqueña, Mexico, has moderate to severe levels of soil degradation. It has been reported that water and wind erosion are the main causes of soil loss (between 50 and 200 Mg ha⁻¹ yr⁻¹), exceed in some areas to 200 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. Soil quality indicators are useful tools to assess the state of degradation and soil fertility. The aim of this study was to define soil quality indicators useful to assess the state of soil fertility of the Mixteca Alta Oaxaqueña and generate a map in which these indicators are associated (quality classes) with the sites studied and the type of soil degradation. Maps of type and degree of degradation were generated with available information. Chemical attributes (pH, organic matter, P, Ca, Mg, K, effective cation exchange capacity and microbial biomass carbon) were used to define the proposed quality indicators. Agricultural, degraded and forest soils were sampled at five locations: Tonaltepec, Gavillera, Cerro Prieto, Nduayaco and Pericón. The experimental design was completely random. The sampled sites showed evidences of water erosion, loss of soil and organic matter, and evidence of soil fertility declination. The organic matter was the best soil quality indicator in the five selected locations. Other indicators that resulted useful were extractable P and C in the biomass. Quality indicators generated for agricultural, degraded and forest soils in the Mixteca Alta Oaxaqueña clearly showed the precarious health conditions of soils in this region and allowed to propose corrective measures to prevent further degradation.

Key words: *soil quality indices, degraded soils, Mixteca Alta Oaxaqueña.*

INTRODUCCIÓN

La Mixteca Alta-Oaxaca (MAO) es considerada como una de las regiones de México con alto grado de marginación. En términos de población, esto equivale a decir que el 56% de su población (aproximadamente 261,069 habitantes) vive y se desenvuelve en condiciones precarias. Los pobladores de esta región son en su mayoría descendientes de la etnia Mixteca, el tercer grupo indígena más numeroso de México. La mayor parte de los estudios realizados en esta región se han centrado en la deforestación, el sobrepastoreo, la erosión del suelo, la variabilidad del clima, la pobreza, la migración, y el efecto de estos aspectos sobre los sistemas humano-ambientales. Las iniciativas de trabajo comunitario han sido coordinadas en la región, entre otros, por el Centro de Desarrollo Integral Campesino de La Mixteca (CEDICAM) y se han centrado en acciones hacia el combate de la desertificación y la mejora de la calidad del ambiente, especialmente lo relacionado con la disponibilidad de agua y una agricultura amigable para las condiciones de la región. Sin embargo, los estudios que evalúan a nivel sitio específico el estado de degradación de los suelos de esta región son escasos. Lo anterior es grave porque el suelo y el agua que éste almacena son la base fundamental para la producción de alimentos (Ortiz *et al.*, 1994; Torres *et al.*, 2003).

Desde 1992 ya se reportaba que alrededor del 70 % de los suelos de esta región presentaban degradación (Bradomín, 1992). La deforestación, la expansión agrícola y el sobrepastoreo trashumante o nómada de ovejas y cabras ha propiciado un progresivo deterioro de los suelos de esta región, al igual que en otras partes del país (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002). A ello se suma una compleja topografía de la región y la predominancia de suelos someros. Adicionalmente, las políticas para conservar este recurso natural no renovable son poco claras y se instrumentalizan incompletamente. Lo que denota que es todavía incipiente la conciencia de la gravedad de este problema entre las autoridades y la sociedad. Los suelos degradados presentan un estado de salud que impide que éstos puedan

proporcionar bienes y servicios. Un criterio que permite determinar el grado de degradación del suelo es a partir de la valoración de su calidad (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Cantú *et al.*, 2002). El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America define la calidad del suelo como la capacidad de éste para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado lo cual implica: (a) sostener la productividad de plantas y animales; (b) mantener o mejorar la calidad del aire y del agua; (c) sostener la salud humana y el hábitat (Karlen *et al.*, 1997; Acevedo *et al.*, 2005); (d) sostener la actividad biológica, la biodiversidad y la productividad; (e) filtrar, amortiguar, degradar e inmovilizar contaminantes; (f) almacenar y reciclar nutrientes y (g) soportar estructuras socioeconómicas asociadas con el hábitat humano (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista y Etchevers, 2014).

Para que este concepto sea funcional es necesario contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo, así surgen los indicadores. Los indicadores de la calidad de suelo (ICS) se conciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo. Los ICS son atributos medibles que revelan la respuesta a la productividad o la funcionalidad del suelo al ambiente, y se utilizan para saber si la calidad del suelo va mejorando, permanece constante o decrece. Más recientemente los indicadores han sido desarrollados para proveer información sobre el impacto de las prácticas agrícolas sobre la degradación o el funcionamiento del suelo en un periodo dado (Astier *et al.*, 2002). Uno de los propósitos de un indicador de calidad de suelo es comunicar información sobre posibles impactos del cambio en el uso del suelo sobre las funciones del mismo. No hay ningún ICS que sea adecuado para todos los propósitos y contextos. Los ICS pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él (Larson y Pierce 1991; Doran y Parkin 1994; SQI, 1996; Seybold *et al.*, 1997). La mayoría de los investigadores usan un conjunto de indicadores de suelo predefinidos y que fueron sugeridos por Gomez *et al.* (1996) y Shukla *et al.* (2004) para supervisar la calidad y sustentabilidad del suelo en

terrenos agrícolas. Algunos otros elaboran un “conjunto total de datos” denominado (TDS, por su nombre en inglés “total data set”) en el cual incluyen una gran cantidad de indicadores (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1998). Otros más consideran que se deben usar pocos indicadores, pero que éstos deben ser representativos. Con estos pocos indicadores se elabora un “mínimo conjunto de datos” denominado (MDS por su nombre en inglés *minimum data set*) (Govaerts *et al.*, 2006). Se considera que el método MDS, que selecciona los parámetros que mejor representan al conjunto de datos del total (TDS), permite ahorrar tiempo y dinero (Govaerts *et al.*, 2006) (Qi *et al.*, 2009). En años más recientes se ha empleado el análisis de componentes principales (PCA) para seleccionar el “mínimo conjunto de datos” (MDS), como lo hizo Qi *et al.* (2009) en China que incluyó 22 propiedades del suelo y Ghaemi *et al.* (2014) en Irán. Bi *et al.* (2013) seleccionaron un MDS donde consideraron de 19 propiedades físicas, químicas y biológicas y un TDS de más de 16 propiedades del suelo. Liu *et al.* (2013) estableció un índice de calidad de suelo (*soil quality index*) basado en 26 propiedades físicas, químicas y biológicas para definir un TDS donde seleccionaron 5 variables que incluyeron en el MDS. Para países como México donde han sido pocos los trabajos desarrollados a nivel de la definición de indicadores de calidad y donde no existe la posibilidad de contar con recursos económicos, el enfoque “mínimo conjunto de datos” (MDS) se considera sería el más conveniente a implementar.

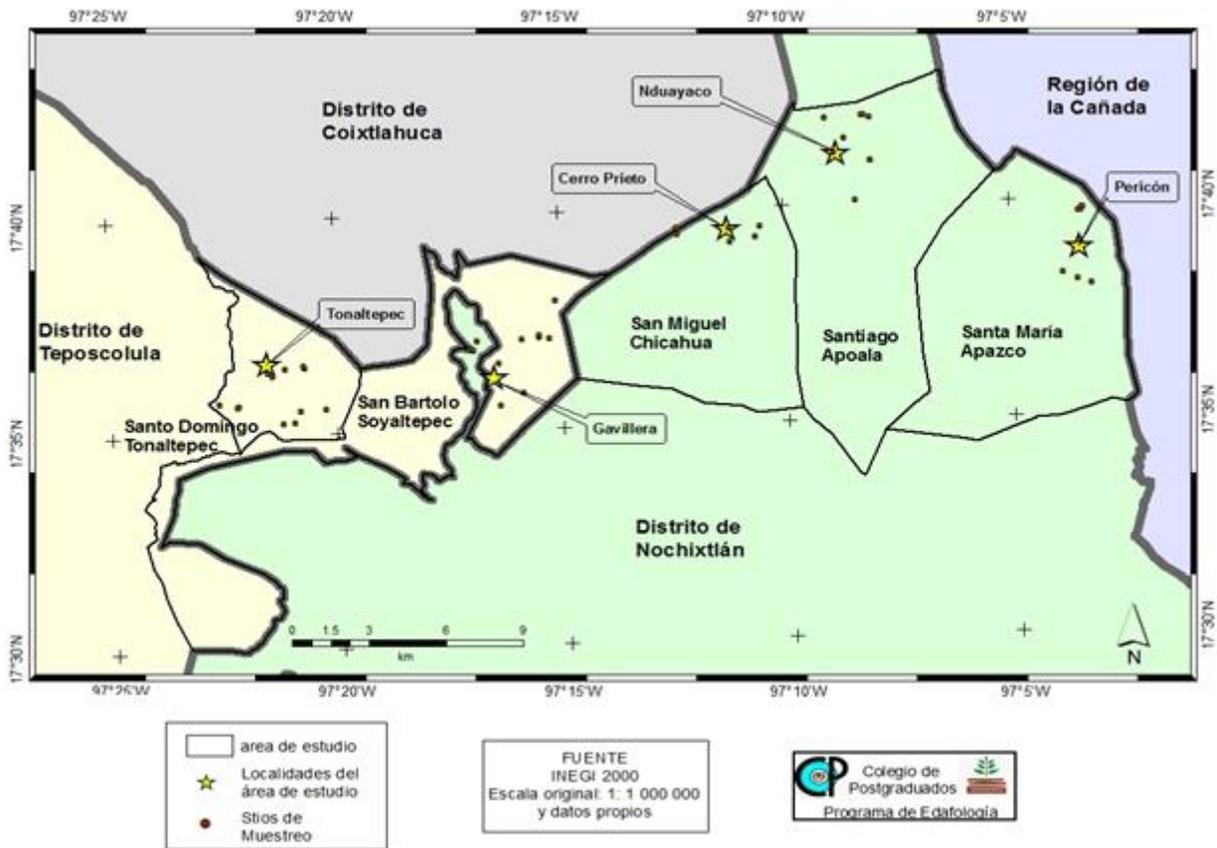
La alteración del nivel de fertilidad en los suelos degradados y consecuentemente la disminución de su capacidad productiva define la importancia de los indicadores de tipo químico para evaluar las afecciones sobre la calidad y fertilidad del suelo. En la literatura se consideran como indicadores químicos los siguientes: capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y lábil, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total y mineralizado, capacidad de adsorción de fosfatos, y los micronutrientes disponibles (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; SQI, 1996; Bautista *et al.*, 2004; Bautista y Etchevers, 2014). Para evaluar la calidad de suelo se deben tomar en cuenta dimensiones

espaciales y temporales porque ninguna propiedad es permanente (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista y Etchevers, 2014). Especialmente las áreas de estudio pueden ser, desde una parcela hasta una región, y la información puede extenderse a áreas más grandes de producción (Bautista y Etchevers, 2014). La dimensión temporal considera el intervalo de tiempo en el que cambia el indicador. Los indicadores no son universales y representan una visión del momento (Doran y Safley, 1997), por lo que de acuerdo a Cantú *et al.* (2007) es necesario validarlos a través del tiempo para registrar sus cambios. El evaluar la calidad del suelo permite monitorear constantemente un área, identificar cambios en sus características y proponer prácticas adecuadas de manejo (Doran y Parkin, 1994). En este trabajo se hace una revisión del estado de degradación de los suelos en la MAO a partir de información disponible. El objetivo de este estudio fue definir indicadores de calidad para evaluar el estado de la fertilidad de los suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña y generar una cartografía en la que se asocien estos indicadores (clases de calidad) con los sitios estudiados georeferenciados y el tipo de degradación de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cartografía

Se elaboró una primera cartografía para describir el área de estudio con la información existente y disponible de SEMARNAT – Colegio de Postgraduados (2002), INEGI (2007) y SEMARNAT (2012). La información fue procesada y estandarizada mediante el programa Arc Gis versión 10.1 de Environmental Systems Research Institute, Redlands, California (ESRI, 2013). Se generaron capas geográficas específicas del área de estudio mediante técnicas de análisis geográfico (Figura 1).



Una segunda cartografía se generó para caracterizar la degradación del área de estudio y se elaboró con la información reportada en tres estudios: (1) Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana

(SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002), (2) Documento de Referencia para la Estimación de la Erosión Actual del Suelo en México (CGG-SAGARPA y COLPOS, 2009), que define los grados de erosión y (3) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT, 2012) que identifica el tipo y causas principales de degradación de suelos. Se obtuvo una capa en forma vectorial del área de estudio para lo cual se sobrepuso la capa de puntos de los sitios de muestreo a los mapas de los tres estudios tomados como referencia.

La información fue procesada y estandarizada mediante el programa Arc Gis versión 10.1 Environmental Systems Research Institute, Redlands, California (ESRI, 2013). Los resultados sobre el estado de degradación de los sitios de muestreo, obtenidos a partir de esta segunda cartografía, se cotejaron mediante fotografías y observaciones en campo de cada sitio de estudio para verificar si las causas y grados de degradación del suelo de los sitios muestreados correspondía con la reportada en los mapas de referencia.

Muestreo de suelos

La investigación se realizó en un área ubicada en la parte noreste de la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) ($17^{\circ} 30'$ y $17^{\circ} 42'N$ y $97^{\circ} 00'$ y $97^{\circ} 25'O$) que cubre una superficie aproximada de 32, 919 ha (Figura 1). Se seleccionaron cincuenta y siete sitios de muestreo (44 agrícolas, 10 degradados y 3 de bosque), distribuidos en cinco localidades y cinco municipios Tonaltepec (Santo Domingo Tonaltepec), Gavillera, (San Bartolo Soyaltepec), Cerro Prieto (San Miguel Chichahua), Nduayaco (Santiago Apoala) y Pericón (Santa María Apazco).

Los sitios muestreados fueron:(1) 10 sitios agrícolas, 4 degradados y 1 de bosque en Tonaltepec, (2) 10 sitios agrícolas, 1 degradado y 1 de bosque en Gavillera, (3) 7 sitios agrícolas, 3 degradados y 1 bosque en Pericón, (4) 9 sitios agrícolas, 2 degradados y 1 bosque en Nduayaco y (5) 6 sitios agrícolas 2 degradados y 1 de

bosque en Cerro Prieto. A cada sitio le correspondió una muestra compuesta de suelo (formada por seis sub muestras obtenidas a una profundidad de 0 a 30 cm). Mediante la técnica de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de aproximadamente 2 kg.

El suelo se secó al aire y a temperatura ambiente y se tamizó usando una malla de 2 mm para posteriormente realizar los análisis químicos en laboratorio. Los sitios de donde se obtuvieron las muestras fueron georreferenciados para vincularlos con la información cartográfica de degradación y erosión, así como con las propiedades químicas evaluadas y con los indicadores de calidad y de degradación propuestos en este estudio.

Análisis químicos

Las características químicas evaluadas fueron: pH por potenciometría (relación suelo-agua 1:2), materia orgánica por combustión húmeda método Walkey and Black (Jackson, 1976) y fósforo Olsen (CSTPA, 1980). Para la determinación de las bases intercambiables se realizó la extracción de K y Na con acetato de amonio 1N pH7, en tanto que para Ca y Mg se usó acetato de sodio 1N pH 8.2 por su menor efecto en la solubilización de carbonatos de Ca y Mg presentes en los suelos del área de estudio (Cano *et al.*, 1984). La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se estimó mediante la suma de bases de intercambio (Cottenie, 1980). El carbono en la biomasa microbiana se determinó con el procedimiento de fumigación y extracción con cloroformo (Joergensen y Brookes, 1990).

Indicadores de calidad del suelo

En este estudio en lugar de usar los el conjunto de indicadores de suelo predefinidos por Gomez *et al.* (1996) and Singh y Khera (2009), sino que se seleccionaron atributos químicos del suelo para definir el “menor conjunto de

indicadores” (MDS) a usar. Para este estudio se seleccionaron como indicadores de calidad: pH en agua (1:2), materia orgánica (MO), P extractable Olsen (P_{ext}), K, Ca y Mg intercambiables (K_{int} , Mg_{int} , Ca_{int}), la CICE y el carbono en biomasa microbiana (método fumigación-extracción). Se consideró que estos son los parámetros que mejor representan el estado actual de los suelos de la MAO.

Se calcularon los indicadores de calidad para suelos agrícolas y degradados. Para ello se requirió definir los límites máximos (I_{max}) y mínimos (I_{min}) de los indicadores calculados. Como no existe una única forma para establecer estos valores se consideraron los siguientes criterios: conceptos teóricos, tipo de suelo, condiciones de suelo ideales para los cultivos potenciales en la zona de estudio, disponibilidad de nutrientes, presencia de carbonatos, rendimientos máximos de acuerdo a condiciones actuales del suelo, condiciones climáticas, y la experiencia de investigadores que han trabajado en la zona de estudio.

De manera similar se obtuvieron los “indicadores de calidad para los suelos de bosque”. En este caso, los valores máximo (I_{max}) y mínimo (I_{min}) se definieron en base a valores reportados en estudios anteriores en el estado de Oaxaca (Vergara, 2003) y compaginando similitudes en tipos de suelo, sistema arbóreo y características similares observadas por los investigadores en los recorridos de campo (Cuadro 1). Los indicadores fueron normalizados utilizando una escala 0-1. Para los indicadores de calidad estos valores representan, respectivamente, la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad (Cantú *et al.*, 2007).

El valor máximo del indicador (I_{max}) (valor normalizado $V_n = 1$) representa el valor ideal al que se aspira llegar o la mejor situación de calidad del suelo (Cantú *et al.*, 2007). En tanto que el valor mínimo del mismo (I_{min}) (valor normalizado $V_n = 0$) representa el mínimo deseable o la calidad mínima aceptable.

Cuadro 1. Atributos químicos usados como indicadores de calidad de suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca y valores límites.

Indicador	Valor máximo	Valor mínimo
	I_{max}	I_{min}
<u>Suelos agrícolas y degradados</u>		
pH (H ₂ O)	7.5	5.0
Materia orgánica (MO)	6.0	2.0
P _{extractable} (Olsen)	20.0	8.0
Ca _{intercambiable}	35.0	8.0
Mg _{intercambiable}	5.0	2.0
K _{intercambiable}	1.0	0.2
CICE	40.0	15.0
C Biomasa microbiana	400.0	10.0
<u>Suelos de bosque</u>		
pH (H ₂ O)	6.5	4.5
Materia orgánica (MO)	8.0	3.0
P _{extractable} (Olsen)	20.0	10.0
Ca _{intercambiable}	30.0	10.0
Mg _{intercambiable}	4.0	1.0
K _{intercambiable}	1.0	0.2
CICE	35.0	10.0
C Biomasa microbiana	600.0	50.0

I_{min} = valor mínimo del atributo; *I_{max}* = valor máximo del atributo.

Para los indicadores de los suelos de bosque, el valor máximo (*I_{max}*) representa la condición más cercana al ecosistema de referencia (bosque), en tanto que si son más lejanas a uno (*I_{min}*) (valor normalizado $V_n = 0$), indican que los sitios presentan un uso que probablemente ya no es forestal. El cálculo del valor normalizado para ambos indicadores se realizó de la siguiente manera:

$$V_n = (I_m - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

V_n = valor normalizado del indicador

I_m = medida experimental del atributo considerado como indicador

I_{\min} = valor mínimo del atributo considerado como indicador

I_{\max} = valor máximo del atributo considerado como indicador

Para la interpretación de los indicadores de calidad generados para los suelos de los municipios de la MAO se propone una escala de transformación que considera siete clases (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clases de calidad propuestas para suelos de la Mixteca Alta Oaxaca.

Índice de calidad	Escala	Clase
Exceso	1.00 – 1.30	1
Muy alta calidad	0.80 – 1.00	2
Alta calidad	0.60 – 0.79	3
Moderada calidad	0.40 – 0.59	4
Baja calidad	0.20 – 0.39	5
Muy baja calidad	0.00 – 0.19	6
Déficit	-1.0 – 0.00	7

La cual se elaboró tomando como base la propuesta de Cantú *et al.* (2009) que comprende cinco clases, a la cual se le adicionó dos clases más, para ubicar suelos de la MAO, debido a que se obtuvieron valores de los indicadores por arriba y por debajo de 0 y 1, límites mínimo y máximo, respectivamente definidos por Cantú *et al.* (2009). En el caso de la interpretación de los indicadores de suelos de bosque se usaron las mismas clases.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área de estudio forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y las subprovincias fisiográficas Sierras Centrales de Oaxaca (71.4%) y Mixteca Alta (28.6%). El clima es templado subhúmedo y la sierra es la topoforma predominante (48.2%). Los suelos representativos son Leptosoles, Pheozem y Regosoles (INEGI, 2007; IUSS Working Group WRB, 2014). Los Leptosoles son suelos delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo, se asocian a sitios de compleja orografía y son comunes en áreas montañosas y en regiones altamente erosionadas, su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad. Los Pheozem son oscuros y ricos en materia orgánica, presentan limitantes agrícolas ya que son susceptibles a erosión eólica e hídrica y a sequías periódicas. Los Regosoles, al igual que los dos anteriores se forman sobre materiales no consolidados, se encuentran dentro de los suelos más fértiles por lo que su principal uso es agrícola. En el área de estudio domina la vegetación de pastizal inducido. El uso de suelo es en su mayoría agricultura de temporal. El sistema agrícola predominante de los sitios de muestreo es la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF).

La cartografía elaborada con la información disponible (Figura 2) abarca una superficie de 32,918.8 ha e indica que el principal tipo de degradación en las áreas donde se localizan los sitios de estudio se debe a erosión hídrica (32.2 %) (10,564.1 ha) y a la declinación de la fertilidad del suelo con reducción del contenido de materia orgánica (33 %) (10,864.0 ha). El 17.5 % (5,764 ha) del área cartografiada (claves de la cartografía HC/G, HC/G/A, HC/A/G, HC/G/E) presenta erosión hídrica con deformación del terreno, lo cual se asocia al sobrepastoreo, las actividades agrícolas y la sobreexplotación de vegetación para uso doméstico. Evidencias de este tipo de degradación se observaron en campo, en Gavillera y Cerro Prieto donde se observaron cárcavas, canales o movimiento de masas resultado de la remoción de suelo.

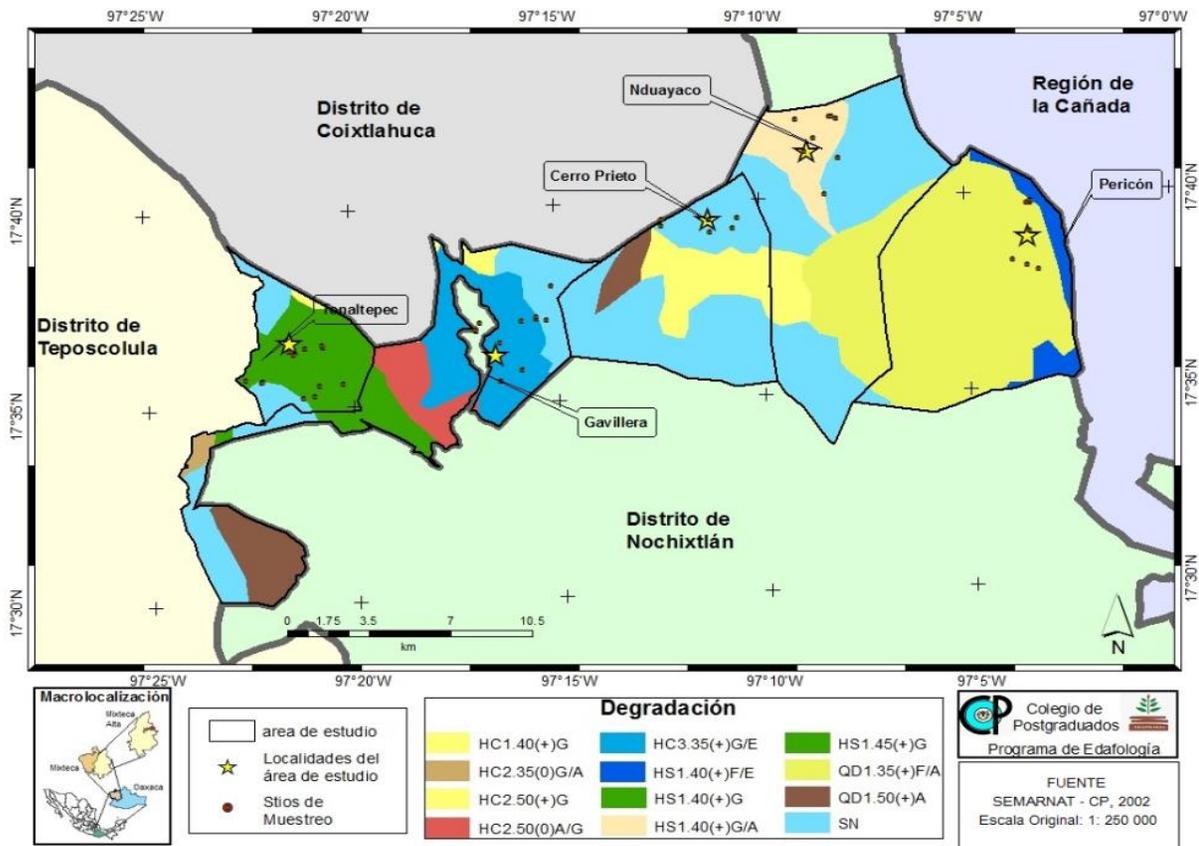


Figura 2. Sitios de muestreo y tipo de degradación de suelos de la Mixteca Alta de Oaxaca.

En 14.7 % de la superficie cartografiada (4,800.1 ha) se reporta erosión hídrica que se presenta con pérdida del suelo superficial (claves en la cartografía HS/F/E, HS/G y HS/G/A). Las actividades que contribuyen principalmente a este tipo de degradación son el sobrepastoreo, en el caso del municipio de Tonaltepec y la actividad agrícola en el municipio de Nduayaco. Principalmente en Tonaltepec, contribuye a la degradación del suelo la deforestación y sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico, municipio que demanda cantidades importantes de leña para elaboración de artesanías de barro.

Las observaciones en terreno corroboraron la remoción del suelo por efecto de las escorrentías. En 33 % (10864 ha) de la superficie cartografiada se presenta

declinación de la fertilidad del suelo con reducción del contenido de materia orgánica (claves de la cartografía QD/F/A y QD/A). Este tipo de degradación es la de mayor incidencia en el área de estudio, se asocia a la deforestación y a las actividades agrícolas, entre otras la exportación de los residuos de cosechas y quemas, como lo corroboraron las observaciones es suelos del municipio Pericón. La disminución neta de nutrimentos y de la materia orgánica ha provocado una menor productividad de los suelos.

En la Figura 3 se presentan los grados de erosión asociados al área cartografiada obtenida con la información disponible. Casi la mitad (47.7 %) del área de estudio presenta erosión leve (15,691.4 ha) y 25.1 % (8,262 ha) una erosión extrema o fuerte. La erosión moderada es menos frecuente en la zona (16.7 %) (5,485.1 ha). Una superficie considerable del área cartografiada (10.5 %) (3480.5 ha) es estable en condiciones naturales lo que correspondería a áreas de bosque poco o no perturbado (SEMARNAT-Colegio de Posgraduados, 2002).

Los sitios de muestreo en las localidades de Tonaltepec y Gavillera se ubican en las zonas con degradación extrema. En tanto que los sitios de muestreo de las localidades de Nduayaco, Pericón y Cerro Prieto se localizan en zonas de degradación leve a moderada.

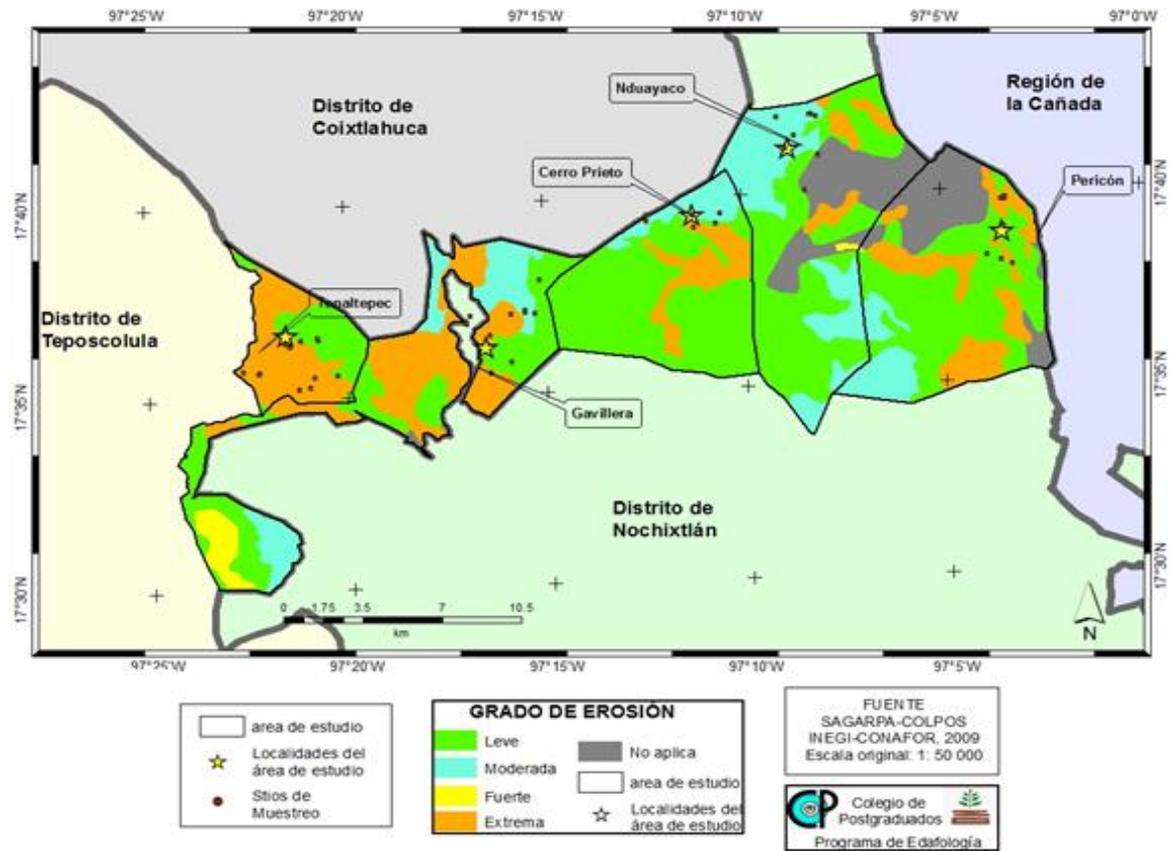


Figura 3. Grados de erosión en los suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.

Análisis químico de los suelos

Los valores de pH de los suelos agrícolas variaron de 6.80 a 8.17 y los de los suelos degradados de 6.40 a 6.97. Los valores más bajos de pH en los suelos degradados indican una ligera acidificación en estos últimos, condiciones de acidez semejantes a los suelos de bosque (pH 5.7-6.8). En general, la materia orgánica (MO) presentó porcentajes más elevados en los suelos agrícolas (0.63-4.0 %) que en los degradados (0.35-1.40 %).

En tanto que los suelos de bosque se registraron los mayores contenidos de materia orgánica como era de esperarse (4.4-18.5 %). El contenido elevado de MO en el suelo agrícola de Pericón (4 %), se explica por el aporte de residuos de alimentos y de composta en algunas parcelas. Esto no se observó en suelos agrícolas de Tonaltepec donde el suelo tiene < 1 % MO. Llama la atención los niveles bajos de MO

(< 1.0 %) en los suelos degradados de Nduayaco y Cerro Prieto, los que se explican por la pérdida de suelo de la superficie, lo cual resulta de la erosión hídrica de los sitios.

Cuadro 3. Atributos químicos evaluados en los suelos de la Mixteca Alta Oaxaca.

Comunidad	pH	MO %	P _{ext} ppm	Ca _{int} _____	Mg _{int} cmol kg ⁻¹	K _{int} _____	CICE	C _{BM} g kg ⁻¹ suelo
<u>Suelos agrícolas</u>								
Tonaltepec	8.17a	0.63b	8.62a	32.25 ^a	5.07a	0.31b	41.4a	37.43b
Pericon	7.90a	4.00b	20.58a	33.40 ^a	2.90a	0.50b	38.9a	416.93b
Nduayaco	7.26ba	2.27b	17.97a	20.82 ^a	2.79a	0.19b	24.9a	194.53b
Gavillera	7.23ba	2.16b	9.27a	20.35 ^a	1.29a	0.26b	22.6a	146.17b
Cerro Prieto	6.80a	1.66b	10.40a	6.59 ^a	0.95a	0.14b	7.93a	110.17b
<u>Suelos degradados</u>								
Tonaltepec	6.97ba	0.35b	9.3a	25.70 ^a	4.99a	0.29b	24.9a	14.94b
Pericon	6.90ba	1.36b	2.93a	16.59 ^a	16.52a	0.20b	33.8a	141.58b
Nduayaco	6.50ba	0.55b	7.00a	13.16 ^a	3.76a	0.18b	17.7a	17.44b
Gavillera	7.20ba	1.40b	12.80a	9.65 ^a	2.51a	0.16b	12.90a	127.43b
Cerro Prieto	6.40ba	0.70b	1.60a	2.83 ^a	1.18a	0.23b	4.45a	29.53b
<u>Suelo de bosque</u>								
Tonaltepec y Gavillera	6.8b	4.4 ^a	2.2a	7.0a	1.6a	0.26a	9.01a	312.63a
Cerro Prieto y Nduayaco	5.7b	6.0a	2.6a	2.4 ^a	0.8a	0.28a	3.55a	417.07a
Pericon	6.5b	18.5a	3.7a	42.8 ^a	2.8a	3.47a	49.52a	1980a
DMS	1.035	2.707	13.537	19.207	7.240	0.635	22.066	297.3

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$); DMS: diferencia mínima significativa.

En el caso del P_{extractable}, también se observó la misma tendencia de un mayor contenido de éste en suelos agrícolas (8.62-20.58 ppm) respecto a los degradados (1.60-12.80 ppm). Los valores más altos de Ca_{int} y de la CICE en los suelos agrícolas (20.35-33.40 cmolkg⁻¹ y 22.3-41.4 cmolkg⁻¹, respectivamente) indican la existencia de capas de carbonato de calcio en superficie en todos los sitios, con excepción de Cerro Prieto. En los suelos degradados, los valores para Ca_{int} y de la CICE son menores que en suelos agrícolas (9.65-25.70 cmolkg⁻¹ y 12.90-33.80 cmolkg⁻¹ respectivamente)

y estarían indicando la pérdida de carbonatos como resultado de la erosión hídrica. En los sitios de Cerro Prieto los contenidos de Ca y CICE son los más bajos de todos los sitios evaluados. Los valores del C_{BM} también fueron mayores en suelos agrícolas (37.43-416.93 g kg⁻¹) que en los degradados (14.94-141.58 g kg⁻¹) como resultado de mejores condiciones para el desarrollo de microorganismos.

En los suelos de bosque los valores de C_{BM} fueron los más elevados (312-1980 g kg⁻¹suelo). Llama la atención la importante disminución del C_{BM} en los suelos degradados, lo cual refleja el impacto en los suelos del cambio de uso de suelo. El contenido de Mg_{int} no mostró diferencias significativas en suelos agrícolas y degradados, con excepción del sitio degradado en Pericón donde Mg_{int} es mayor (16.52 cmol kg⁻¹) en el sitio degradado respecto al agrícola (2.90 cmol kg⁻¹).

El contenido de K_{int} en todos los sitios agrícolas y degradados de las cinco localidades fue < 1.0 cmol kg⁻¹. Los sitios de los bosques se caracterizan por valores de pH ácido a casi neutro (5.7-6.8), MO variable pero tendiente a valores altos (4.4-18.5 %) y bajos contenidos de P_{ext} (2.2-3.7 ppm). Las bases intercambiables (Ca, Mg y K) y la CICE reportadas para los bosques son notablemente más bajas que en los sitios agrícolas y degradados de las mismas localidades, lo que se asocia a su naturaleza y a un complejo de intercambio mayoritariamente compuesto de material orgánico, donde las bases de intercambio son bajas.

Una excepción fue el bosque tomado como referencia para la localidad de Pericón cuyo valor de pH es 6.5 y que presentó un contenido de Ca_{int} muy alto (42.8 cmol kg⁻¹) y por lo tanto también una muy alta (49.52 cmol kg⁻¹) CICE, así como mayor contenido de K y Mg intercambiables, respecto al resto de los sitios de bosque. Los resultados anteriores indican que en los sitios de las cinco localidades las diferencias de pH, MO, Ca_{int} , CICE y C_{BM} entre suelos agrícolas y degradados fueron las más contrastante, por lo que se consideró a estos atributos para definir los indicadores de la calidad del suelo.

Es importante no dejar de considerar que las variaciones que presentan los atributos evaluados en los sitios agrícolas y degradados (Cuadro 3) se explican, en cierta proporción, por la naturaleza variable de los suelos y los distintos manejos agrícolas.

Indicadores de calidad del suelo

El indicador de pH presentó valores entre 0.56 y 1.28 en suelos agrícolas y degradados. En los sitios donde el valor del indicador de pH fue mayor a uno, como fue el caso de los suelos agrícolas de Tonaltepec (1.28) y Pericón (1.16), esto indica que el pH está por arriba del valor considerado como óptimo para el desarrollo de cultivos. En ambos casos se explica por el elevado valor del pH de estos suelos (8.2 y 7.9, respectivamente) que se asocia a la presencia de material calcáreo en superficie.

Por lo tanto se requieren acciones correctivas ya que esta situación puede ocasionar problemas de disponibilidad de micronutrientes como Fe, Zn, Mn y Cu. Los indicadores de MO y K_{int} fueron los más bajos, tanto en los suelos agrícolas como en los degradados de las cinco localidades lo cual los sitúa en una clase de calidad muy baja. Esto indica que el contenido de MO y de K_{int} está por debajo de los niveles mínimos requeridos para el desarrollo de cultivos.

Los valores negativos para el indicador de MO en los suelos degradados de las cinco localidades, y en los suelos agrícolas de Tonaltepec y Cerro Prieto indican un déficit de MO en esos suelos.

De manera similar el indicador de P_{ext} fue negativo en los suelos degradados de las cinco localidades, y muy bajo (0.05) en el sitio agrícola de Tonaltepec. Estos valores bajos se explican por la exportación de P_{ext} suelo de los sitios degradados resultado de la erosión. Esta situación contrasta con la de los suelos agrícolas de

Pericón y Nduayaco donde este indicador fue alto (1.05 y 0.83, respectivamente) colocando a estos sitios dentro de una clase de calidad alta a muy alta, con relación a este indicador. Estos sitios reportan, de acuerdo a la cartografía (Figura 3) una degradación de leve a moderada. Adicionalmente el sitio de Pericón tiene un manejo de fertilización distinto al de las otras localidades con la adición de compostas.

Cuadro 4. Indicadores de calidad para suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.

Comunidad	pH	MO	P _{ext}	Ca _{int}	Mg _{int}	K _{int}	CICE	C _{biomasa}
<u>suelos agrícolas</u>								
Tonaltepec	1.28	-0.35	0.05	0.90	1.02	0.14	1.06	0.07
Pericon	1.16	0.50	1.05	0.94	0.30	0.38	0.96	1.04
Nduayaco	0.92	0.08	0.83	0.47	0.26	0.00	0.40	0.47
Gavillera	0.88	0.05	0.11	0.46	-0.24	0.08	0.30	0.36
Cerro Prieto	0.72	-0.08	0.20	-0.05	-0.35	-0.08	-0.28	0.26
<u>suelos degradados</u>								
Tonaltepec	0.80	-0.40	-0.10	0.66	1.00	0.11	0.50	0.01
Pericon	0.76	-0.15	-0.43	0.32	0.89	0.00	0.94	0.34
Nduayaco	0.60	-0.35	-0.08	0.19	0.59	-0.03	0.14	0.02
Gavillera	0.88	-0.15	-0.43	0.06	0.17	-0.05	-0.11	0.30
Cerro Prieto	0.56	-0.33	-0.53	-0.19	-0.27	0.04	-0.53	0.05
<u>Suelos de Bosque</u>								
Tonaltepe, Gavillerra	1.16	0.28	-0.78	-0.15	0.21	0.08	-0.55	0.478
Cerro Prieto	0.60	0.60	-0.74	-0.38	-0.07	0.10	-0.82	0.667
Nduayaco, Pericon	1.00	3.10	-0.63	1.64	0.60	4.09	1.48	3.509

En los suelos agrícolas de Tonaltepec y Pericon, los valores para el indicador de Ca_{int} fueron 0.90 y 0.94 cmol kg⁻¹, respectivamente y los de CICE 1.06 y 0.96, respectivamente. Los valores altos para CICE deben tomarse con reserva ya que constituye una medida indirecta de la capacidad de intercambio de cationes y su cálculo puede estar influido por el método analítico. Estos valores elevados se explican

por el tipo y la naturaleza química de los suelos de estas localidades. Los sitios de Tonaltepec se ubican en zonas de alta degradación (Figura 3) y la mayoría corresponden a suelos reportados como Leptosoles, que se caracterizan por la presencia de material calcáreo.

Los suelos de Pericón aunque están reportados como Pheozem, presentan también material calcáreo de acuerdo a las observaciones en campo. Los valores de estos indicadores cercanos a uno indican que el contenido de Ca_{int} en los sitios agrícolas es muy cercano al límite superior considerado para suelos agrícolas de estas localidades. Por otra parte, estos elevados contenidos de Ca_{int} pudieran explicar los valores bajos de P_{ext} en algunos suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca. Los indicadores para Ca_{int} en los suelos agrícolas de Nduayaco y Gavillera fueron 0.46 a 0.47 respectivamente, y los del indicador para CICE fueron 0.30 y 0.40, respectivamente.

Éstos definieron una calidad moderada (para Ca_{ext}) y baja (para CICE). El valor de estos indicadores en los suelos agrícolas menores a los de los sitios en Tonaltepec se explica por contenidos menores de calcio en el suelo. Los indicadores para Ca_{int} y CICE en los suelos degradados de Tonaltepec, Pericón, Nduayaco y Gavillera fueron menores a los de suelos agrícolas, lo que refleja una disminución de manera importante de la cantidad de calcio en los suelos degradados, resultado de la pérdida de suelo por erosión hídrica. Para el caso de los sitios de Cerro Prieto, los indicadores de MO, P_{ext} , Ca_{int} , Mg_{int} , K_{int} , CICE tanto de los suelos agrícolas como de los degradados son en su mayoría negativos, y definen una clase de calidad muy baja. Es decir, estos atributos químicos se encuentran por debajo de los niveles requeridos para el establecimiento de cultivos agrícolas.

Estos resultados indican que los suelos agrícolas y degradados de Cerro Prieto merecen una especial atención en cuanto acciones que se propongan para mejorar su calidad y fertilidad. Los suelos de Cerro Prieto fueron reportados como Regosoles en la cartografía disponible, los cuales se caracterizan por ser suelos

jóvenes, con poca materia orgánica. La degradación que presentan éstos podría asociarse a afloramientos de rocas, de ahí la calidad muy baja de los mismos. Con respecto al indicador para la biomasa microbiana (C_{biomasa}), éste presentó un valor cercano a uno en los sitios agrícolas de Pericón, lo que confirma que en este sitio el nivel de este atributo es cercano al óptimo, producto de la adición de material orgánico que favorece el desarrollo de la biomasa microbiana. Este indicador se reduce a 0.34 en los suelos degradados de la misma localidad como resultado de la erosión. En los sitios de Nduayaco y Cerro Prieto el indicador de C_{biomasa} disminuyó de 0.47 y 0.26, respectivamente en suelos agrícolas a ≤ 0.05 en los suelos degradados. Lo anterior se asoció a una disminución de la MO en los sitios degradados producto de la erosión hídrica.

En el sitio Gavillera donde los porcentajes de MO presentaron niveles similares en los suelos agrícolas (2.1 %) y degradados (1.4 %) el indicador para C_{biomasa} fue muy semejante (0.30-0.36). Un caso particular corresponde a los sitios de la localidad de Tonaltepec donde el valor para el indicador C_{biomasa} fue casi cero en los sitios agrícolas y degradados, lo que explica por los niveles muy bajos de MO lo que define una muy baja calidad de los suelos agrícolas y degradados de esta localidad.

En los suelos de bosque cercanos a las localidades de Tonaltepec y Gavillera el valor del indicador pH mayor a 1 indica que este atributo excede el pH considerado como óptimo para el desarrollo de este ecosistema. Probablemente los porcentajes de MO bajos (4.4 %) en los suelos de este sitio están asociados a la elevada degradación de la zona (Figura 3) y la presencia de material calcáreo ($7.0 \text{ cmol kg}^{-1} \text{ Ca}_{\text{int}}$), lo que conduce a un valor de pH ligeramente más elevado (6.8) al esperado para suelos forestales.

Estos suelos se ubican dentro de una clase de calidad de baja (0.20-0.39) a moderada (0.40-0.59) de acuerdo a los valores presentados por los indicadores para MO, C_{biomasa} y Mg_{int} . Los suelos del bosque de Cerro Prieto presentaron condiciones

similares a los de Tonaltepec y Gavillera, con excepción del indicador de pH que presentó valores menores a uno (0.60). Esto indica que hay condiciones más cercanas a las óptimas consideradas para los sistemas forestales. Los valores de los indicadores para MO y C_{biomasa} (0.60 y 0.667, respectivamente) fueron mayores a los obtenidos en los suelos forestales de Tonaltepec y Gavillera. Caso especial son los suelos de bosque cercanos a las localidades de Nduayaco y Pericón donde los valores de los indicadores para pH, MO, Ca_{int} , K_{int} , CICE y C_{biomasa} fueron mayores a uno y para P_{ext} negativo (Cuadro 4), lo que indica que presentan condiciones muy alejadas a las óptimas consideradas para el desarrollo de suelos forestales.

En la Figura 4 se presenta la cartografía en la que se integran los sitios muestreados, las clases de calidad y los tipos de degradación. En este caso las clases de calidad se definieron considerando los indicadores de MO, K_{int} y C_{biomasa} que fueron los más sensibles a los cambios en las condiciones del suelo y por lo tanto ellos deben ser capaces de identificar las condiciones apropiadas de un suelo sustentable (Gomez *et al.*, 1996; Aparicio y Costa, 2007).

La MO es un indicador clave que afecta la calidad del suelo lo que es consistente con lo encontrado por otros autores (Gregorich *et al.* 1997; Lal *et al.* 1999; Govaerts *et al.* 2006; Ghaemi *et al.*, 2014). Los indicadores relacionados con la presencia de carbonatos en los sitios de muestreo, como son el pH, Ca_{int} y CICE no fueron considerados en la definición de las clases de calidad representadas en la Figura 4 debido a que los carbonatos y valores de pH elevados son propiedades inherentes a la naturaleza de los suelos.

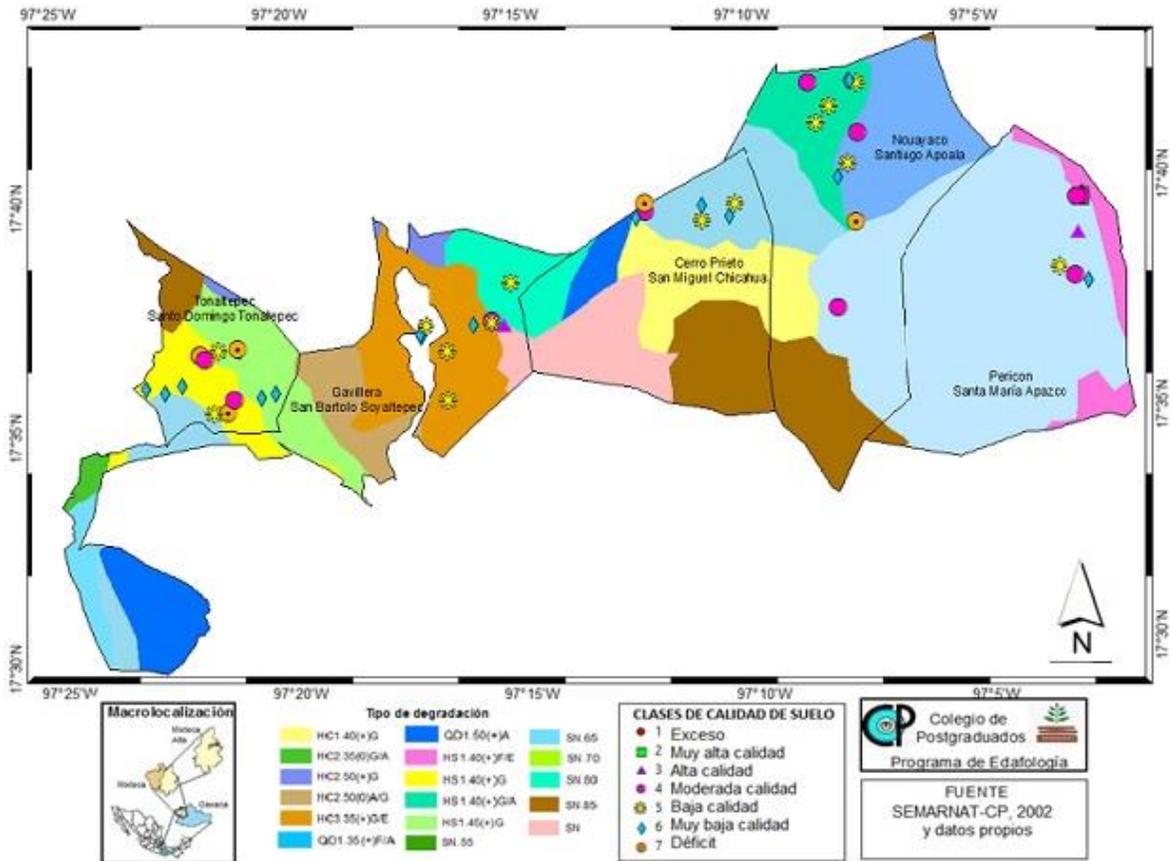


Figura 4. Cartografía de tipos de degradación y clases de calidad de los suelos de la Mixteca Alta-Oaxaca.

La acción de estos factores, que limitan la calidad y la fertilidad de los suelos, se acentúa como resultado de la pérdida de suelo superficial asociado a la erosión hídrica de la zona. La mayor parte de los suelos seleccionados en Cerro Prieto se ubican dentro de una clase de calidad de baja a muy baja, de acuerdo con los valores negativos del indicador para la MO. Los niveles de MO están por debajo de los óptimos requeridos para el desarrollo de cultivos agrícolas. En las localidades Gavillera, Nduayaco y Tonaltepec, al menos la mitad de los suelos seleccionados presentaron clases de calidad baja a muy baja. Estos sitios se caracterizan por presentar valores muy elevados de los indicadores de calidad para pH y Ca_{int} y valores muy bajos a negativos del indicador para MO lo que explica la limitada fertilidad de los suelos.

De todos los sitios estudiados, solo algunos suelos de la localidad de Pericón se ubicaron en una clase de calidad moderada, ello como resultado de la aplicación de materiales orgánicos al suelo, lo que elevó la MO y el P_{ext} . Los suelos de las cinco localidades presentan erosión hídrica asociada a la pérdida de suelo superficial, lo que conlleva a una declinación de la fertilidad del suelo provocada por la reducción de la MO (Figura 4). El uso de este tipo de índices puede ayudar a los campesinos de estas zonas y a los tomadores de decisiones de las localidades seleccionadas (Comités Rurales, etc.) a la selección de estrategias para un mejor manejo del suelo a partir del monitoreo de los cambios en la calidad del suelo.

Estos resultados demuestran que una selección sitio específico de los indicadores, en lugar de considerar un conjunto de indicadores predefinidos, puede proveer un mejor entendimiento de las condiciones del suelo como ya se ha constatado en otros estudios (Ghaemi *et al.*, 2014). Lo cual es muy importante de considerar en países como México en donde los campesinos y tomadores de decisión en políticas agrícolas tienen poca disponibilidad económica para desarrollar estudios de este tipo.

CONCLUSIONES

El indicador de calidad para la MO es el que mejor define la calidad de los suelos de las cinco localidades seleccionadas en la MAO. Los valores negativos o muy cercanos a cero de este indicador en suelos agrícolas y degradados se asocian a la erosión hídrica con declinación de la fertilidad del suelo por reducción de la MO. El indicador P_{ext} resultó ser muy eficiente para definir la calidad de los suelos en los sitios Tonaltepec y Pericón. El indicador $C_{biomasa}$ también se puede usar para evaluar la calidad de los suelos de la MAO, sin embargo el uso del mismo requiere de una infraestructura más especializada y de mayor costo que la requerida para la evaluación de la MO. La asociación de los indicadores de calidad y clases de calidad, de cada sitio evaluado, con los tipos de degradación definidos en la cartografía, permite definir prácticas más cercanas al nivel sitio específico para recuperar la fertilidad del suelo. Los indicadores de calidad generados para los suelos agrícolas, degradados y de bosque de la MAO, evidencian el estado de degradación de suelos de esta región del país, y permiten proponer medidas correctivas para evitar una mayor degradación de éstos.

LITERATURA CITADA

- Aparicio, V., and J. L. Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155–165.
- Astier, M., M. Maass-Moreno, y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Bautista-Cruz. A., J. Etchevers–Barra, F. del Castillo R., y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 2004/2.
- Bautista C. A. y J. D. Etchevers B. 2014. Una revisión sobre los conceptos de la calidad del suelo: sus indicadores e índices. Editorial Académica Española. ISBN 978-3-8473-6509-9.
- Bi, C. J., Z. L. Chen, J. Wan, and D. Zhou. 2013. Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types. *Pedosphere* 23: 194-204.
- Bradomín, J. M. 1992. "Toponimia de Oaxaca. Crítica Etimológica, 3ª edición, Oaxaca, México, pp. 171 y 172.
- CGG-SAGARPA-COLPOS. 2009. Documento de Referencia para la Estimación de la Erosión Actual del Suelo en México. Proyecto desarrollado por el Colegio de Postgraduados para la Coordinación General de Ganadería de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, bajo la Coordinación de Fernando Paz, con la colaboración de Carlos Omar Cruz, Jesús Argumedo y Víctor Romero del INEGI y Rigoberto Palafox de la CONAFOR, México, D.F. 46 p.
- Cano, O. M., C. Torres., M. Vargas de Calderón., H. Moreno; A. Cruzado, J. Huamaní, I. Castilla. 1984. Análisis de Suelos, Tejido vegetal, Aguas y Fertilizantes. Manual Téc. No. 3. Dpto. de Suelos. Estación Experimental Agrícola. La Molina-INIPA. Lima- Perú. 118 pp. Pp 47-53.

- Cantú, M. P., A. R. Becker., J. C. Bedano., T. B. Musso & H.F. Schiavo. 2002. Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.
- Cantú M.P., A. R. Becker, A. C. Bedano., H. F. Schiviano. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 25: 173-178.
- Cantú M.P., A. R. Becker, A. C. Bedano., H. F. Schiviano and J. B. Parra. 2009. Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Cordoba, Argentina. *Cuadernos Lab. Xeoloxico de Laxe. Coruña* 34: 203-214.
- Cottenie, A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations, FAO. *Soil Bulletin 38/2*. Rome. FAO, 250 p.
- CSTPA. 1980. Handbook on reference methods for soil testing (Revised Edition). Council Soil Testing and Plant Analysis. Athens Georgia, USA.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Doran, J. W., D. C. Coleman, D. C. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds). Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. pp: 3-21.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *In Methods for assessing Soil quality*. SSSA Special Publication N° 49. Wisconsin, USA. p. 25-37.
- Doran, J.W. and M. Safley. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. *In Pankhurst, C; Doube, BM; Gupta, VVSR. eds. Biological indicators of soil health*. CAB International, Wallingford. p. 1-28.

- ESRI. 2013. Software ArcGIS 10.1. Redlands, CA. USA.
- Ghaemi, M., A. R. Astarai, H. Emami, M. Nassiri Mahalati, S. H. Sanaeinejad. 2014. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *J. of Soil Sci. and Plant Nut.* 14: 987-1004.
- Gomez, A. A., D. E. Kelly S., J. Syers K., K. Coughlan J. 1996. Measuring sustainability of agricultural systems at farm level. *In: Doran J.W. and A. Jones J. (eds). Methods for assessing soil quality. SSSA Special Publication Number 49, Soil Science Society of America, INC., Madison, WI, pp: 401-410.*
- Govaerts, B., K. Sayre D., J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.* 87: 163–174.
- Gregorich, E.G., M. Carter R., J. Doran W., C. Pankhurst E., and L. Dwyer M. 1997. Biological attributes of soil quality. *In: Gregorich, E.G., and M. Carter R. (eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. New York, NY. Pp: 81 –114.*
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática) 2007. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, Escala 1: 250 000. (Continuo Nacional) http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consultado en enero 2012).
- IUSS Working Group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 181 p.
- Jackson, M.L. 1976. Análisis Químico de Suelos. Omega, Barcelona. 662 p.
- Joergensen, R.G., and P. Brookes C., 1990. Ninhydrin reactive measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biol. & Bioch.* 22: 1023–1027.

- Karlen, D.L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Shuman. 1997. Soil quality: Concept, rationale, and research needs. *Soil Science Society of America Journal* 60:4-10.
- Karlen D.L., J.C. Gardner., M.J. Rosek. 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *J. Prod Agric.* 11, p 56–60.
- Lal, R., D. Mokma., B. Lowery. 1999. Relation between soil quality and erosion, *In: Lal, R. (ed), Soil quality and soil erosion.* Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IO, pp: 237–258.
- Larson, W. E., and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *In: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol.2. IBSRAM Proc.12(2).* International Board for Soil Resources and Management. Bangkok, Thailand.
- Liu, Z., W. Zhou, J. Shen, S. Li, and C. Ai. 2013. Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity. *Biol. Fert. Soils* 50: 537-548.
- Ortiz S., Ma de la L., M. Anaya, y W. J. Estrada Berg. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra, Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Nacional de Zonas Áridas-Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.
- Qi. Y., L. Jeremy D., B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu. Province, China. *Geoderma*, 149:325-334.
- Shukla, M.K., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. Principal component analysis for predicting corn biomass and grain yields. *Soil Sci.* 169: 215–224.
- Singh, M.J., and K. Khera L. 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Res. Manag.* 23:152-167.

- SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D. F. México. Escala 1:250 000. 68 pp.
- SEMARNAT, 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, SNIARN. Edición 2008. Gobierno Federal. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/index.html. (Consultado Mayo 2013).
- Seybold, C.A., M. J. Mausbach., D.L. Karlen, y H. H. Rogers. 1997. Quantification of Soil Quality. En Soil Process and the Carbon Cycle (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A.), pp. 387-403, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- SQI (Soil Quality Institute). 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Torres B. E., B. J. Cortes., S. E. Mejía., A. G. Exebio., A. L. H. Santos., Ma. E. P. Delgadillo. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca “El Joselito”, Jesús María, Jalisco. TERRA Latinoamericana. 2:enero-marzo 2003, pp. 117-126.
- Vergara S. M. A. 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.

CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE FERTILIDAD DE SUELOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

INTRODUCCIÓN

Es claro que donde quiera que el hombre ha intervenido los recursos naturales ha causado su deterioro. Esto es especialmente cierto en el caso de los suelos y es de especial importancia para los investigadores en ciencias agrícolas, en quienes recae la misión de dotar permanentemente a la humanidad de alimentos de buena calidad y en la cantidad adecuada para que todos los seres humanos puedan alcanzar sus requerimientos nutritivos diarios. La degradación de los suelos es un problema causado principalmente por cambios en el uso y por la adopción de prácticas de manejo propias de cada cultivo. La evaluación de los efectos de la actividad agropecuaria en el suelo permite establecer los parámetros necesarios para estimar la magnitud del impacto ambiental ocasionado por los sistemas productivos, lo que ayuda a la toma de decisiones enfocadas en la conservación, la sostenibilidad, y la productividad del suelo (Jamiy *et al.*, 2015).

Pese a la importancia del suelo para la existencia de la vida en el planeta, la sociedad no le ha dado la atención ni cuidado que se merece. Su degradación es, hoy por hoy, una de las amenazas más serias que se cierne sobre el futuro de la humanidad y, a diferencia de otras crisis como las económicas, sus efectos son casi permanentes (Bautista *et al.*, 2004). El deterioro se relaciona en gran parte con lo que se llama la preparación de una cama de semillas para establecer un cultivo y con el abandono del tipo de agricultura tradicional que combinaba actividades agrícolas y pecuarias. Hoy se usan técnicas alternativas menos agresivas que las tradicionales, pero hay una afectación al sustrato suelo, que será difícil de recuperar.

La preparación convencional de suelos, consistente en un paso de arado, uno o dos rastreos y la ausencia de incorporación de residuos, ha propiciado severos grados de degradación del suelo; en especial, en las zonas áridas y semi-áridas, donde de forma natural la fertilidad es baja, principalmente por el escaso contenido de materia orgánica (Beltrán *et al.*, 2005). Cuando en los sistemas agrícolas se incluye atención a la cobertura vegetal, a las mezclas múltiples de leguminosas, el silvopastoreo y al

aporte de abonos órgano-minerales, las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo degradado se recuperan rápidamente.

La materia orgánica es un factor clave en la fertilidad del suelo, ya que actúa sobre: (a) las propiedades físicas (porosidad, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc.); (b) químicas, aportando nutrientes mediante los procesos de mineralización y confiriéndole una mayor capacidad de cambio de cationes, que actúan como una reserva nutricional; y, (c) biológicas, que contribuye al mantenimiento de la actividad microbiana del suelo. La materia orgánica se define como el total de compuestos orgánicos presentes en el suelo, incluida la biomasa microbiana y vegetal, pero excluye a la macroflora y microfauna (Labrador, 2002). Los componentes de la materia orgánica del suelo se pueden dividir en tres fracciones: fracción orgánica biodegradable, las sustancias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina) y la biomasa microbiana. La comunidad microbiana es pequeña con respecto al conjunto de la materia orgánica presente en el suelo, pero la mayor parte de las transformaciones que experimenta la materia orgánica la llevan a cabo los microorganismos (Labrador, 2002; Ojeda y Ojeda, 2006).

Los principales efectos de la materia orgánica en el suelo se pueden resumir en su: (a) color, que puede facilitar el calentamiento del suelo; (b) retención hídrica, que ayuda a prevenir cambios bruscos de humedad y contracciones del suelo; (c) interacción con las arcillas, que facilita la unión de las partículas del suelo formando agregados estables; (d) poder de acomplejamiento, que controla la disponibilidad de micronutrientes; (e) capacidad tampón, que ayuda a mantener el pH del suelo; (f) capacidad de cambio catiónico, que actúa como reservorio de nutrientes; y (g) proceso de mineralización, que constituye una fuente de nutrientes para el crecimiento vegetal.

Las características edafoclimáticas favorecen los procesos de la pérdida de la materia orgánica en algunas áreas, ya que se degrada o mineraliza, lo cual redundaría en una disminución de la cubierta vegetal, lo cual afecta negativamente a las propiedades del suelo (Labrador, 2002; Ojeda y Ojeda, 2006).

La materia orgánica representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos (Mustin, 1987), pero su presencia en los suelos suele ser aproximadamente esa y son contadas las excepciones en las que supera el 2% (Navarro *et al.*, 1995). Para Gros & Domínguez (1992), el nivel deseable de materia orgánica en los suelos arcillosos medios es del 2%, pudiendo descender a 1,65% en suelos pesados y llegar a un 2,5% en los arenosos. La excepción la constituyen los Andisoles que pueden contener porcentajes de hasta 15% o más de materia orgánica.

La materia orgánica de un ecosistema maduro presenta un estado en evolución permanente, que tiende a alcanzar un equilibrio dinámico cuando las entradas de carbono al suelo por los aportes de los residuos vegetales y animales son iguales a las salidas debidas a los procesos de mineralización y lixiviación de sus fracciones solubles (Schulze & Freibauer, 2005). En un ecosistema en equilibrio dinámico, el contenido de materia orgánica del suelo se mantiene en un nivel más o menos constante mientras este ciclo se mantenga activo. Un cambio inadecuado en el manejo o en el uso del suelo puede provocar un desajuste de este estado de equilibrio y provocar pérdidas considerables de materia orgánica, lo que ocurre de manera recurrente en el área de estudio. Las consecuencias derivadas de una pérdida de materia orgánica en los suelos repercuten en la disminución de diversas funciones que desempeña en relación a su potencial productivo y su fertilidad. La materia orgánica del suelo es vital en la formación de agregados estables y de un sistema poroso secundario; permite que el agua se filtre en el perfil del suelo para una mejor aireación y retención de humedad (Ellies, 2004; Annabi *et al.*, 2007). El aporte de materia orgánica y el aumento de la estabilidad de agregados pueden reducir la tendencia del suelo a la compactación y aumentar la resistencia del suelo a la deformación, debido a que la degradación es controlada, en gran parte, por la presencia y abundancia de macro-agregados estables al agua (Bayhan *et al.*, 2005).

Desde un punto de vista biológico, la materia orgánica, favorece la actividad microbiana y los procesos bioquímicos implicados en el cierre de los ciclos de nutrientes, activando la fauna edáfica que, a su vez, incrementa la porosidad del suelo

(Costa *et al.*, 1991; Labrador, 2002). Como consecuencia de estos efectos, se favorece un desarrollo mayor de la cubierta vegetal y radicular, lo cual contribuye a disminuir la erosividad del suelo. Por consiguiente, la evolución de la materia orgánica en el suelo se puede considerar como indicador del grado de estabilidad alcanzado entre los distintos balances de materia y energía en un ecosistema, dada la enorme diversidad funcional que desempeña en los mismos.

La evaluación de la fertilidad del suelo es útil para determinar su potencial productivo, elucidar los factores edáficos que pueden limitar dicho potencial y establecer el efecto de diversas prácticas de manejo en la dinámica nutrimental edáfica (Vergara *et al.*, 2005). El diagnóstico integral de la fertilidad de un suelo puede basarse en la comparación de la intensidad de sus propiedades con un valor de referencia establecido como adecuado mediante procedimientos empíricos (Brown, 1987). También se puede realizar con enfoques mixtos basados en el entendimiento de cómo funciona un sistema agrícola y una validación empírica de la deducción (Rodríguez, 1993). La comparación indica si la condición de la fertilidad es deficiente, adecuada o excesiva. Sin embargo, en la mayoría de los casos los valores de referencia se obtienen en circunstancias distintas a la de los sitios donde se pretende aplicarlos.

En Oaxaca, aproximadamente en 80% del área agrícola, se practica una agricultura tradicional con pocos recursos tecnológicos y limitada productividad agrícola; el uso de fertilizantes y otros insumos es escaso. En la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) esta situación es atribuible a las condiciones socioeconómicas prevalecientes y la falta de información y estudios sobre la fertilidad de los suelos de la región (Rodríguez, 1993).

Las acciones en materia de restauración son aplicables a áreas grandes o pequeñas dependiendo de la capacidad de recursos de que se disponga para llevar a cabo esta actividad y de sus objetivos (Kondolf, 1995). Sánchez *et al.* (2002) considera que el diseño de una estrategia de restauración requiere de una amplia visión que incluye aspectos históricos, sociales, culturales, políticos, estéticos y morales.

El desarrollo de suelos sostenibles aunque parezca una utopía, se puede llevar a la realidad. Es posible desarrollar un suelo sostenible mediante la utilización de prácticas que conduzcan a su mejoramiento físico, químico y biológico y a la conservación de estas nuevas características. El concepto de la sostenibilidad agrícola deja así de ser inmaterial para convertirse en algo material, cuando se tiene el conocimiento de tecnologías que aplicadas en el sitio y en el momento oportuno pueden evitar la degradación de los suelos (Ikerd, 1990). Esto crea la necesidad de que los investigadores en el área edafológica desarrollen parámetros y niveles críticos que puedan ser usados como indicadores de mejoramiento o de degradación, en función del tiempo de uso del suelo.

La sostenibilidad de la agricultura y todas las actividades sociales y económicas que en un país o región que están relacionadas con el agro, dependen fundamentalmente del manejo adecuado, racional y productivo que se dé a las tierras agrícolas, ganaderas y forestales en las cuales se realizan estas actividades (Amézquita, 1994).

Como alternativas viables para recuperar la fertilidad del suelo, se han sugerido diferentes modalidades de preparación conservacionista del suelo a largo plazo que, además, incluyen la incorporación de leguminosas (Thönnissen *et al.*, 2000a). Estos sistemas permiten incrementar la materia orgánica (MO), el nitrógeno (N) y el carbono orgánico (CO), así como la actividad microbiana (MB), dando como resultado, a lo largo del tiempo, una mejor condición de fertilidad y agregación del suelo (Wander y Bollero, 1999). Asimismo, se consigue mayor captación, disponibilidad y eficiencia del agua por los cultivos (Drury *et al.*, 1999), menor compactación del perfil del suelo a largo plazo, mayor estabilidad estructural y mejor condición de porosidad (Karlen *et al.*, 1990), lo cual repercute en una mejor y mayor productividad en los cultivos (Karlen *et al.*, 1991; Lyon *et al.*, 1997).

El efecto inmediato de los sistemas conservacionistas en el suelo es el aumento en el contenido de materia orgánica; sin embargo, la medida en que ello ocurre no se ha determinado cabalmente (Igue, 1984). En diversos trabajos se ha demostrado el

impacto de los abonos verdes sobre características propias de la fertilidad del suelo, como: la capacidad de intercambio catiónico, la disponibilidad de macro y micronutrientes, la formación y estabilización de agregados, el mejoramiento de la infiltración del agua y la aireación del suelo; específicamente en el caso de las leguminosas, en la incorporación al suelo de N, a través de la fijación biológica (Igue, 1984; Karlen *et al.*, 1991; Lyon *et al.*, 1997). El estiércol, los residuos de cosecha, los microorganismos y animales muertos en descomposición, entre otros, son importantes fuentes de N orgánico; aunque la mayor parte de este N es insoluble y no está disponible en ese momento para plantas y microorganismos, ya que debe realizarse un proceso de biodegradación de la materia orgánica y el N debe pasar a formas inorgánicas para poder ser absorbido (Salazar *et al.*, 2003b; Castellanos *et al.*, 1996).

Particularmente, el estiércol tiene gran importancia como fuente de N debido a que puede aportar amonio (NH^{+4}) y nitrato (NO^{-3}) en grandes cantidades (Salazar-Sosa *et al.*, 2003a). La aplicación de diferentes tipos de abonos orgánicos generan cambios distintos sobre las propiedades del suelo, ya que tienen características propias; estas deben tenerse en cuenta dentro de las estrategias para un manejo integral de la materia orgánica del suelo, los estiércoles incorporan una mezcla rica en nutrientes ya que generalmente las heces van mezcladas con la orina y son de fácil mineralización por los microorganismos (Vigil y Kissel, 1995; Giuliatti *et al.*, 2008).

Romero *et al.* (2000) mencionan que los abonos orgánicos se han usado desde tiempos remotos y han sido muy efectivos, sin embargo, hay que considerar la variación en cuanto a su composición química y el aporte de nutrimentos que proporciona al cultivo ya que esta depende de su procedencia, edad, manejo y humedad. En este sentido cuando se dispone de algún desecho orgánico es necesario buscar la manera más adecuada de aprovecharlo, dosificarlo e incorporarlo al suelo adecuadamente para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos para su mejor desarrollo e incrementar su productividad, cuidando siempre de no contaminar el ambiente (Salazar-Sosa *et al.*, 2003a). Se recomienda su uso como una de las

medidas que se deben tomar a corto plazo para la recuperación de los suelos degradados.

La conservación de los suelos agrícolas y la recuperación de su fertilidad, es una tarea urgente que deben desarrollar las actuales generaciones de productores. La incorporación de materia orgánica y de microorganismos benéficos es una alternativa que debe ser priorizada como una inversión a largo plazo, por lo cual deben existir beneficios que incentiven su uso, reconociendo que también rinde beneficios en el corto plazo sustituyendo en parte los fertilizantes químicos.

Desde hace décadas están presentes en las comunidades rurales actividades socioculturales que pudieron dar origen a la pérdida de la fertilidad y degradación física del suelo, la sobreexplotación de los recursos que se dio por sobrepoblación en la Mixteca Alta Oaxaqueña causó daños que muchos consideran irreversibles. La mayoría de las prácticas convencionales de monocultivo, agricultura de ladera, roza-tumba-quema (RTQ) entre otras, favorecen los procesos de degradación del suelo (Sánchez and Calhoun, 1997).

Las plantas vivas y otros materiales naturales han sido usados por siglos para controlar los problemas de erosión en suelos de ladera y a lo largo de las orillas de los ríos en diferentes partes del mundo. Estos materiales naturales y métodos de control de erosión, llegaron a ser menos populares con la llegada de la revolución industrial, por lo anterior es de vital importancia diseñar alternativas que permitan aumentar la productividad agrícola en forma sostenible, que redunde en beneficio del agro rural y al mismo tiempo, que ayude a conservar los recursos naturales (suelo, agua, bosques). A estos últimos hoy se han agregado los procesos de bioingeniería.

La bioingeniería puede definirse como: la inclusión de pastos, arbustos, árboles y otros tipos de vegetación en los diseños de ingeniería para mejorar y proteger laderas, terraplenes y estructuras de los problemas relacionados con la erosión y otros tipos de derrumbes superficiales en laderas (Morgan, 1986). La bioingeniería proporciona soluciones eficaces en términos de costo a muchas de las

preocupaciones medioambientales conexas al desarrollo de la infraestructura y a la creciente erosión del suelo. El uso de los métodos bioingenieriles en China datan desde antes del siglo XII cuando fueron utilizados gran cantidad de arbustos para estabilizar taludes. Al comienzo del siglo XX, técnicas similares fueron usadas en China para controlar inundaciones y erosión a lo largo del Río Amarillo (Franti, 1997).

El objetivo de este capítulo fue, proponer alternativas de recuperación de la fertilidad de los suelos del área de estudio en referencia a alternativas probadas previamente en condiciones iguales o similares a las del área de estudio, en función de la calidad y degradación del suelo, evaluadas e identificadas en los dos capítulos anteriores de este trabajo de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Una vez caracterizada cartográficamente la zona de estudio y detectadas las principales causas de degradación de suelos, cuyos resultados se presentan al inicio de esta tesis en el Capítulo I, así como evaluada la calidad de suelos reportada en el Capítulo II, se tomaron los indicadores de calidad del suelo para cada propiedad y sitio muestreado, la información se cotejó mediante fotografías de cada sitios de estudio y lo observado en campo por el investigador para determinar el tipo de degradación de cada sitio correspondiente a lo reportado por los estudios de degradación. Finalmente tomando como referencia la calidad del suelo promedio de cada comunidad y propiedad evaluada, se plantearon las alternativas en función de esos resultados.

La cartografía para identificar la degradación del área de estudio se elaboró con la información reportada por la Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002), el informe de la situación del medio ambiente en México (SEMARNAT, 2012) para identificar el tipo y causas principales de degradación de suelos y el mapa y Documento de Referencia para la Estimación de la Erosión Actual del Suelo en México, para detectar el nivel y grado de erosión en los sitios de muestreo (CGG-SAGARPA Y COLPOS, 2009).

La información fue procesada y estandarizada mediante el programa Arc Gis versión 10.1 Environmental Systems Research Institute, Redlands, California (ESRI, 2013), se obtuvo una capa en forma vectorial del área de estudio de estos mapas de referencia y se sobrepuso la capa de puntos de los sitios de muestreo.

Las claves asociadas a los tipos y causas principales de degradación, denominados criterios de degradación en el estudio (SEMARNAT – Colegio de Postgraduados, 2002 se describen a continuación para facilitar la comprensión de la simbología utilizada en los cuadros de resultados.

Criterios de degradación:

HC: Erosión hídrica con deformación del terreno (presencia de cárcavas, de canales o movimiento de masas). Se describe como una remoción irregular del material del suelo por erosión o movimiento de masas, mostrando canales y cárcavas sobre el terreno. Sus posibles causas Manejo inapropiado de las tierras forestales, agrícolas y ganaderas o por actividades de construcción, que provocan la producción de una cantidad excesiva de escurrimientos sin ningún obstáculo.

HS: Erosión hídrica con pérdida del suelo superficial (laminar/ lavado superficial). Se describe como una disminución del espesor del suelo superficial (horizonte A), debido a la remoción uniforme del material del suelo por la escorrentía. Sus posibles causas son el manejo inapropiado de las tierras forestales, agrícolas y ganaderas, que provoca una cobertura insuficiente del suelo, una falta de obstáculos para detener la escorrentía o el deterioro de la estructura del suelo; lo cual conduce a la producción de escurrimientos superficiales excesivos.

QD: Declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica. Se describe como decrecimiento neto de nutrientes y materia orgánica disponibles en el suelo, que provocan una disminución en la productividad. Sus posibles causas son un balance negativo de nutrientes y materia orgánica entre las salidas, representadas por los productos de las cosechas, de las quemas, las lixiviaciones, etc., y las entradas, entendidas como la fertilización o el estercolamiento, la conservación de los residuos de cosecha y los depósitos de sedimentos fértiles.

SN: Estable bajo condiciones naturales. Influencia humana (casi) ausente sobre la estabilidad del suelo y gran cobertura de vegetación no disturbada. Nota: algunas de esas áreas pueden ser muy vulnerables a pequeños cambios que afectan el equilibrio natural.

Los factores causativos se describen como:

a: Actividades agrícolas. Se definen como el manejo inapropiado de los terrenos arables. Incluye una amplia variedad de prácticas; tales como: problemas por labranza, uso de agroquímicos, uso de abonos, uso de agua de riego de mala calidad y por la quema de residuos de cosecha. Los tipos de degradación comúnmente asociados con este factor son: erosión (hídrica y eólica), compactación, pérdida de nutrientes, salinización y contaminación (por pesticidas y fertilizantes).

f: Deforestación y remoción de la vegetación. Se define como la (casi) total remoción de la vegetación natural (usualmente bosque primario y secundario), en grandes extensiones territoriales, para cambiar el uso de la tierra a agrícola y urbano, principalmente; para explotar comercialmente bosques a gran escala o por incendios inducidos. La deforestación frecuentemente causa erosión y pérdida de nutrientes.

e: Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico. Contrario a la “deforestación y remoción de la vegetación natural”, este factor causativo no involucra, necesariamente, la remoción (casi) completa de la vegetación “natural”, sino más bien, la degeneración de la vegetación remanente, provocando una protección insuficiente contra la erosión. Se incluyen en este grupo a la recolección excesiva de leña, la producción de carbón y al uso de la madera como cercos, postes o polines.

g: Sobrepastoreo: Además del común sobrepastoreo de la vegetación por el ganado, se consideran dentro de este grupo a otros factores relacionados con un número excesivo de cabezas de ganado, tal como el pisoteo. El efecto del sobrepastoreo usualmente es la compactación del suelo y/o la disminución de la cubierta vegetal, que provoca mayor erosión del suelo tanto por el agua como por el viento.

Los niveles de afectación de la degradación del suelo, se definen en 4 niveles en términos de la reducción de la productividad biológica de los terrenos.

(1) **Ligero:** los terrenos aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales presentan alguna reducción apenas perceptible en su productividad.

- (2) **Moderado:** los terrenos aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales presentan una marcada reducción en su productividad.
- (3) **Fuerte:** los terrenos a nivel de predio o de granja, tienen una degradación tan severa, que se pueden considerar con productividad irrecuperable a menos que se realicen grandes trabajos de ingeniería para su restauración.
- (4) **Extremo:** su productividad es irrecuperable y su restauración materialmente imposible.

El estudio refiere una escala de extensiones representado por símbolos en escala de 5 unidades (5,10, 15, etc) que representan el área de la unidad fisiográfica afectada por tipo de degradación, por lo que en cada unidad se puede presentar más de un tipo de degradación.

La tasa de degradación del suelo está indicada con símbolos, que indican la rapidez o la velocidad de la degradación en los últimos 5 o 10 años o su tendencia.

- +: Con incremento ligero en la degradación.
- 0: Sin cambio en la degradación.
- : Con disminución en la degradación

Para identificar el grado de erosión, se tomó como referencia el Documento de Referencia para la Estimación de la Erosión Actual del Suelo en México, el cual reporta el nivel y grado de erosión en los sitios de muestreo (CGG-SAGARPA Y COLPOS, 2009). Los criterios se muestran en al Cuadro 1.

Cuadro 1. Grados de erosión considerados en los sitios estudio.	
Grado	Símbolo
Extrema	E
Fuerte	F
Moderada	M
Leve	L
Suelo Estable	NA

Se consideraron de manera prioritaria con alternativas a corto plazo las parcelas y sitios con menores valores de calidad de suelo.

A mediano plazo se consideran sitios estudiados con calidades moderadas y altas. A largo plazo sitios degradados que requieren por su nivel de erosión y valor de calidad de suelo, que requieren del establecimiento de prácticas que induzcan a la conservación de suelo y reforestaciones, que conllevan tiempos prolongados para su establecimiento. Posteriormente se realizó una revisión de experiencias exitosas en México y otros países, de alternativas de recuperación de fertilidad de suelos que se pudieran extrapolar al área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La agrupación de los sitios en función de la calidad de cada parcela se muestra en la Figura 1.

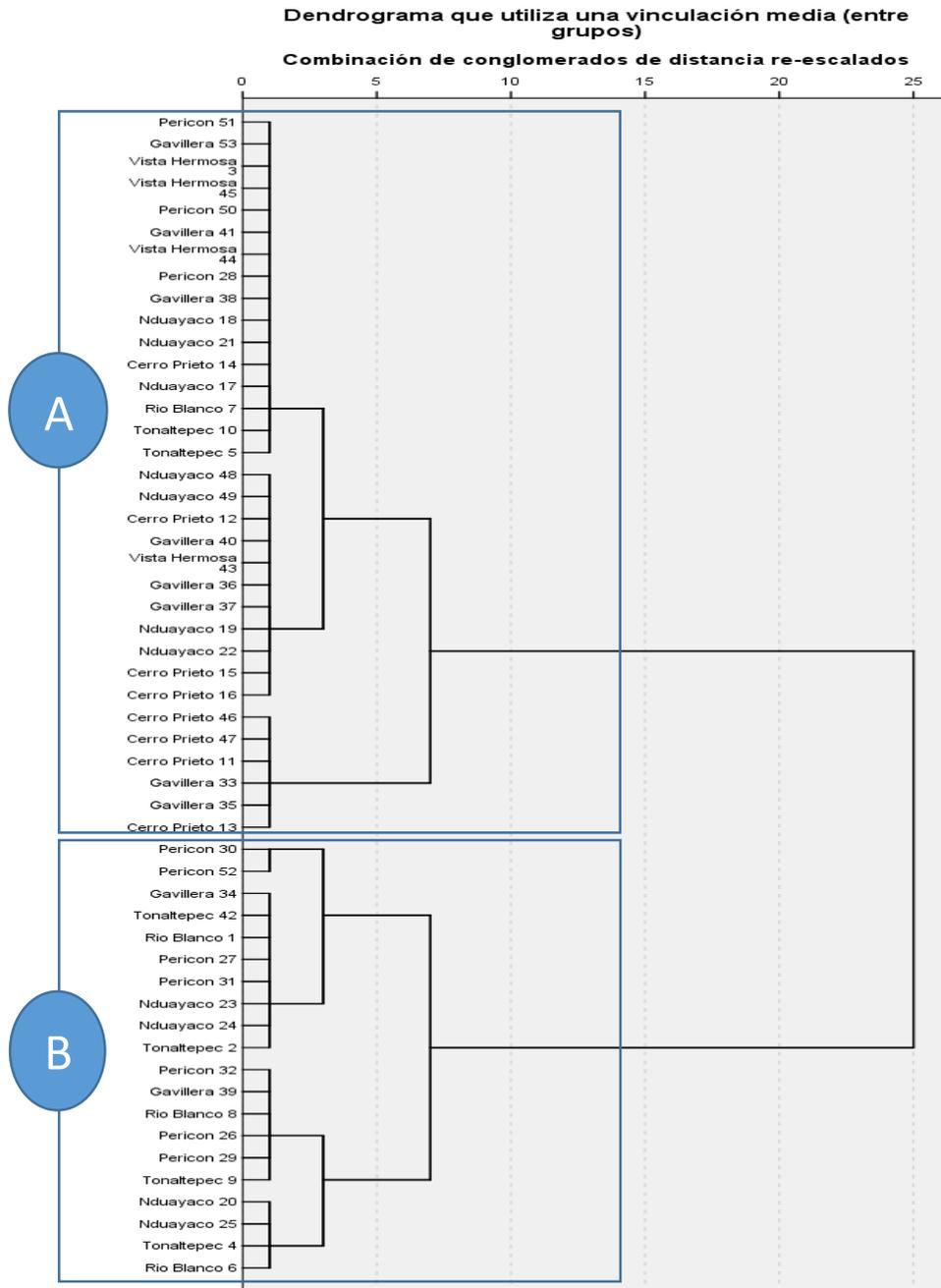


Figura 1. Dendrograma que agrupa las muestras en función de la calidad del suelo.

Las clases se agrupan en; 1 (Exceso), 2 (Muy alta calidad), 3 (Alta calidad) y 4 (Moderada calidad), 5 (Baja calidad), 6 (Muy baja calidad) y 7 (Déficit), definidas en el Capítulo 2 de este trabajo. El agrupamiento de las muestras en función de su calidad, indica que la mayoría de las muestras son de calidad 7 (deficitaria) y calidad 6 (Muy baja Calidad). Los municipios de Tonaltepec, Gavillera y Cerro Prieto, requieren atención prioritaria y a corto plazo en los suelos, ya que presentan los niveles más altos de erosión y degradación y por ende de calidad de suelos.

En Santo Domingo Tonaltepec, el principal tipo de degradación y que más área ocupa es la Erosión hídrica con pérdida de suelo superficial con 1642 hectáreas de las casi 2652 del territorio municipal, por el contrario, solo 8528 no presentan degradación aparente pero si algún tipo de degradación secundaria (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santo Domingo Tonaltepec.

MUNICIPIO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	AREA	Rasgos de degradación ^π
Santo Domingo Tonaltepec	SN*.85 ⁺	HS1.10+E/G	HC2.05+G/E		373	Disminución de la capa superficial del suelo y en algunos casos ya inexistente; presencia de pequeñas cárcavas en las parcelas agrícolas y grandes cárcavas en suelos degradados. Colores muy claros del suelo mezclados con piedras calcáreas. Rendimientos menores a 300 kg /ha de maíz de temporal en monocultivo y agricultura convencional. Ausencia de incorporación de residuos agrícolas al suelo.
	HS1**.40 [†] (+ [†])G ^β	HC2.35+G	SN1.25		1080	
	HS1.45(+) [†] G	HC2.25+G	SN1.30		1642	
	SN.55	HC2.20.0E/A	HS1.15+E/A	QD1.10+A/E	480	
	HC2.50(0)A/G	QD1.30+A/G	HS1.15+A/G	SN1.05	908	
	HC2.50(+) [†] G	HS1.20+A/G	QD1.10+A	SN1.2	225	

*: Tipo de degradación, [†]porcentaje de la superficie que ocupa el tipo de degradación, **Nivel de afectación de la degradación del suelo, [†]Taza de degradación del suelo, ^β:Factor causativo (Sermanat-CP, 2002). ^πObservados en campo por el investigador.

El tipo 1 es la degradación que ocupa la mayor superficie, por lo tanto se considera como principal; los tipos 2, 3 y 4 se reportan bajo el mismo criterio por orden

de importancia en cuanto a representatividad de superficie en la que se presentan en cada polígono de degradación que se presenta en el área de estudio.

La mayoría de los sitios muestreados en Tonaltepec, presentan degradación del tipo de erosión hídrica con pérdida de suelo superficial, lo cual implica adelgazamiento de la capa superficial del suelo. Las posibles causas son el manejo inapropiado de tierras forestales y agrícolas, lo cual repercute en una disminución en la cobertura superficial del suelo, que aumenta su susceptibilidad al arrastre por efecto de la lluvia. Debido a la diversidad de tipos y superficies de degradación que refiere el estudio, se especifica el tipo de degradación de cada sitio de muestreo.

Cuadro 3 Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal de degradación y grado de erosión de los sitios estudiados en Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.

Tipo de suelo		pH	MO %	P mg Kg ⁻¹	Ca Cmol(+)	Mg Kg ⁻¹	K	Cle Cmol(+) Kg ⁻¹	C _{bm} grC/Kg suelo	*Dg y Grado de erosión
Leptosol	Ag	0.76	-0.30	-0.26	0.15	4.70	0.38	0.57	0.12	HS1.45(+)/g/(E)
Luisol	Ag	1	-0.30	0.05	1.13	3.13	0.48	1.46	0.06	QD1.30+a/g (L)
Leptosol	Ag	1.32	-0.43	-0.22	0.85	-0.26	0.30	0.73	0.03	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.36	-0.38	0.64	1.17	-0.08	-0.01	1.13	0.04	HS1.45(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.4	-0.35	0.29	0.76	-0.16	-0.15	0.67	0.11	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.48	-0.43	0.89	1.15	-0.08	-0.05	1.07	0.08	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.44	-0.38	-0.46	1.18	-0.16	-0.11	1.13	0.08	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.48	-0.35	-0.22	1.79	0.55	0.35	1.91	0.07	HS1.40(+)/g/(E)
Luisol	Ag	1.16	-0.10	-0.50	0.49	3.06	-0.03	0.71	0.08	HS1.45(+)/g/(E)
Leptosol	Ag	1.28	-0.43	0.29	0.33	-0.48	0.25	0.14	0.04	QD1.30+a/g/(L)
Luisol	Dg	1.16	-0.35	-0.53	1.54	1.97	-0.13	2.18	-0.04	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Dg	0.32	-0.43	0.11	0.08	1.05	0.08	0.05	0.018	HS1.40(+)/g/(E)
Leptosol	Dg	0.28	-0.43	0.77	0.12	1.36	0.26	0.16	0.025	HS1.15+E/A (L)
Leptosol	Dg	1.40	-0.45	0.08	0.88	-0.40	0.25	0.90	0.011	HS1.40(+)/G/(E)

Ag: Agrícola; Dg: Degradado. *grado de erosión (L): ligera, (M):moderada, (F):Fuerte, (E):Extrema

Los indicadores con valores negativos indican calidad 7 (déficit). En cuanto a materia orgánica, las parcelas agrícolas requieren alternativas de incorporación de ésta, lo que conlleva a aumentar los contenidos de P, Mg y K y mejorar las propiedades físicas y biológicas del suelo. En la zona de estudio, Bautista *et al.*, (2014), estudiaron la aplicación de bocashi y obtuvieron que su aplicación sola o combinada con fertilizantes de lenta liberación puede mejorar la fertilidad biológica del suelo en cultivos de maíz en suelos cercanos al área es estudio y con características similares.

En los sitios degradados se propone establecer una cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelo, que se describen en este capítulo más adelante.

En Gavillera, los tipos de degradación presente se reportan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en San Bartolo Soyaltepec.

MUNICIPIO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	AREA	Rasgos de degradación ^{††}
San Bartolo Soyaltepec	HC*2** .35 ⁺ (0)G/A ^β	HS1.20+G/A	QD1.15+A	SN1.30	162	Presencia de pequeñas cárcavas en las parcelas agrícolas y grandes cárcavas en suelos degradados. Colores muy claros del suelo mezclados con piedras calcáreas. Rendimientos insuficientes de maíz y trigo, monocultivo, agricultura convencional. Ausencia de incorporación de residuos agrícolas.
	HS1.40(+ [†])G	HC2.35+G	SN1.25		1080	
	HS1.45(+)G	HC2.25+G	SN1.30		1642	
	SN.55	HC2.20.0E/A	HS1.15+E/A	QD1.10+A/E	480	
	SN.65	HS1.25+F/G	HC2.10+G		464	
	SN.55	HC2.30+F/G	HS1.15+F/G		293	
	QD1.50(+)A	HS1.30+G	HC2.20+G		1054	
	HC2.50(0)A/G	QD1.30+A/G	HS1.15+A/G	SN1.05	908	
	HC3.35(+)G/E	QD1.10+E/A	SN1.55		2478	
	SN				1581	
	HC2.50(+)G	HS1.20+A/G	QD1.10+A	SN1.2	225	
	SN.80	HC2.10+G/E	QD1.05+A/E	FC1.05+G	1170	

*: Tipo de degradación, [†]porcentaje de la superficie que ocupa el tipo de degradación, ^{**}Nivel de afectación de la degradación del suelo, [†]Taza de degradación del suelo, ^β:Factor causativo (Sermanat-CP, 2002).

^{††}Observados en campo por el investigador.

El principal tipo de degradación en Gavillera es la erosión hídrica, con deformación del terreno y formación de cárcavas, este tipo de degradación se presenta en primer y segundo orden, seguida de la degradación química con declinación de la fertilidad. Los tipos de degradación que se reportan están presentes

en puntos diferentes de la comunidad y en todo el territorio municipal. El tipo de degradación que presenta cada sitio evaluado en Gavillera se reporta en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.

Tipo de suelo		pH	MO	P	Ca	Mg	K	Cle	C _{bm}	*Tipo de degradación/ Grado de erosión
			%	mg Kg ⁻¹	Cmol(+) Kg ⁻¹			gr C Kg ⁻¹ suelo		
Leptosol	Ag	0.52	-0.48	-0.44	-0.24	-0.53	-0.04	-0.52	0.04	HC3.35(+)/G/E(E)
Luvisol	Ag	1.20	0.38	1.38	1.51	-0.17	0.34	1.49	0.65	QD1.10+E/A
Leptosol	Ag	0.28	-0.10	-0.38	-0.03	-0.22	0.36	-0.22	0.30	HC3.35(+)/G/E(E)
Luvisol	Ag	0.92	0.03	-0.46	0.34	-0.11	0.09	0.18	0.32	HC2.50(0)A/G
Leptosol	Ag	0.92	0.00	-0.44	0.10	-0.19	0.00	-0.09	0.30	HC3.35(+)/G/E(E)
Leptosol	Ag	1.36	-0.13	-0.46	0.80	-0.50	-0.10	0.67	0.14	HC3.35(+)/G/E(E)
Luvisol	Ag	1.16	0.45	2.18	0.81	-0.36	0.33	0.68	0.69	HC3.35(+)/G/E(M)
Luvisol	Ag	0.72	0.05	-0.30	0.18	0.14	-0.09	0.03	0.41	SN (L)
Leptosol	Ag	0.96	0.18	-0.12	0.66	-0.20	-0.19	0.53	0.43	HC3.35(+)/G/E(M)
Leptosol	Dg	0.88	-0.15	0.40	0.06	0.17	-0.05	-0.10	0.30	SN (L)

Ag: Agrícola; Dg: Degradado. *L: ligera, M:moderada, F:Fuerte, E:Extrema

En los suelos estudiados en la comunidad de Gavillera, no todos los valores fueron negativos, sin embargo, los valores de indicadores con valores positivos fueron bajos lo que representa una calidad de suelos de baja a moderada, con excepción de una parcela agrícola donde el valor del indicador de la materia orgánica fue de 0.45 (calidad 4, moderada) esta parcela es considerada orgánica por el productor, pues se incorporan residuos de estiércol de borregos y toros, así como residuos domésticos.

En el municipio de San Miguel Chicahua, al que pertenece la comunidad de Cerro Prieto, es de las que se encuentran suelos con mayor degradación y niveles de fertilidad más bajos. Aquí los tipos de degradación que ocupa mayor superficie son la degradación química con declinación de la fertilidad del suelo y la erosión hídrica con pérdida de suelos superficial (Cuadro 6). Las áreas que de no presentan degradación

en un sentido primario, la presentan en menores proporciones de manera secundaria o terciaria.

Cuadro 6. Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en San Miguel Chicahua.

MUNICIPIO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	AREA	Rasgos de degradación [¶]
San Miguel Chicahua	SN				1581	Presencia de pequeñas cárcavas en las parcelas agrícolas y grandes cárcavas en suelos degradados. Suelos rojizos muy pedregosos y mezclados con material calcáreo superficial. Sistemas agrícolas en monocultivo, agricultura convencional. Ausencia de incorporación de residuos agrícolas y de prácticas de conservación de suelo.
	SN.85	QD1.10+F/A	HS1.5+F		2794	
	SN.80	HC2.10+G/E	QD1.05+A/E	FC1.05+G	1170	
	QD1.50(+A)	HS1.25+G	SN1.25		407	
	HC1.40(+G)	QD1.20+A	SN1.40		1992	
	SN.55	HC2.20+F/A	QD1.15+A	HS1.10+F/E	2047	

*: Tipo de degradación, [¶]porcentaje de la superficie que ocupa el tipo de degradación, **Nivel de afectación de la degradación del suelo, [†]Taza de degradación del suelo, ^β:Factor causativo (Sermanat-CP, 2002).

^{¶¶}Observados en campo por el investigador.

Los indicadores de calidad de suelos en Cerro Prieto, son en su mayoría negativos (Cuadro 7), lo que refleja un déficit tanto nutrimental como de calidad de suelos, lo cual es coherente con los resultados de la cartografía de degradación. La erosión en los sitios muestreados es de ligera a extrema, lo cual coincide con el tipo de degradación hídrica reportada; por lo que las estrategias y/o alternativas en esta comunidad son urgentes de implementar y deben ser enfocadas a disminuir o controlar la pérdida de suelo.

En su mayoría, los sitios muestreados presentan degradación química con declinación de la fertilidad del suelo, por lo que las alternativas deben implicar necesariamente estrategias de incorporación de materia orgánica, y manejo de residuos agrícolas, para en un mediano plazo incrementar la fertilidad en estos sitios, considerando que las causas principales son las actividades agrícolas y la remoción de la vegetación.

Cuadro 7. Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Cerro Prieto, San Miguel Chicahua.

Tipo de suelo		pH	MO	P	Ca	Mg	K	Cle	C _{bm}	*Tipo/causa de degradación y grado de erosión
			%	mg Kg ⁻¹		Cmol(+) Kg ⁻¹		gr C Kg ⁻¹ suelo		
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	0.36	-0.43	-0.30	-0.26	-0.54	-0.04	-0.54	0.02	QD1.10+F/A (M)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	0.96	-0.43	0.56	-0.06	-0.28	-0.23	-0.28	0.02	QD1.10+F/A (M)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	0.44	-0.33	-0.30	-0.25	-0.51	-0.04	-0.52	0.05	QD1.10+F/A(M)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	1.00	0.53	-0.09	0.41	-0.29	-0.03	0.25	0.73	HC2.20+F/A(L)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	0.52	-0.30	-0.44	-0.25	-0.58	-0.04	-0.66	0.28	QD1.50(+)A (M)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Ag	0.60	-0.35	-0.63	-0.14	0.03	0.10	-0.40	0.45	QD1.50(+)A (M)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Dg	0.68	0.10	1.08	-0.10	-0.24	-0.10	-0.33	0.074	HC1.40(+)G/A(E)
Pheozem/Leptosol/ Luvisol	Dg	0.88	0.05	0.26	-0.06	-0.25	-0.06	-0.28	0.026	HC1.40(+)G/A (E)

Ag: Agrícola; Dg: Degradado. *L: ligera, M:moderada, F:Fuerte, E:Extrema

En el Cuadro 8, se muestran los tipos de degradación presentes en el municipio de Santiago Apoala.

Cuadro 8. Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santiago Apoala

MUNICIPIO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	AREA	Rasgos de degradación ^{††}
Santiago Apoala	SN.85	QD1.10+F/A	HS1.5+F		2794	Abundancia superficial de material pedregoso,. Rendimientos insuficientes de maíz y trigo, monocultivo, agricultura convencional. Ausencia de incorporación de residuos agrícolas. Pendientes pronunciadas.
	QD1.35(+)F/A	HS1.25+G	SN1.40		9403	
	HC1.40(+)G	QD1.20+A	SN1.41		1992	
	SN.55	HC2.20+F/A	QD1.15+A	HS1.10+F/E	2047	
	SN.65	QD1.25+A/F	HS1.10+G		2.3	
	SN.85	HS1.10+F/E	QD1.05+F/E		12	
	HS1.40(+)G/A	QD1.15+A	HC2.10+G	SN1.35	1333	
	SN.70	HC2.20+F/E	QD1.10+F/E		2274	

*: Tipo de degradación, †porcentaje de la superficie que ocupa el tipo de degradación, ††Nivel de afectación de la degradación del suelo, †Taza de degradación del suelo, †:Factor causativo (Sermanat-CP, 2002).

††Observados en campo por el investigador.

Los tipos de degradación son química y física, las zonas sin degradación aparente se presentan en el 55, 65 y 85 % de los polígonos, el resto presenta algún tipo de degradación de manera secundaria o terciaria, el tipo de degradación que más impacta en la calidad del suelo es la degradación química. En la comunidad de Nduayaco, la mayoría de los sitios presentan degradación del tipo química, son más fértiles en comparación con los suelos de Tonaltepec, Gavillera y Cerro Prieto ya descritos con anterioridad.

Cuadro 9. Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Nduayaco, Santiago Apoala.

Tipo de suelo		pH	MO	P	Ca	Mg	C _{bm}	C _{le}	C _{bm}	*Tipo/causa de degradación y grado de erosión
			%	mg Kg ⁻¹	Cmol(+) Kg ⁻¹		Cmol(+) Kg ⁻¹	gr C Kg ⁻¹ suelo		
Regosol	Ag	0.76	-0.03	0.29	0.21	0.72	-0.03	0.13	0.36	QD1.35(+)/F/A (M)
Regosol	Ag	0.68	-0.10	0.56	0.16	0.86	-0.08	0.11	0.30	QD1.35(+)/F/A (M)
Regosol	Ag	0.84	0.08	-0.46	0.36	0.06	0.00	0.21	0.39	QD1.15+A(L)
Regosol	Ag	1.16	0.10	0.44	0.80	-0.03	-0.09	0.72	0.39	SN.65(L)
Leptosol	Ag	0.60	0.03	0.26	0.25	0.45	-0.04	0.13	0.36	SN.65(L)
Leptosol	Ag	0.64	-0.13	-0.08	0.01	0.20	-0.10	-0.10	0.24	QD1.15+A(M)
Luvisol	Ag	1.12	0.20	3.38	0.69	-0.14	-0.14	0.60	0.41	SN.85(L)
Leptosol	Ag	1.12	0.13	2.22	1.18	0.15	0.34	1.16	0.90	SN.85(L)
Luvisol	Ag	1.24	0.35	0.87	0.62	0.10	0.08	0.61	0.91	QD1.20+A(M)
Regosol	Dg	0.56	-0.30	-0.23	0.13	0.68	0.00	0.08	0.03	HS1.40(+)/F/A(F)
Regosol	Dg	0.64	-0.43	0.07	0.25	0.49	-0.06	0.19	0.01	HS1.40(+)/F/A(F)

Ag: Agrícola; Dg: Degradado. *L: ligera, M:moderada, F:Fuerte, E:Extrema

En esta comunidad es en donde se observa abonado en algunas parcelas, fertilización inorgánica, y algunas prácticas como la intercalación de cultivos, la estrategias deben ser enfocadas a mantener los niveles de fertilidad y fomentar que se realicen las practicas apropiadas de conservación de suelos.

En el municipio de Santa María Apazco, los tipos de erosión presentes son la química con disminución del contenido de materia orgánica en el suelo y la erosión hídrica con pérdida superficial del suelo, principalmente por deforestación y remoción de la vegetación. Los suelos son Pheozem y Regosol, por naturaleza fértiles (Cuadro 10).

Cuadro 10. Tipos de degradación, superficie que ocupa, grado de afectación y causa principal de la degradación presente en Santa María Apazco.

MUNICIPIO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4		Rasgos de degradación [¶]
				4	AREA	
Santa María Apazco	SN.85	QD1.10+F/A	HS1.5+F	N/A	2795	Rendimientos insuficientes de maíz y trigo, monocultivo, agricultura convencional. poca incorporación de materia orgánica al suelo, suelos pedregosos
	QD1.35(+)/F/A	HS1.25+G	SN1.40	N/A	9403	
	SN.70	HC2.20+F/E	QD1.10+F/E	N/A	2274	
	HS1.40(+)/F/E	SN1.60		N/A	745	

*: Tipo de degradación, *porcentaje de la superficie que ocupa el tipo de degradación, **Nivel de afectación de la degradación del suelo, [†]Taza de degradación del suelo, ^β:Factor causativo (Sermanat-CP, 2002). [¶]Observados en campo por el investigador.

Específicamente en la comunidad de Pericón, en donde se realizó el muestreo de suelos, los indicadores de calidad fueron positivos, lo cual significa que hay menos déficit de nutrientes (Cuadro 11).

El tipo de degradación de cada sitio muestreado, sugiere que se tomen estrategias de conservación de la fertilidad del suelo, se promueva el aporte de materia orgánica y se realice fertilización orgánica mediante elaboración de compostas o caldos orgánicos.

En esta comunidad se tienen suelos muy pedregosos, la erosión se ve reflejada en las zonas descubiertas de vegetación, la causa principal de degradación es la remoción de vegetación y la deforestación.

Cuadro 11. Valores de los indicadores de calidad de suelo, Tipo, causa principal y grado de erosión de los sitios estudiados en Pericón, Santa María Apazco.

Tipo de suelo		pH	MO	P	Ca	Mg	K	Cle	C _{bm}	*Tipo de degradación/ Grado de erosión
			%	mg Kg ⁻¹	Cmol(+) Kg ⁻¹			gr C Kg ⁻¹ suelo		
Regosol	Ag	1.04	0.53	0.09	0.93	0.85	-0.10	0.97	1.03	QD1.10+F/A (L)
Pheozem	Ag	1.24	1.63	0.32	1.00	0.55	-0.15	1.00	1.58	SN.85(L)
Regosol	Ag	0.84	0.20	-0.38	0.54	12.51	-0.06	2.40	0.48	HS1.40(+)/F/E
Regosol	Ag	1.12	0.15	-0.12	1.64	0.34	0.25	1.67	0.90	QD1.35(+)/F/A(L)
Regosol	Ag	1.36	0.20	2.22	1.14	0.17	-0.09	1.15	1.02	QD1.35(+)/F/A(F/E)
Pheozem	Ag	1.28	0.63	2.93	0.36	-0.14	-0.13	0.22	1.03	HS1.40(+)/F/E
Regosol	Ag	0.68	-0.48	-0.57	0.01	1.74	0.01	0.05	1.28	HS1.5+F
Regosol	Dg	0.76	-0.20	-0.32	0.41	0.28	0.05	0.38	0.68	HS1.40(+)/F/E(E)
Regosol	Dg	0.80	-0.03	0.83	0.40	0.30	0.09	0.29	0.76	HC2.20+F/E
Regosol	Dg	1.28	0.40	1.08	1.12	0.04	2.78	1.17	0.84	HS1.40(+)/F/E(E)

Ag: Agrícola; Dg: Degradado. *L: ligera, M:moderada, F:Fuerte, E:Extrema

La clasificación de la calidad de los suelos se muestra en el Cuadro 12, en base a ella se sugieren las alternativas y estrategias que son descritas más adelante de este escrito. Considerando que la mayoría de las comunidades en promedio tiene calidad deficitaria (7) en sus propiedades.

Cuadro 12. Calidad de suelos promedio de las propiedades evaluadas en los suelos agrícolas del área de estudio en la mixteca Alta Oaxaqueña.

Suelos Agrícolas								
Comunidad	Calidad del suelo							Alternativa propuesta
	pH	MO	P _{ext}	Ca _{int}	Mg _{int}	K _{int}	CIE	
Tonaltepec	1	7	7	1	1	6	1	<p><u>A Corto plazo:</u> Incorporación de materia orgánica en comunidades que presentan parcelas con calidad de suelo de 4 a 7 en propiedades MO, pH, P, K.</p> <p><u>A mediano plazo:</u> MIAF, riego, incorporación de materia orgánica parcelas con calidad 2 a 5 en las propiedades evaluadas.</p> <p><u>A largo plazo:</u> Establecer obras de conservación que induzcan la conservación del suelo. Parcelas con calidad 6 y 7 en cualquier propiedad evaluada.</p>
Gavillera	1	4	1	1	5	5	1	
Pericón	2	6	2	4	5	6	4	
Nduayaco	2	6	6	4	7	6	5	
Cerro Prieto	3	7	6	7	7	7	7	
Suelos Degradados								
comunidad	Calidad del suelo							Alternativa propuesta
	pH	MO	P _{ext}	Ca _{int}	Mg _{int}	K _{int}	CIE	
Tonaltepec	2	7	7	3	1	6	4	<p><u>A corto plazo:</u> Pastoreo rotatorio, sitios con indicadores de calidad de 6 y7.</p> <p><u>A mediano plazo:</u> rotación y diversificación de cultivos, pastoreo semiestabulado, establecer áreas de exclusión, en sitios con indicadores de calidad de 4 a 7.</p> <p><u>A largo plazo:</u> adoptar obras y cultivos que induzcan la conservación del suelo. Crear viveros de especies locales (dodonea viscoza (chamizo), ramonal, pino oaxacana, encino, enebro) para reforestaciones.</p>
Gavillera	3	7	7	5	2	6	2	
Pericón	3	7	7	6	4	7	6	
Nduayaco	2	7	7	6	6	7	7	
Cerro Prieto	4	7	7	7	7	6	7	
Suelos de Bosque								
comunidad	Calidad del suelo							Alternativa propuesta
	pH	MO	P _{ext}	Ca _{int}	Mg _{int}	K _{int}	CIE	
Tonaltepec	1	5	7	7	5	6	7	<p><u>A corto plazo:</u> Reducir el pastoreo libre, implementar un pastoreo rotatorio en los bosques. Reforestaciones con especies forestales.</p> <p><u>A mediano plazo:</u> Reforestaciones con especies locales y delimitar áreas de exclusión para permitir la recuperación del bosque.</p> <p><u>A largo plazo:</u> Realizar planes adecuados de aprovechamiento del bosque. Reforestaciones constantes.</p>
Gavillera	1	5	7	7	5	6	7	
Pericón	2	1	7	1	3	1	1	
Nduayaco	2	1	7	1	3	1	1	
Cerro Prieto	3	3	7	7	7	6	7	

Alternativas de recuperación de fertilidad de suelos

Para contrarrestar los efectos de la pérdida de la fertilidad del suelo que se refleja en incrementar la misma y lograr una buena calidad de suelos. Los resultados del análisis de la caracterización cartográfica del área de estudio y de la caracterización química de los suelos analizados muestran que, en general, los suelos tienen un nivel bajo de fertilidad causado por degradación química y física, por lo que se requiere establecer un manejo integrado del suelo para potenciar su capacidad productiva. Éstas se proponen con base en algunos resultados generados en distintas instituciones científicas que han demostrado la efectividad de tecnologías adecuadas en el manejo de la fertilidad del suelo con el objetivo común de contribuir al desarrollo sostenible y seguridad alimentaria de los sistemas agrícolas. Se plantea considerar alternativas agroecológicas que permitan contrarrestar gradualmente las causas de la degradación y sus efectos a corto, mediano y largo plazo. Una forma de mejorar la calidad de los suelos degradados, mejorando sus propiedades tanto físicas, químicas y microbiológicas, mediante la adición de materia orgánica. Con estas aportaciones se consigue proporcionar a los suelos formas lábiles de materia orgánica, en cantidad suficiente como para estimular la vida de los microorganismos que puedan existir en los mismos. Están aceptados de forma general los beneficios que en cuanto a calidad y fertilidad aportan los residuos orgánicos al suelo, por lo que se les considera una fuente inestimable de materia orgánica para conseguir la mejora de la calidad de los suelos degradados. Si se considera que en las comunidades de estudio y áreas cercanas se pueden conseguir residuos orgánicos urbanos, principalmente de mercados y tianguis, que pueden ser adquiridos a bajos costos y que pueden complementar la materia prima para elaborar compostas, se tiene una fuente de materia orgánica inmediata.

A corto plazo

Se consideran alternativas a corto plazo aquellas que se pueden adoptar o establecer en el momento casi inmediato, por lo que se propone iniciar con una visión futura integral de los sistemas agrícolas manejando la fertilidad del suelo, que comienza con la aplicación de abonos orgánicos ya que son el sostén básico para la vida del suelo y su ausencia o presencia puede definir su potencial productivo (Paneque y Calaña, 2004) con base en estiércoles animales, residuos de cosecha, compost y humus de lombriz, bocashi entre otros (Noriega *et al.*, 2001). Todos estos tienen la ventaja de que además de restituir los elementos nutrimentales mayores aportan otros que enriquecen el suelo. Con el uso y buen manejo de estos abonos, se reportan incrementos en la cosechas y mejora en las propiedades del suelo, a diferencia de los fertilizantes químicos, que reducen al paso del tiempo la productividad de la tierra (Crespo y Fraga, 2006). Los abonos orgánicos influyen favorablemente las características físicas del suelo, entre ellas, la estructura, porosidad, aireación, En el área de estudio se recomienda dar un manejo de compostaje a los residuos orgánicos que normalmente no son incorporados y cuando se incorporan es sin un manejo previo, lo cual hace que sea más tardada su transformación y efectos en el suelo, aunado a esto se hace de manera desordenada y al azar y en la mayoría de las ocasiones insuficiente.

De acuerdo a Mayea (1994), la elaboración de compostas se puede llevar a cabo de distintos materiales con los que se cuenta de manera local en el área de estudio.

Restos de cosechas. Pueden emplearse para hacer compost o como acolchado. Los restos vegetales jóvenes o frescos, tales como hojas, frutos y tubérculos, son ricos en nitrógeno (N) y pobres en carbono (C); lo contrario ocurre con restos como troncos, ramas, tallos, aserrines, etc. Abonos verdes, residuos de césped, malas hierbas, etc. Las ramas de la poda de los frutales y otros árboles, es preciso triturarlas antes de su incorporación al compost, para que no se alargue demasiado el período de descomposición, lo cual se puede realizar de manera manual. Los restos urbanos, que

se refiere a todos aquellos restos orgánicos procedentes del sector doméstico, como pueden ser las basuras, los restos de cocina, de animales de mataderos, de mercados de productos agrícolas cercanos, etc. Estiércol animal, son de interés la gallinaza, la conejita, los purines y los estiércoles de caballo y de oveja, todos ellos existentes en la zona.

El humus de lombriz –conocido por diversos nombres: *casting*, lombricompost, entre otros, es considerado por muchos investigadores y productores como uno de los mejores abonos orgánicos del mundo. La cantidad de elementos nutritivos depende de las características químicas del sustrato con que se alimentan las lombrices (Martínez *et al.*, 2003; Legall y Zoyla, 2008), establecer pequeñas plantas para producir lombricompostas en las comunidades de estudio es indispensable en el corto plazo. Se propone realizar un inventario de los materiales orgánicos de los que se dispone (estiércoles, residuos domésticos) para, en caso de ser necesario, buscar fuentes aledañas de abonos orgánicos.

De acuerdo a Trinidad (1999), los contenidos de las compostas y la calidad de la misma es variable dependiendo de los materiales con los que se elabore, pero se recomienda aplicar de 3 a 4 Mg ha⁻¹, en las condiciones de deficiencia nutrimental y baja fertilidad que se refleja en las parcelas evaluadas del área de estudio, extrapolando la cantidad a las superficies de cultivo. Estas dosis se proponen que se mantengan a mediano y largo plazo, con la finalidad de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Álvarez *et al.* (2010) incrementaron el contenido de carbono en biomasa microbiana con la aplicación de estiércol, rastrojo y cobertura de leguminosas.

La alternativa de manejo inorgánico que se propone para los productores, es el empleo de fertilizantes de liberación lenta (FLL). Éstos contienen uno o más nutrientes minerales de manera que: (a) se retrasa su disponibilidad y uso para las plantas después de su aplicación, y (b) los nutrientes están disponibles para la planta mucho más tiempo que la que se observa con aquellos derivados de una fertilización convencional (Kaplan *et al.*, 2013). Esto ayudaría a contrarrestar en el corto plazo la

insuficiencia productiva para autoconsumo del área de estudio. De acuerdo a Bautista *et al.* (2015), los FLL disminuyeron el pH en suelos de la región de la Mixteca Alta Oaxaqueña en cultivo de maíz, lo cual pudiera promover a largo plazo una mayor disponibilidad de nutrientes para los cultivos.

El efecto de la combinación de la aplicación de abonos orgánicos y los FLL en la Mixteca Alta Oaxaqueña fue estudiada por Bautista *et al.* (2015), quienes determinaron que tenían efecto sobre la colonización micorrízica, la actividad de invertasa, celulasa, fosfatasa ácida y alcalina, así como en el rendimiento de maíz. Estos autores concluyeron que la aplicación de abonos orgánicos, solos o combinados con FLL puede mejorar la fertilidad biológica del suelo en cultivos de maíz.

Otra opción, es la inducción de micorrización, asociación establecida entre hongos y raíces, considerada como una simbiosis mutualista multifuncional, cuyos efectos no se restringen sólo a la nutrición de los cultivos, sino que incluyen también beneficios en términos del uso sostenido del suelo y la conservación de la diversidad biológica. Cabe mencionar que los hongos formadores de micorrizas o micorrizógenos son uno de los principales grupos de microorganismos beneficiosos para mejorar el establecimiento y desarrollo de las plantas (Figuroa *et al.*, 2002). Las ventajas que proporciona el hongo a la planta son diversos, destacando por su importancia: La absorción de agua y nutrientes, gracias al hecho de que el micelio fúngico al constituirse en una extensión de raicillas explora un mayor volumen de suelo que una raíz sola, permitiendo la captación de los nutrientes más allá de la zona de agotamiento de las raíces (Jacobsen, 1992), efecto particularmente importante en zonas donde las precipitaciones varían tanto en el tiempo como en el espacio. En las plantas micorrizadas se produce un aumento del contenido de agua, debido posiblemente a un incremento de la conductividad hídrica de la planta o a una disminución de la resistencia al flujo de agua a través de ella o es una respuesta secundaria, consecuencia de la mejora de la nutrición o de algún cambio fisiológico en la planta hospedadora que, indirectamente, incrementa la resistencia a la sequía (Augé, 2001). Sin embargo, las mejoras que producen la introducción de micorrizas no se limitan sólo

al ámbito de la nutrición mineral, sino que las plantas reciben beneficios adicionales tales como resistencia a diversas situaciones de estrés: sequía, salinidad, metales pesados, resistencia de las plantas a los ataques de patógenos (*Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*).

Cabe señalar que esta resistencia o tolerancia no es generalizable, ya que la efectividad varía con el hongo micorrízico, el patógeno implicado, el sustrato de crecimiento y las condiciones ambientales. También se ha comprobado que los hongos micorrizógenos producen un efecto positivo sobre las características edáficas influyendo en la estabilidad física del suelo ya que facilitan la agrupación de las partículas (Caravaca *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2002).

El efecto de la materia orgánica al disminuir el pH del suelo, puede promover la disponibilidad de nutrientes (Álvarez-Solís *et al.*, 2010, Bautista, *et al.*, 2015), esto para los cultivos en municipios como Nduayaco y Pericón, donde los niveles de fertilidad no son tan bajos respecto a los suelos de los otros municipios estudiados, pero que presentan sitios con pH elevado por la naturaleza calcárea del suelo.

A mediano plazo

Se consideran alternativas que por el tiempo de adopción y establecimiento requieren lapsos de al menos un año o más para su establecimiento.

Por la orografía de área de estudio, la mayoría de las unidades de producción son de agricultura de ladera, donde prevale la agricultura tradicional de temporal, siendo el sistema de cultivo principal la milpa tradicional (con y sin yunta). La implementación de tecnologías como la Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), ha sido ampliamente recomendada en varias regiones del Estado de Oaxaca (Cortés *et al.*, 2005; Morales *et al.*, 2007). En algunas comunidades del área de estudio este sistema ha sido adoptado parcialmente y han sido medianamente exitosas. Los problemas observados son escasez de capacitación para su manejo y seguimiento constante del manejo que requieren los frutales; se ha implementado con especies de manzana, durazno y aguacate, sin embargo, se propone considerar la adaptación del

sistema con otras especies ampliamente adaptadas en la zona y que requieren de menos trabajo de manejo. Una de las principales limitante para el éxito del sistema son las podas y el manejo de los frutales, situación que esta autora ha observado de manera personal en el área de estudio, lo cual causa abandono y por ende disminución de la efectividad del sistema. Especies como el nopal verdulero, nopal tunero y maguey pueden considerarse para adaptarlas al sistema, obteniendo además subproductos para la comercialización de inicio local, que contribuya a incrementar la economía familiar. Para esta alternativa hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones planteadas por Ruíz *et al.* (2012) para tener éxito en la adopción de este sistema:

Los sistemas de producción se pueden mejorar, a través de la generación y transferencia de innovaciones tecnológicas, que para ser adoptados por la gente, necesitan concebirlos desde su visión, lo cual implica que, al decidir establecer ciertos componentes del paquete tecnológico MIAF, de acuerdo a su estructura sociocultural y económica, qué componentes del sistema MIAF adoptar. El objetivo se logra si los campesinos logran armonizar, la innovación con su estructura sociocultural y económica.

La capacitación es un factor determinante para que los actores aprendan la dinámica tecnológica del sistema MIAF, mediante la asistencia técnica. Lo anterior es necesario y fundamental para el desarrollo rural en las comunidades. La permanencia de la asesoría técnica a través del tiempo es indispensable, ya que van surgiendo nuevas necesidades de capacitación (manejo poscosecha, comercialización y organización).

A largo plazo

En las parcelas donde la calidad el suelo y por ende la fertilidad es muy baja y deficiente, se han reportado diversas alternativas con el propósito de recuperar la fertilidad del suelo. Hernández y Pastor (2008) propusieron implementar actividades

con criterios ecológicos como la agricultura de conservación, agricultura sostenible con lo que se pueden obtener resultados iniciales como la disminución de la erosión de 119 g/m^3 hasta 1.0 g/m^3 con el establecimiento de una cubierta vegetal consistente en especies herbáceas nativas, pastos y reforestaciones son clave para disminuir los procesos erosivos. El cubrimiento del suelo con la vegetación herbácea (arvenses), ha demostrado, ser la práctica más eficiente en la prevención de la erosión en las zonas de ladera en el mundo (Barrera *et al.*, 2003). Así mismo, la vegetación arbórea y arbustiva permite que se presenten sistemas radicales de anclaje mayor en lo profundo y hacia los lados en el perfil del suelo, aumentando la resistencia de éste a la ruptura, fracturación o fallamiento y con ello la mayor estabilidad del terreno a los movimientos de masa, el uso de la bioingeniería para establecer filtros vivos. Los filtros vivos que pueden consistir en la construcción de zanjas horizontales en sentido perpendicular a la pendiente del terreno, de 0,30 a 050 m de anchura y 0,50 a 2,0 m de profundidad, dependiendo de la hondura a la cual se encuentre el terreno firme. Estas zanjas se llenan con varios tendidos (3 a 4 tendidos) de ramas vivas, leucaena (*Leucaena leucocephala*), pasto zacatón u otros materiales de propagación vegetativa de la zona, colocadas a lo largo perpendicular a la pendiente, y reforzados en los terrenos con pendiente pronunciadas (Rivera, 2002).

En áreas muy erosionadas donde no se puede pensar inicialmente en establecer cultivos agrícolas y la prioridad es detener el proceso erosivo se propone una labor social de concientización hacia la eliminación del pastoreo libre que es una de las principales causas de la degradación del suelo, así como una propuesta de cambio de especie de caprinos a ovinos en un manejo semiestabulado. Establecer área de exclusión de pastoreo para los sitios no agrícolas. El establecimiento de obras de conservación de suelos deben ser consideradas en el área de estudio solo desde el punto de vista de conservación de suelo y no de recuperación de la fertilidad, ya que algunas prácticas mecánicas pueden tener resultados inversos (Barrios, 2010). crecimiento de gramíneas reduce la escorrentía entre 50 y 60 % y las pérdidas por

erosión de 60 a 80 %, las gramíneas que mejor adaptación tienen en el área de estudio son; la avena, trigo, cebada y los maíces criollos (Morgan, 1986).

El establecimiento de un vivero de producción de plántulas nativas (encino, pastos, frutales, acacias, entre otras), se propone realizar el acopio y producción de las plantas nativas con experiencia de los habitantes de las localidades. Los viveros comerciales por lo general no cuentan con las especies precisas para la restauración, por lo que una opción es el establecimiento de un vivero multifuncional que permita la producción de las plántulas necesarias, genere información valiosa sobre especies nativas.

Prácticas y Obras de conservación de suelo

Existen diversas obras de conservación de suelo, sin embargo la mayoría implican un costo económico elevado; el área de estudio se caracteriza por ser comunidades de alta y muy alta marginación con escasos recursos económicos y elevados índices de marginación, por lo que solo se mencionan las opciones que mediante la participación comunitaria se pueden implementar para contrarrestar los problemas erosivos del suelo.

Zanja bordo: que implica aflojar, excavar o extraer y remover suelo a cielo abierto, en áreas previamente localizadas y trazadas en curvas a nivel. Son obras o prácticas mecánicas que se utilizan preferentemente para recuperación de suelos, aunque también se pueden utilizar como obras de conservación. Su propósito de romper y acondicionar suelos degradados para facilitar el establecimiento de plantaciones forestales, especialmente en suelos considerados duros, para interceptar los escurrimientos para controlar y reducir su velocidad, captar agua, almacenarla y propiciar su infiltración en el suelo, para su uso por los cultivos forestales o las plantas, así como para la recarga de acuíferos. Disminuir la erosión del suelo e interceptar sedimentos, formar suelos y mejorar su calidad. Esta práctica se adapta a cualquier tipo de suelo que no tenga más del 50% de piedra superficial y preferentemente más

de 40 cm de profundidad, pendientes mayores a 15 %, donde la vegetación cubre del 10 al 45 % de la superficie y no se recomienda la instalación de terrazas o el subsoleo directo. Como en las comunidades de Tonaltepec, Gavillera, Cerro Prieto; en Pericón y Nduayaco en zonas específicas pues esas comunidades presentan algunas zonas con mucha pedregosidad superficial. Para establecerlas se requiere una gran cantidad de mano de obra de obra que puede fomentar el tequio y el empleo temporal si se gestiona con instituciones como la CONAFOR o la CDI.

Terrazas con especies vivas: El objetivo de esta obra de conservación de suelo es recuperar suelos erosionados, romper capas duras de suelo, reducir la erosión del suelo, la producción de sedimentos y su arrastre hacia las partes bajas. Aumentar la infiltración del agua en el suelo para el desarrollo de la vegetación o para recargar acuíferos, así como disminuir la velocidad y el volumen de escurrimiento. Mejorar la superficie de los terrenos acondicionándola para labores de reforestación o agrícolas. En pendientes mayores al 15% se requiere maquinaria especial, para pendientes menores se puede formar con tractor agrícola. La desventaja es que requieren muchos recursos económicos para su establecimiento. Las especies productivas para control de erosión pueden ser maguey, pitahaya, nopal, que tienen aceptación en el mercado local y se adaptan al clima semiárido del área de estudio.

Barreras vivas: Son hileras de plantas perennes, de crecimiento denso, sembradas en forma transversal o en contorno, en las pendientes de áreas de laderas, siguiendo curvas a nivel, con cero pendiente longitudinal. Las barreras vivas se utilizan para proteger las tierras bajo uso agrícola, ganadero y forestal de la erosión hídrica.

Zanjas-bordo en curvas a nivel: Es un sistema de bordos conformado con el producto de la excavación de suelo o subsuelo, de forma perpendicular a la pendiente del terreno, siguiendo curvas a nivel con maquinaria o aperos de labranza, en combinación con instrumentos manuales. Sirve para aumentar la humedad aprovechable, establecimiento de la vegetación nativa y especies plantadas y para

mejorar las condiciones de suelo para la germinación y el desarrollo radicular, evitar el arrastre de partículas de suelo de las partes altas, disminuir los escurrimientos superficiales.

CONCLUSIONES

La evaluación de la degradación del suelo es importante en la implementación de acciones de restauración, ya que permite identificar áreas prioritarias para su atención. Es conveniente considerar en estudios futuros el conocimiento de los productores, lo cual permitirá proponer soluciones a problemas determinados que en un futuro puedan resultar en cambios de actitud hacia el uso y manejo de los recursos naturales dentro de los sistemas productivos.

El análisis de las observaciones y las visitas de campo realizadas a la zona de estudio nos permiten concluir que el aporte de materia orgánica es urgente y necesario, ya que la calidad de los suelos estudiados resultó ser en su mayoría de moderada a deficitaria. La principal limitante para el establecimiento de esta alternativa es la escasez de residuos orgánicos en el área de estudio y se requiere de técnicas socio-comunitarias como la *gueza* y *el tequio*, para reforzar el trabajo organizativo comunitario para la producción, ya que de ello depende el establecimiento de las alternativas propuestas.

Es urgente y preciso inducir cubiertas vegetales no solo en cantidad, también en calidad, con áreas de exclusión que permitan incrementar las superficies de reforestación y eliminar el pastoreo libre de ganado; de acuerdo a los estudios de degradación y erosión, son las principales causas de la degradación de suelos del área de estudio. Los aspectos socio-culturales como el pastoreo libre son limitantes para ello.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E.; Carrasco, M.; León, O.; Martínez, E.; Silva, P.; Castillo, G.; Ahumada, I.; Borie, G. & Gonzáles, S. 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. 205 p.
- Álvarez, S. J. D.; Gómez, V. D. A.; León, M. N. S. y Gutiérrez, M. F. A. 2010. Integrated management of inorganic and organic fertilizers in maize cropping. *Agrociencia* 44:575-586
- Amézquita, E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. **In:** F. Silva (ed.). *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Colombia. pp.137-154.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M. and Le Bissonnais, Y., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71:413-423.
- Augé, R., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11:3-42.
- Barrera G., J.E.; Rivera P. J. H., Cadena M. E. 2003. Las raíces de la vegetación como elementos estructurales en la estabilidad de laderas. **IN:** Seminario Internacional de Agricultura de Conservación en tierras de ladera. Manizales (Colombia). Noviembre 26, 27 y 28 de 2003. 6p.
- Bautista C. A., Etchevers B. J., del Castillo R.F. y Gutiérrez C. C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 23 (2): mayo-agosto. Asociación Española de Ecología Terrestre, España. Pp 90-97.
- Bautista-Cruz, A.; Cruz-Domínguez, G.; Rodríguez-Mendoza, M. N.; Pérez-Pacheco, R. y Robles, C. 2014. Effect of compost and slow-release fertilizers addition on soil biochemistry and yield of maize (*Zea mays* L.) in Oaxaca, Mexico. *Rev. FCA UNCUYO*. 46:181-193.
- Bautista-Cruz, A.; Cruz-Domínguez, G. Rodríguez-Mendoza, M. N. 2015. Efecto de bocashi y fertilizantes de liberación lenta en algunas propiedades de suelos con Maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 6, num 1, enero-febrero,

- 2015, pp 217-222. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, agrícolas y Pecuarias.
- Barrios J. C. 2010. Evaluación de obras de conservación de suelos en el Distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bayhan, K., A. Isisdar, and M. Akgul. 2005. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a loam soil of a dryland in Turkey. *Soil and Plant* 55:214–220.
- Beltrán L., S., C. Loredó O. y J. Urrutia M. 2005. Manejo y rehabilitación de agostaderos de zonas áridas y semiáridas. In: Loredó O.C. (Ed). 2005. Prácticas para la conservación de suelo y agua en zonas áridas y semiáridas. INIFAP-CIRNE Campo exp. San Luis. No. 1. San Luis Potosí, S.L.P. México. Pp 157-185
- Brown, J. R. 1987. Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation. Soil Science Society of America. Special Publication No. 21. SSSA Inc. Madison, Wisconsin. USA. 144 p
- Capo A. M. A. 2001. Establecimiento de Plantaciones Forestales: Los ingredientes del Éxito. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Saltillo, Coahuila. 207 p.
- Caravaca, F., Barea, J.M., Figueroa, D. y Roldán, A., 2002. Assessing the effectiveness of mycorrhization and soil compost addition on reforestation with *Olea europaea* subsp. *sylvestris* through changes in soil biological and physical parameters. *Applied Soil Ecology*, 20:107-118.
- Costa, F., García, C., Hernández, T., Polo, A., 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. C.S.I.C. (Eds.), Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Murcia.
- Crespo, G. *et al.* 2010. Utilización de residuales de las instalaciones pecuarias para la producción de pastos y forrajes tropicales. Resúmenes. Congreso 45 Aniversario del Instituto de Suelo y VII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. Ciudad de La Habana, Cuba. p. 41
- Crespo, G. & Fraga, S. 2006. Avances en el conocimiento del reciclaje de los nutrientes en sistemas silvopastoriles. IV Congreso Latinoamericano de Agroforestería para

- la producción pecuaria sostenible. III Simposio sobre sistemas silvopastoriles para la producción ganadera sostenible. EEPF "Indio Hatuey". Matanzas, Cuba. p. 104
- Cun, R. et al. 2008. Producción orgánica de tomate mediante la aplicación de humus de lombriz y EcoMic® en condiciones de casa de cultivo. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 17:22
- Drury, C.F., C.S. Tan, T.W. Welacky, T.O. Oloya, A.S. Hamill y S.E. Weaver. 1999. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content and corn emergence. Agron. J. 91: 101-108.
- Giulietti, A. L., O. M. Ruiz, H. E. Pedranzani y O. Terenti. 2008. Efecto de cuatro lombricompuestos en el crecimiento de plantas de *Digitaria eriantha*. Rev. Int. Bot. Exp. 77: 137-149.
- Cortés, F. J. I.; Turrent, F. A.; Díaz, V. P.; Hernández, R. E.; Mendoza, R. R. y Aceves, R. E. 2005. Manual para el establecimiento del sistema milpa intercalada en árboles frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco. Estado de México. 137 pp.
- Ellies, A., 2004. Efecto de la materia orgánica en el suelo. En: Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. Simposio de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Universidad de La Frontera, Temuco, pp: 139-150.
- Figuroa, D., Caravaca, F., Alguacil, MM., Roldán, A., 2002 Improvement of rhizosphere aggregates stability of afforested semi-arid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. In: Faz, A., Ortiz, R. & Mermut, A.R. (eds.) Sustainable use and management of soils in arid and semiarid regions, Quaderna Editorial, Murcia, España. pp.537-538.
- Franti G. T. 1997. Bioengineering for Hillslope, Streambankand Lakeshore Erosion Control. Electronic version issued February 1997. pubs@unl.edu. 8p.
- Gros, A. y Domínguez, A., 1992. Abonos guía práctica de la fertilización. 8va. edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 450 p.
- Ikerd, J. 1990. Agricultura Sostenible. INTA, Publicación # 1. Serie Agricultura Sostenible. Buenos Aires.

- Igue, K. 1984. Dinámica da materia organica e seus efeitos na propriedade do solo. pp. 232-267. *In: Adubo verde no Brasil*. Fundacao Cargill (eds.). Campinas, SP., Brasil.
- IUSS Working Group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jacobsen, I., 1992. Phosphorus transport by external hyphae of vesicular arbuscular mycorrhizas. *En: Mycorrhizas in Ecosystems*. Read, D.J., Lewis, D.H., Fitter, A.H. y Alexander, I.J. (Eds.). C.A.B. International. Wallingford, UK: 48-54.
- Kaplan, L.; Tlustoš, P.; Száková, J. and Najmanová, J. 2013. The influence of slow-release fertilizers on potted chrysanthemum growth and nutrient consumption. *Plant Soil Environ.* 59:385-391.
- Karlen, D.L., T.C. Erbach, T.S. Kaspar, E.C. Colvin, C. Berry y C.R. Timmons. 1990. Soil tillage: a review of past perceptions and future needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 153-161.
- Karlen, D.L., E.C. Berry y T.S. Colvin. 1991. Twelve-year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in northeast Iowa. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 1985-2003.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach. J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Shuman. 1997. Soil quality: Concept, rationale, and research needs. *Soil Science Society of America Journal* 60:4-10.
- Kondolf, G. M. 2000. Process vs form in restoration of rivers and streams. Pages 120-124 in D. L. Scheu, editor. Annual meeting proceedings of the American Society of Landscape Architects (St. Louis, 2000). American Society of Landscape Architects, Washington, D.C., USA.
- Labrador J. 2002. La materia orgánica en los Agroecosistemas. (2a Edición).293 pp. MAPA/Mundi-Prensa, Madrid.
- Legall, J. y Zoyla, D. 2008. Manual básico de lombricultura para condiciones tropicales. [Disponible en:] <http://abaco-sa.com.ar/mmorra1/Libro2.htm> . [Consulta: 12 de noviembre 2014].

- Lyon, D., C.A. Monz, R. Brown y A.K. Metherell. 1997. Soil organic matter changes over two decades of winter wheatfallow cropping in western Nebraska. pp. 343-351. In: Paul, E.A. y C.V. Cole (eds.). Soil organic matter in temperate agricultural ecosystems: a site network approach. Lewis Publishers. Chelsea, MI.
- Martínez, F. et al. 2003. Lombricultura. Manual práctico. Instituto de Suelos. MINAG. La Habana. Cuba. 99 p.
- Mayea, S. 1994. Tecnología para la producción de compost (biotierra) a partir de la inoculación con microorganismos de diversos restos vegetales. CIDA. La Habana, Cuba. 22 p.
- Morales, G. M.; Jiménez, S. L. y Ramos, S. A. 2007. Manual de capacitación y divulgación de la tecnología milpa intercalada en árboles frutales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. Libro técnico Núm. 9. Santo Domingo Barrio Bajo, Etlá, Oaxaca, México. 176 pp.
- Mustin, M., 1987. Le compost, gestion de la matière organique. F. Dubusc Eds., Paris, pp. 954.
- Navarro Pedreño, J., Moral Herrero, Gómez Lucas y Mataix Beneyto., 1995. *Residuos orgánicos y agricultura*. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. Alicante. España, 108 pp. nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus. *Environmental Pollution*, 158(6): 2043–2052.
- Noriega, G. et al. 2001. Producción de abonos orgánicos y lombricultura. Universidad Autónoma de Chiapas. Huehuetán, Chiapas, México.
- Ojeda, D. y E. Ojeda T. 1996. Suelos cultivados de la República Mexicana, contenido medio de nutrimentos minerales aprovechables. México, Universidad Autónoma Chapingo. En estadísticas del Medio Ambiente 1999. Capítulo II. Medio ambiente y recursos naturales. (www.inegi.gob.mx/espanol/bvinegi/), México, p. 10.
- Pardo, A. y Ruiz, M. A. (2002). *SPSS 11*. Guía para el análisis de datos. Madrid: McGraw-Hill. ISBN 9788448137502.

- Paneque, V.M. & Calaña, J.M. 2004. Manual abonos orgánicos. Conceptos prácticos para su evaluación y aplicación. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. 37 p.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de L. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2a ed. Mundi-Prensa, España. Pp-56.
- Rivera P. J.H. 2002. Uso de Métodos de Bio-ingeniería para control de erosión en Zonas de Ladera. IN: XI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Edafología y Ambiente para el Progreso Social, Cali (Colombia), Septiembre 18 al 20 de 2002. Conferencia Magistral (Ponencia en Disco Compacto). 22 p.
- Rodríguez S., J. 1993. La Fertilización de los Cultivos, un Método Racional. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 208 p.
- Romero L., M. R., A. Trinidad S., R. García E. y R. Ferrara C. 2000. Producción de papa y biomasa microbiana en suelo con abonos orgánicos y minerales. *Agrociencia* 34: 261-269.
- Ruiz, M. A. D., Jiménez S. L., Figueroa R., L. G. y Morales G. M. (2012). Adopción del sistema milpa intercalada en árboles frutales por cinco municipios mixes del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3 : 1605-1621
- Salazar-Sosa, E., A. Beltrán-Morales, M. Fortis-Hernández, J. A. Leos-Rodríguez, J. A. Cueto-Wong y C. Vázquez-Vázquez. 2003a. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de avena forrajera con tres sistemas de labranza. *Terra* 21: 561-567.
- Salazar Sosa, E., A. Beltrán Morales, M. Fortis Hernández, J. A. Leos Rodríguez, J. A. Cueto Wong, C. Vázquez Vázquez y J. J. Peña Cabriales. 2003b. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra* 21: 569-575.
- Salazar S., E., T. J. A. Montemayor y M. Fortis H. 2004. Producción sustentable de maíz forrajero con aplicación de estiércol bovino bajo riego subsuperficial. *Desarrollo Tecnológico. FAZ-UJED. Venecia, Durango, México.*

- Sánchez, P. A. and Calhoun, 1997. Replenishing Soil Fertility in Africa. SSSA, ASA. Special Publication Number 51. Madison, Wisconsin, USA
- Sánchez, A., Zenteno C., Zamora L.F. y Torres D. 2002. Modelo para la restauración ecológica de áreas alteradas. Kuxulkab Revista de divulgación Vol VII Número 14.
- Schulze, E. D., and Freibauer, A., 2005. Environmental science: Carbon unlocked from soils. *Nature*, 437(7056):205-206.
- Thönnissen, C., D.J. Midmore, J.K. Ladha, R.J. Holmer y U. Schmidhalter. 2000. Tomato crop response to short duration legume green manures in tropical vegetable systems. *Agron. J.* 92: 245-253.
- Trinidad S. A. 1999. El papel de los abonos orgánicos en la productividad de los suelos. Symposium Internacional y Primera Reunión de Lombricultura y abonos Orgánicos, 18 1l 20 de Octubre de 1999. Universidad Autónoma Chapingo- Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Pp 3-19.
- Vergara S. M.A., Etchevers B.J.D. y Padilla C.J. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, vol 39. Núm. 3, mayo-junio, 2005, pp 259-266, Colegio de Postgraduados, México.
- Vigil, M. F. and D. E. Kissel. 1995. Rate of nitrogen mineralized from incorporated crop residues as influenced by temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1636-1644.
- Wander, M.M. y G.A. Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.

CONCLUSIONES GENERALES

El conocimiento de la evaluación de la degradación del suelo es relevante en la implementación de acciones de restauración, ya que permite identificar áreas prioritarias para su atención, el soporte cartográfico es invaluable en trabajos teóricos con pocos recursos para investigación. Se debe considerar que los estudios cartográficos presentan imprecisiones de escala y que solo representan una aproximación de la situación real de los sitios del área de estudio.

Las causas del fenómeno de degradación son principalmente inducidas, siendo la concientización, la educación y la capacitación componentes fundamentales para contrarrestar las causas.

Los bajos contenidos de materia orgánica en el suelo, determina una baja calidad y fertilidad edáfica, lo cual dificulta el crecimiento de la cubierta vegetal. Para recuperar suelos degradados es necesario mejorar su calidad con enmiendas y/o abonos orgánicos.

La definición de distintas clases de calidad de los suelos asociadas a los atributos químicos evaluados en suelos agrícolas y degradados de la Mixteca Alta-Oaxaca permitió proponer estrategias particularizadas para aumentar la calidad y fertilidad de estos suelos, considerando necesidades específicas de cada sitio de muestreo, lo cual es relevante para la propuesta de las alternativas de recuperación de la fertilidad de suelos.

Para recuperar áreas degradadas no se debe enfocar la solución solo al efecto del problema si no a su causa, contrarrestar las causas es lo que permite disminuir los efectos, por lo que las alternativas propuestas están enfocadas a la restauración y durante el proceso de establecimiento se debe considerar que pueden tener modificaciones.

ANEXO

Fertilidad de suelos

Cuadro 1. Resultados de los análisis químicos, físicos y biológico de suelos de Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.

Tipo de suelo	Uso de suelo	pH	CE mm hos/cm	MO %	N %	P Ppm	Textura	Color Carta munsell)	Biomasa Microbiana (BM- C) $\mu\text{g g}^{-1}$ suelo
Leptosol	Ag	6.9	0.06	0.8	0.04	4.9	franco	Café oscuro	60.679
Leptosol	Ag	7.5	0.10	0.8	0.04	8.6	arcilloso	Café-grisáceo oscuro	47.924
Leptosol	Ag	8.3	0.38	0.3	0.01	5.4	Franco arcilloso	Café muy claro	14.174
Leptosol	Ag	8.4	0.20	0.5	0.03	15.7	franco-arcillo arenoso	Gris oscuro	35.475
Leptosol	Ag	8.5	0.21	0.6	0.03	11.5	franco-arcillo arenoso	Café grisáceo	51.160
Leptosol	Ag	8.7	0.23	0.3	0.01	18.7	franco-arcillo arenoso	Café muy claro	42.159
Leptosol	Ag	8.6	0.34	0.5	0.03	2.5	arcillo-arenoso	Gris oscuro	30.142
Leptosol	Ag	8.7	0.24	0.6	0.03	5.4	arcilloso	Café claro	42.346
Leptosol	Ag	7.9	0.17	1.6	0.80	2.0	franco-arcilloso	Café-grisáceo obscuro	82.533
Leptosol	Ag	8.2	0.21	0.3	0.01	11.5	Franco arenoso	Café claro	19.783
Leptosol	Dg	5.8	0.29	0.3	0.01	9.3	Franco arcilloso	Gris claro	15.165
Leptosol	Dg	5.7	0.07	0.3	0.01	7.2	Franco arcilloso	Café muy claro	28.229
Leptosol	Dg	8.5	0.24	0.2	0.01	9	Franco arcilloso	café	16.850
Leptosol	Dg	7.9	0.17	0.6	0.03	1.7	franco-arcillo arenoso	Café	37.900

Ag: Agrícola; Dg: Degradado.

Cuadro 2. Resultados de los análisis químico de suelos de Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Bases Intercambiables (BI) meq/100 gr				CIC (meq/100gr)	Microelementos (ppm)			
		Na	Ca	Mg	K		Fe	Cu	Zn	Mn
Leptosol	Ag	0.58	11.97	16.11	0.50	29.15	27	0.9	0.6	70
Leptosol	Ag	1.07	38.38	11.40	0.58	51.44	12	1.1	0.5	36
Leptosol	Ag	0.60	31.01	1.23	0.44	33.27	5	0.3	0.1	6
Leptosol	Ag	1.73	39.47	1.77	0.19	43.17	6	0.5	0.7	8
Leptosol	Ag	1.68	28.45	1.53	0.08	31.74	6	0.4	0.6	9
Leptosol	Ag	0.81	39.06	1.75	0.16	41.79	5	0.3	0.4	3
Leptosol	Ag	1.78	39.87	1.52	0.11	43.27	4	0.5	0.9	12
Leptosol	Ag	2.17	56.43	3.65	0.48	62.72	4	0.2	0.4	6
Leptosol	Ag	0.34	21.12	11.18	0.18	32.82	16	1.4	0.5	26
Leptosol	Ag	0.83	16.82	0.55	0.40	18.60	6	0.2	0.5	8
Leptosol	Dg	0.95	49.60	7.92	0.10	58.57	5	0.4	0.3	18
Leptosol	Dg	0.46	10.12	5.15	0.26	15.98	31	0.2	0.3	15
Leptosol	Dg	0.30	11.36	6.07	0.41	18.13	21	0.1	0.3	17
Leptosol	Dg	0.10	31.7	0.8	0.40	33	31	0.1	0.2	16

Ag: Agrícola; Dg: Degradado.

Cuadro 3. Resultados de los análisis químicos, físicos y biológico de suelos de Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.

Tipo de suelo	Uso de suelo	pH	CE mmhos/cm	MO %	N %	P ppm	Textura	Color (Munsell)	Biomasa Microbiana (MB- C) $\mu\text{g g}^{-1}$ suelo
Leptosol	Ag	6.3	0.03	0.1	0.01	2.7	franco	Café-amarillento claro	69.983
Leptosol	Ag	8.0	0.23	3.5	0.17	24.6	arcilloso	Rojo- amarillento	135.924
Leptosol	Ag	5.7	0.04	1.6	0.08	3.4	Franco arcilloso	Café - amarillento	125.769
Leptosol	Ag	7.3	0.12	2.1	0.11	2.5	franco-arcillo arenoso	Café obscuro-amarillento	133.633
Leptosol	Ag	7.3	0.09	2.0	0.10	2.7	franco-arcillo arenoso	Café obscuro-amarillento	263.518
Leptosol	Ag	8.4	0.24	1.5	0.08	2.5	franco-arcillo arenoso	Café muy claro	182.125
Leptosol	Ag	7.9	0.28	3.8	0.19	34.1	arcillo-arenoso	Café claro	280.018
Leptosol	Ag	6.8	0.14	2.2	0.11	4.4	arcilloso	Rojo obscuro	176.569
Leptosol	Ag	7.4	0.09	2.7	0.13	6.6	franco-arcilloso	Rojo obscuro	168.109
Leptosol	Dg	7.2	0.09	1.4	0.07	12.8	franco-arcillo arenoso	Café-rojizo	140.979

Ag: Agrícola, Dg: Degradado.

Cuadro 4. Resultados de los análisis químicos de suelos de Gavillera, San Bartolo Soyaltepec.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Bases Intercambiables (BI) meq/100 gr				CIC meq/100gr	Microelementos Ppm			
		Na	Ca	Mg	K		Fe	Cu	Zn	Mn
Leptosol	Ag	0.07	1.45	0.42	0.17	2.10	16	0.1	0.5	7
Leptosol	Ag	1.58	48.64	1.49	0.47	52.19	8	1.0	1.2	32
Leptosol	Ag	0.35	7.22	1.34	0.49	9.40	42	0.5	0.6	16
Leptosol	Ag	0.39	17.09	1.67	0.27	19.42	14	0.6	0.3	16
Leptosol	Ag	0.35	10.65	1.44	0.20	12.63	10	0.4	0.4	26
Leptosol	Ag	1.56	29.54	0.49	0.12	31.71	5	0.4	0.3	10
Leptosol	Ag	0.67	29.94	0.91	0.46	31.98	15	0.5	3.1	39
Leptosol	Ag	0.40	12.74	2.41	0.13	15.68	6	0.9	0.8	152
Leptosol	Ag	0.94	25.92	1.41	0.05	28.31	6	0.9	1.9	121
Leptosol	Dg	0.65	9.65	2.51	0.16	12.96	13	0.8	0.8	78

Ag: agrícola; Dg: degradado.

Cuadro 5. Resultados de los análisis químicos, físicos y biológico de suelos de Pericón, Santa María Apazco.

Tipo de suelo	Uso de suelo	pH	CE mmhos /cm	MO %	N %	P ppm	Textura	color	Biomasa Microbiana (MB- C) $\mu\text{g g}^{-1}$ suelo
Pheozem	Ag	7.6	0.30	4.1	0.20	9.1	arcilloso	Café oscuro	291.037
Pheozem	Ag	8.1	0.31	8.5	0.43	11.8	arcilloso	Café muy oscuro	510.001
Pheozem	Ag	7.0	0.12	1.9	0.10	17.9	arcilloso	Café rojizo	197.606
Pheozem	Ag	7.8	0.20	2.6	0.13	6.6	arcilloso	Café oscuro amarillento	359.867
Pheozem	Ag	8.2	0.30	3.6	0.18	20.9	arcilloso	Café oscuro ligeramente amarillento	406.330
Pheozem	Ag	8.4	0.40	2.8	0.14	34.6	arcilloso	Café	380.958
Pheozem	Ag	8.2	0.36	4.5	0.23	43.2	arcilloso	café	438.964
Pheozem	Dg	6.7	0.03	0.1	0.01	1.2	arcilloso	Amarillo	24.060
Pheozem	Dg	6.9	0.04	1.2	0.06	4.2	arcilloso	Café rojizo	117.103
Pheozem	Dg	7.1	0.08	2.8	0.14	3.4	arcilloso	Café oscuro amarillento	364.944

Ag: agrícola; Dg: degradado.

Cuadro 6. Resultados de los análisis químicos de suelos de Pericón, Santa María Apazco.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Bases Intercambiables (BI) meq/100 gr				CIC meq/100gr	Microelementos ppm			
		Na	Ca	Mg	K		Fe	Cu	Zn	Mn
Pheozem	Agrícola	1.24	33.24	4.55	0.12	39.16	16	0.6	1.6	58
Pheozem	Agrícola	1.11	35.10	3.64	0.08	39.93	17	1.3	1.9	71
Pheozem	Agrícola	0.38	18.78	2.89	0.27	22.31	7	0.4	1.8	118
Pheozem	Agrícola	1.10	52.26	3.01	0.40	56.76	11	0.6	0.8	28
Pheozem	Agrícola	1.48	38.11	2.13	2.42	44.13	10	1.7	2.1	30
Pheozem	Agrícola	2.42	38.68	2.50	0.13	43.74	11	2.1	4.2	25
Pheozem	Agrícola	1.24	17.64	1.59	0.10	20.57	11	2.0	3.4	24
Pheozem	Degradado	0.37	19.18	2.84	0.24	22.63	14	0.8	1.2	98
Pheozem	Degradado	0.86	22.45	39.52	0.15	62.98	32	4.5	0.9	51
Pheozem	Degradado	0.36	8.15	7.21	0.21	15.93	18	2.0	3.1	29

Ag: agrícola; Dg: degradado.

Cuadro 7. Resultados de los análisis químicos, físicos y biológico de suelos de Nduayaco, Santiago Apoala.

Tipo de suelo	Uso de suelo	pH	CE mmhos/cm	MO %	N %	P ppm	Textura	Color	Biomasa Microbiana (MB- C) $\mu\text{g g}^{-1}$ suelo
Regosol	Ag	6.9	0.03	1.9	0.10	11.5	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	87.006
Regosol	Ag	6.7	0.05	1.6	0.08	14.7	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	75.762
Regosol	Ag	7.1	0.06	2.3	0.11	2.5	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	133.419
Regosol	Ag	6.4	0.05	0.8	0.04	5.2	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	72.919
Regosol	Ag	7.9	0.03	2.4	0.12	13.3	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	127.843
Regosol	Ag	6.5	0.06	2.1	0.11	11.1	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	97.194
Regosol	Ag	6.6	0.06	1.5	0.08	7.1	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	72.912
Regosol	Ag	7.8	0.36	2.8	0.14	48.6	arcilloso	Café	167.406
Regosol	Ag	7.8	0.35	2.5	0.12	34.6	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	149.003
Regosol	Ag	8.1	0.22	3.4	0.17	18.4	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	191.541
Regosol	Ag	6.6	0.06	0.3	0.02	8.8	arcilloso	Café-oscuro-rojizo	15.165

Ag: Agrícola; Dg. Degradado.

Cuadro 8. Resultados de los análisis químicos de suelos de Nduayaco, Santiago Apoala.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Bases Intercambiables (BI) meq/100 gr				CIC meq/100gr	Microelementos Ppm			
		Na	Ca	Mg	K		Fe	Cu	Zn	Mn
Regosol	Ag	0.35	13.67	4.17	0.18	18.37	9	0.8	1.1	137
Regosol	Ag	0.80	12.19	4.57	0.14	17.71	9	0.6	0.7	142
Regosol	Ag	0.78	11.49	4.05	0.20	16.52	11	0.7	1.5	148
Regosol	Ag	1.39	8.26	2.61	0.12	12.38	14	0.9	1.8	166
Regosol	Ag	1.50	26.71	1.59	0.09	29.88	33	1.3	16.6	60
Regosol	Ag	1.37	39.74	2.44	0.47	44.03	9	0.9	2.2	100
Regosol	Ag	2.69	24.87	2.31	0.26	30.13	10	1.0	5.1	33
Regosol	Ag	0.40	14.83	3.46	0.15	18.84	7	0.3	0.5	34
Regosol	Dg	0.16	17.66	2.19	0.20	20.21	9	0.3	0.3	82
Regosol	Dg	1.25	29.63	1.91	0.13	32.92	7	0.8	1.7	83
Regosol	Dg	0.18	14.66	3.36	0.17	18.36	8	0.3	0.4	132

Ag: Agrícola; Dg. Degradado.

Cuadro 9. Resultados de los análisis químicos, físicos y biológico de suelos de Cerro Prieto, San Miguel Chichahua.

Tipo de suelo	Uso de suelo	pH	CE mmhos/cm	MO %	N %	P ppm	Textura	Color	Biomasa Microbiana (MB- C) $\mu\text{g g}^{-1}$ suelo
Pheozem	Ag	5.9	0.12	0.3	0.01	4.4	franco-arenoso	Café	19.882
Pheozem	Ag	7.4	0.08	0.3	0.01	14.7	franco-arenoso	Café	22.611
Pheozem	Ag	6.1	0.04	0.7	0.04	4.4	franco-arenoso	Café amarillento claro	33.589
Pheozem	Ag	7.5	0.14	4.1	0.20	6.9	franco-arcillo-arenoso	Café-grisáceo	295.217
Pheozem	Ag	7.2	0.08	2.2	0.11	11.1	franco-arenoso	Gris ligeramente café	149.003
Pheozem	Ag	6.7	0.31	2.4	0.12	20.9	franco-arenoso	Café muy claro	167.406
Pheozem	Dg	6.3	0.04	0.8	0.04	2.7	franco-arenoso	Café claro	35.020
Pheozem	Dg	6.5	0.03	0.6	0.03	0.5	franco-arcillo-arenoso	Café fuerte	27.194

Ag: Agrícola; Dg. Degradado.

Cuadro 10. Resultados de los análisis químicos de suelos de Cerro Prieto, San Miguel Chicahua.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Bases Intercambiables (BI) meq/100 gr				CIC meq/100gr	Microelementos Ppm			
		Na	Ca	Mg	K		Fe	Cu	Zn	Mn
Pheozem	Ag	0.14	0.85	0.39	0.17	1.54	15	0.2	0.3	67
Pheozem	Ag	0.36	6.37	1.15	0.02	7.91	11	0.3	1.6	42
Pheozem	Ag	0.12	1.35	0.48	0.17	2.12	24	0.1	0.2	5
Pheozem	Ag	0.67	19.19	1.14	0.18	21.18	27	0.3	3.0	18
Pheozem	Ag	0.16	6.46	1.24	0.15	8.01	34	0.2	1.7	20
Pheozem	Ag	0.12	5.32	1.27	0.12	6.83	35	0.2	1.5	18
Pheozem	Dg	0.10	1.31	0.27	0.17	1.85	20	0.1	0.3	26
Pheozem	Dg	0.34	4.34	2.09	0.28	7.05	16	0.4	0.2	116

Ag: Agrícola; Dg. Degradado.