



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"

**EVALUACIÓN DE LA DESERTIFICACIÓN
EN LA MICROCUENCA CACALOAPAN
EN TEPANCO DE LÓPEZ, PUEBLA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA LUISA RAMÍREZ GARCÍA

Asesora de tesis:

Dra. Rosalía Del Carmen Castelán Vega

Noviembre 2017



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”



**EVALUACIÓN DE LA DESERTIFICACIÓN
EN LA MICROCUENCA CACALOAPAN
EN TEPANCO DE LÓPEZ, PUEBLA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA LUISA RAMÍREZ GARCÍA

Comité tutorial:

Asesora y Tutora	Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega
Integrante Comité Tutorial	Dr. José Víctor Tamariz Flores
Integrante Comité Tutorial	Dr. Ricardo Darío Peña Moreno
Integrante Comité Tutorial	Dr. Ricardo Pérez Avilés
Integrante Comité Tutorial	M.C. Mayra Mónica Hernández Moreno

Noviembre 2017



C. ANA LUISA RAMÍREZ GARCÍA

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

<i>Dr. Renato Almorín Albino</i>	<i>Presidente</i>
<i>Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores</i>	<i>Secretario</i>
<i>Dra. Anabella Handal Silva</i>	<i>1er. Vocal</i>
<i>Dr. Ricardo Darío Peña Moreno</i>	<i>2do. Vocal</i>
<i>Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga</i>	<i>Suplente</i>

designado para la defensa de su tesis “*Evaluación de la desertificación en la microcuenca Cacaloapan en Tepanco de López, Puebla*” han manifestado mediante su voto que ésta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Maestría en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

“PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR”

H. PUEBLA DE Z., NOVIEMBRE 21 DE 2017

DR. RICARDO DARÍO PEÑA MORENO
SECRETARIO ACADÉMICO

RDPM/anma
c.c.p. Archivo
c.c.p. Minutario



Somos temerosos de los que nos hace diferentes”

Rice, A.

AGRADECIMIENTOS

En especial a mi madre, por haberme dado la dicha de la vida, por hacer de mí una mujer de bien, trabajadora y responsable. Por ayudarme a cumplir con los sueños y deseos que me he planteado y propuesto, así como impulsarme a vencer los miedos y obstáculos durante mi formación personal. Por ser mi guía, consejera y compañera en cada viaje y aventura emprendida. Le agradezco todo el amor que me han brindado, todo lo que tengo y soy.

A mi hermano, por cuidarme y apoyarme en cada momento de mi vida, por ser mi amigo y el sostén en las adversidades más difíciles.

A la Dra. Rosalía Castelán Vega por el apoyo brindado, así como por sus consejos e invaluable guía en la realización de esta tesis.

Agradezco a los miembros del Comité Tutorial: M.en C. Mayra Mónica Hernández Moreno, Dr. Ricardo Pérez Avilés, Dr. Ricardo Darío Peña Moreno y Dr. Víctor Tamariz Flores, por sus oportunas recomendaciones en el desarrollo de este trabajo de investigación

Al Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas por permitirme realizar las este trabajo de tesis dentro de sus instalaciones.

Al Dr. Víctor Tamariz por todo su apoyo brindado tanto en la parte del trabajo de campo como de laboratorio, asimismo por sus pertinentes consejos académicos.

A CONACyT por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de esta tesis.

A la VIEP por el apoyo económico para la participación en congresos nacionales y regionales.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales por permitirme formar parte del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y todo el apoyo brindado para el tanto económico como administrativo para finalizar la Maestría.

Finalmente agradezco a los miembros que integran el Comité de Bienes Comunales del Municipio de Tepanco de López por todo el apoyo proporcionado durante los recorridos en campo, así como su participación activa para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Índice

I. INTRODUCCIÓN	8
II. JUSTIFICACIÓN	11
III. MARCO TEÓRICO.....	13
3.1 Sistemas Complejos.	13
3.2 Cuenca Hidrológica.	14
3.3 Desertificación.	15
3.3.1 <i>Antecedentes.</i>	16
3.3.2 <i>Indicadores de Desertificación.</i>	20
3.4 Modelación Matemática.	24
3.4.1 <i>Modelación Estadística.</i>	24
3.4.2 <i>Lógica Difusa.</i>	25
IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	26
V. HIPÓTESIS.....	26
VI. OBJETIVOS.....	26
6.1 Objetivo General.	26
6.2 Objetivos Particulares.	27
VII. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	28
7.1 Localización.	28
7.1.1 <i>Aspectos Generales de la Zona de Estudio.</i>	29
7.2 Metodología de la Investigación.	44
7.2.1 <i>Etapa 1: Gabinete.</i>	46
7.2.2 <i>Etapa 2: Campo.</i>	47
7.2.2 <i>Etapa 3: Integración.</i>	59
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
8.1 Subsistema Biofísico.	61

8.1.1 Morfometría de la Cuenca.....	61
8.1.2 Análisis Climatológico.....	65
8.1.3 Índice de Vegetación Diferencial Normalizada.....	69
8.1.4 Dinámica de Cambio Espacio-Temporal de Uso de Suelo.....	71
8.1.5 Análisis Fisicoquímico del Suelo.....	80
8.1.5 Erosión.....	86
8.2 Subsistema Político- Socioeconómico.....	91
8.2.1 Población.....	91
8.2.2 Características Económicas.....	92
8.2.3 Actividad Agropecuaria.....	93
8.2.4 Educación.....	94
8.2.5 Población Indígena.....	96
8.2.6 Desarrollo Humano.....	97
8.2.7 Marginación.....	98
8.2.8 Migración.....	98
8.2.9 Programas de Apoyo.....	99
8.3 Diagnóstico General de la Microcuenca Cacaloapan.....	102
8.3.1 Modelo de la Dinámica Ecosistémica.....	104
IX. CONCLUSIONES.....	115
X. LITERATURA CITADA.....	117
10.1 Anexos.....	130

I. INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedo secas, conocidas comúnmente como tierras secas, son entornos que se caracterizan principalmente por sus recursos hídricos limitados, debido a la escasa precipitación anual, períodos de sequía, elevado nivel de evapotranspiración, suelos con poca materia orgánica y humedad, así como una gran oscilación térmica durante el día y la noche (Middleton y Sternberg, 2013; SEMARNAT, 2012). Actualmente se sabe que dichas regiones se encuentran amenazadas por diversos procesos de degradación, entre ellos la pérdida de diversidad biológica, degradación fisicoquímica del suelo, la erosión, y cambios adversos en los patrones climáticos, que en conjunto favorecen el proceso de desertificación (Chen, Chen, Tan y Gong, 2002).

De esta forma, la desertificación es un tipo de degradación del suelo propio de las regiones secas, como resultado de una serie de interrelaciones entre factores de origen climático y antropogénico (Boluda, Gil de Carrasco y Pinto Vidal de Oliveira, 2005; Rubio y Bochet, 1998; Granados-Sánchez, Hernández-García, Vázquez-Alarcón y Ruíz-Puga, 2013). Donde los principales agentes biofísicos que conducen a la desertificación son la pérdida de cubierta vegetal, erosión eólica e hídrica, degradación biológica, reducción de la materia orgánica, compactación, contaminación y salinización del suelo (Chen *et al.*, 2002). Socialmente esto se ve reflejado en innumerables impactos como la inestabilidad económica de los países, resultado de la disminución en la productividad del campo, el aumento en los procesos migratorios de las áreas rurales a urbanas, la variabilidad en la tasa de pobreza, la marginación de zonas rurales, entre otros (Garay-Romero y Cabero-Diéguez, 2013). Por lo tanto, la desertificación de las tierras secas es una de las problemáticas ambientales y socioeconómicas más importantes en el mundo, ya que afectan directamente el bienestar y el futuro de la humanidad (García-Orozco, Cedillo-Gutiérrez, Juan-Pérez y Balderas-Plata, 2012; Granados-Sánchez *et al.*, 2013; Zhao, He, Zhou, Su, Li y Drake, 2009).

En el mundo las tierras secas se encuentran localizadas entre los 20° y 30° de latitud norte y sur respectivamente, además se calcula que ocupan aproximadamente el 40% de la superficie terrestre (FAO, 2007; Middleton y Sternberg, 2013). Con base a lo anterior se estima que el 70% de las tierras secas productivas actualmente están amenazadas por la desertificación (FAO, 2007). Las mayores extensiones de tierras secas se encuentran distribuidas en África con el desierto del Sahara, Sudáfrica, Zimbabwe, Botswana, Namibia, Morocco, por mencionar algunos;

en Asia teniendo como máximos exponentes los países de China, Rusia y Kazajstán; en Oceanía con Australia; en Europa destacándose los países mediterráneos (FAO, 2007; SEMARNAT, 2012).

En América del Norte, las tierras secas están localizadas, por orden de prioridad, en los países de Estados Unidos de América, México y Canadá (FAO, 2007). Para el caso de México, se estima que aproximadamente el 65% de su territorio nacional cuenta con regiones secas, éstas se distribuyen en los estados de Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Yucatán y Zacatecas (Becerril-Piña, Mastachi-Loza, González-Sosa, Díaz-Delgado y Khalidou, 2015; SEMARNAT, 2012). Se considera que las principales tierras secas se encuentran en los desiertos de Sonora y Chihuahua, siendo este último el de mayor extensión (García-Orozco *et al.*, 2012; SEMARNAT, 2012). Es importante señalar que en México, la poca atención que se le da a la problemática de la degradación de las tierras y la ausencia de una política agraria con énfasis en el cuidado y la conservación del suelo, ha llevado a que casi la mitad del territorio presente signos de degradación edáfica, que finalmente resulta en un avance del proceso de desertificación (Ruiz, Tamariz, Calderón, Ticante y Cruz, 1998; SEMARNAT, 2012). Dentro de las actividades antropogénicas responsables de la desertificación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país se encuentra el sobrepastoreo, el cambio de uso de suelo, la deforestación y el manejo inadecuado de las prácticas agrícolas (SEMARNAT, 2012).

Con relación al clima, en el estado de Puebla las regiones secas y semisecas se encuentran localizadas en la parte sur y centro oeste, abarcando aproximadamente un 19% del territorio estatal, mientras que por otra parte las zonas cálidas subhúmedas se encuentran en el 25% con dirección al norte y sureste del estado (INEGIa, 2015; SSAOT, 2012). Enfocándose exclusivamente al sur del Estado, es importante señalar que las tierras secas han experimentado un grave daño de degradación debido a la influencia de las actividades humanas (Ruiz *et al.*, 1998). Ejemplo de ello es Tepanco de López, un municipio del sureste de Puebla, donde las actividades económicas primordiales que se realizan son la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, caza, pesca, industria manufacturera, y el comercio al por menor, entre otros (SEDESOL, 2015). Socialmente, este municipio es una región con severos problemas de marginación, pobreza, educación y salud (SEDESOL, 2015).

Pese a todo lo anterior las instituciones y principalmente el gobierno, no le han dado la debida importancia a los problemas ambientales que presenta el municipio de Tepanco de López, pues tanto los estudios académicos en materia de suelo como los proyectos sociales para el manejo y la conservación de sus recursos son escasos, por tanto se desconoce la situación actual y real en que viven las comunidades de esta región, lo cual se puede ver reflejado en una elevada susceptibilidad ambiental a la desertificación. Por ello se pretende diagnosticar, bajo un enfoque sistémico de cuencas y, a través del análisis de indicadores ambientales y socioeconómicos, el grado de desertificación que presenta una microcuenca del río Salado del municipio de Tepanco de López, todo ello con la finalidad de aportar información significativa que permita en un futuro próximo desarrollar e implementar estrategias para la conservación del recurso suelo dentro del municipio.

II. JUSTIFICACIÓN

El ambiente es el conjunto de elementos, relaciones e interacciones entre la naturaleza, la sociedad y la cultura existentes en un espacio y tiempo determinados, esta dinámica a su vez define el estado de dicho ambiente. Es decir, cuando se modifica la modalidad de las interacciones entre alguno de los componentes ambientales también se modifica el ambiente en su conjunto, tanto a escala temporal como espacial. Teniendo en cuenta que dentro de la escala temporal están englobados los conceptos de degradación, y rehabilitación del ambiente; mientras que la escala espacial hace referencia a dos aspectos distintos: 1) la división administrativa, en la que se incluye la información sobre los ámbitos sociales y culturales de un país, región o localidad; y 2) la división natural, que está asociada a todo lo referido con los ecosistemas y su funcionamiento (Alfaro, 2005). De esta manera, tanto la degradación del ambiente como las alteraciones estructurales y funcionales de los ecosistemas están ampliamente relacionadas a procesos naturales y antropogénicos (Morales, 2005).

En México el problema de la degradación de las tierras secas ha sido un tema poco atendido por los gobiernos y la sociedad en general, aun cuando se sabe que el recurso suelo desempeña un papel crucial en el mantenimiento de los ecosistemas y de los sistemas climáticos de la Tierra, ya que cumple con funciones ecológicas tales como la transformación de energía, reciclado de materiales orgánicos e inorgánicos, retención y purificación del agua, además de ser el principal recurso del cual las plantas y el ser humano dependen directa e indirectamente (Chen *et al.*, 2002; SEMARNAT, 2012).

En Puebla, la investigación en materia de desertificación es escasa y su divulgación es prácticamente nula. La mayor parte de los estudios afines, realizados en las regiones secas y semisecas del Estado, se han enfocado principalmente en aspectos relacionados con la degradación del suelo por procesos erosivos y cambios en la cobertura vegetal, sin incorporar en ellos una evaluación de los elementos sociales, políticos y económicos, pese a ser factores de presión para el ambiente (CONABIO, 2013; Muñoz-Iniestra, Chávez-Mosqueda, Godínez-Álvarez y Cuéllar-Arellano, 2017; García-Licon, Maldonado-Torres, Moreno-Calles, Álvarez-Sánchez, García-Chávez y Casas, 2017). Además, la excesiva división política del Estado se ha convertido en un impedimento para la instrumentación de políticas públicas integrales para el manejo del capital natural estatal. Aunado a esto, la desigualdad económica y la heterogeneidad de su estructura productiva mantiene a Puebla en una situación social donde la pobreza y sus

situaciones extremas se generalizan, lo cual se manifiesta en los municipios con condiciones altamente restrictivas desde el punto de vista ambiental, social y económico (CONABIO, 2013; CONAPO, 2010).

Para el caso de Tepanco de López, municipio marginado del sureste de Puebla, la investigación en cuanto al fenómeno de desertificación, riesgo a la erosión, vegetación, clima, hidrología, topografía y factores socioeconómicos, los estudios son nulos o en su defecto parciales, aun cuando el 16.26% (36.51 Km²) de su superficie se encuentra incluida dentro de la Reserva de la Biósfera Tehuacán – Cuicatlán, la cual es considerada una de las regiones áridas más importantes a nivel nacional debido a su gran diversidad faunística, florística, histórica y cultural, y por lo que ha sido foco de atención de múltiples investigaciones y programas de conservación en materia de ecología y biodiversidad (SEDESOL, 2015; SEMARNAT y CONANP, 2013).

Por tanto, el presente trabajo realizó un diagnóstico ambiental de los factores climáticos y antropogénicos que determinan la susceptibilidad a la desertificación de los suelos de la microcuenca evaluada, para lo cual se utilizó como unidad de estudio el concepto de microcuenca y como herramienta de análisis el uso de indicadores propios de este fenómeno (De Berríos y Briceño de Gómez, 2009). Con la finalidad de generar una línea base que permita desarrollar estrategias para la conservación del bien común suelo, que a su vez impacte en los demás componentes del sistema.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Sistemas Complejos.

La complejidad puede definirse como el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen el mundo fenoménico (Morin, 2009). De esta forma, dentro de las Ciencias Ambientales una de las principales teorías que apoyan y soportan a las investigaciones es la Teoría General de Sistemas, propuesta por Ludwin Von Bertalanffy, donde se recalca el hecho que se debe constituir un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales, al mismo tiempo que debe ser un instrumento básico para la formación y preparación de científicos (Arnold y Osorio, 1998).

Con base a lo anterior Rolando García, en su publicación “Sistemas complejos” (2006), retoma dicha Teoría de Sistemas para integrarla en su hipótesis como paradigma fundamental que permita resolver problemas de índole ambiental. De acuerdo con lo mencionado por el autor, “en el ‘mundo real’, las situaciones y los procesos no se presentan de manera que puedan ser clasificados por su correspondencia con alguna disciplina en particular. En ese sentido, se puede hablar de una realidad compleja. Por tanto, un sistema complejo es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizándolo como una totalidad organizada (sistema), en el cual los elementos no son separables y, por ende, no pueden ser estudiados aisladamente”.

En otras palabras, los sistemas complejos se caracterizan por la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada. Por consiguiente, para comprender la complejidad de un sistema, como lo es el ambiente, debe entenderse que las interacciones entre la totalidad y las partes no pueden ser analizadas fraccionando el sistema en un conjunto de áreas parciales que correspondan al dominio disciplinario de cada uno de los elementos (García, 2011). Por ende, investigar un sistema significa estudiar un ‘trozo de realidad’ que incluye los aspectos físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos que lo componen, tal es el caso de la cuenca hidrológica (García, 2006).

3.2 Cuenca Hidrológica.

Una cuenca hidrológica se entiende como toda la porción de la superficie terrestre cuyas aguas provenientes de la precipitación se vierten a un determinado curso de agua, grande o pequeño, que posteriormente puede, o no, descargarse al mar; siendo así su función hidrológica semejante al de un colector que recibe la precipitación pluvial y la convierte en escurrimientos que están definidos por el relieve (Cruz-Romero, Gaspari, Rodríguez-Vagaría, Carrillo-González y Téllez-López, 2015; Martínez-Duarte, 2006). Cabe señalar, que la cuenca puede dividirse a su vez en subcuencas y microcuencas. El área de la subcuenca está delimitada por la divisoria de las aguas del afluente, que forma parte de otra cuenca, que es la del cauce principal al que fluyen sus aguas. La microcuenca es una agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o de parte de ella (Ramakrishna, 1997).

Sin embargo no hay que olvidar que una cuenca se conforma de componentes biofísicos, como el agua y el suelo; biológicos, tales como la flora y la fauna; y antropocéntricos donde se incluye aspectos socioeconómicos, culturales, políticos, institucionales. Dichos componentes están mutuamente interrelacionados guardando cierto equilibrio entre sí, de tal forma que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna, 1997).

Por tanto la cuenca debe entenderse como un sistema natural, donde el agua es uno de los principales factores limitantes dentro de la dinámica y el desarrollo de factores físicos, biológicos, sociales y económicos en el espacio y en el tiempo (Martínez-Duarte, 2006). Es decir, una cuenca es un sistema complejo debido a que contiene una gran variedad de componentes, niveles jerárquicos y alta intensidad de interconexiones. Además es un sistema dinámico, que está interrelacionado y gobernado por procesos de retroalimentación, auto-organizado, adaptativo y dependiente de su historia (Cotler, 2007). Epistemológicamente esto se fundamenta con la teoría general de sistemas de Ludwin Von Bertalanffy, que aborda el problema de la complejidad a través de un pensamiento de totalidad, complementando a su vez el reduccionismo científico (Martínez-Duarte, 2006).

3.3 Desertificación.

De acuerdo con Darkoh (1998) la primera persona en acuñar el término “desertificación” fue el guardabosque Aubreville, quien en 1949 la describió como un proceso general de la degradación que se inicia con la deforestación, no necesariamente de las tierras secas, y termina con la conversión de las tierras en desiertos. Décadas más tarde, durante la Conferencia de 1977 de las Naciones Unidas sobre la Desertificación (UNCOD, por sus siglas en inglés), se le definió como la disminución o destrucción del potencial biológico de la tierra que conduciría en última instancia a la formación de las condiciones desérticas (Dregne y Chou, 1992). No obstante en 1992 el término fue nuevamente retomado durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (UCCED, por sus siglas en inglés), donde se llegó al consenso de que la desertificación es la degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como el resultante de la interacción entre diversos factores climáticos y antropogénicos. Definición que dos años más tarde, en 1994, fue declarada como oficial por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés) (Kassas, 1995; Becerril-Piña *et al.*, 2015).

Por tanto la desertificación se entiende como un fenómeno de degradación de los suelos en regiones donde los recursos tierra, agua y vegetación son limitados, y por consiguiente son zonas de mayor vulnerabilidad y fragilidad frente a presiones ejercidas por el propio ambiente y por la acción del hombre (López-Reyes, 2006). Aunado a esto debe puntualizarse que los principales procesos degradantes que influyen en la desertificación son: la pérdida de cubierta vegetal, la erosión hídrica, la erosión eólica, la salinización, reducción de la materia orgánica así como la acumulación de sustancias tóxicas en el suelo que son dañinas para los seres vivos (Granados-Sánchez y *et al.*, 2013; Chen, Chen, *et al.*, 2002; Drengne, 1995).

Con base a lo anterior, Granados-Sánchez y colaboradores, citando a Dregne (1983), explican que con base en el impacto económico que la degradación del suelo ha tenido sobre el rendimiento de las plantas, tanto en las tierras de cultivo y pastizales, la desertificación se clasifica en cuatro grados: ligera, donde el deterioro producido por el hombre sobre la cobertura vegetal y el suelo es poco; moderada, que permite la realización del pastoreo además de que entre el 25 y 50% de sus especies vegetales son especies clímax; severa, donde sólo del 10 al 25% de las especies clímax permanecen, esto debido al remplazo extensivo de la vegetación nativa por vegetación deseable para los humanos. Finalmente, la muy severa, que posee condiciones de

deterioro irreversibles con menos del 10% de las especies vegetales clímax (Granados-Sánchez *et al.*, 2013; Dregne y Chou, 1992). Por otro lado, con base en el índice de aridez, estas se agrupan en cuatro zonas climáticas: hiper-árida, que corresponde a los desiertos naturales extremadamente secos; árida y semiárida, ambas referentes a pastizales y tierras de cultivo de secano; y por último la subhúmeda seca siendo aquellas regiones bioproductivas (Kassas, 1995).

Por si fuera poco es importante comprender que la desertificación no sólo es una problemática ecológica de pérdida de flora, fauna, suelos con capacidad productiva y cambio climático, debido a las alteraciones en los procesos ecológicos, biogeoquímicos e hidrológicos, sino que también es un fenómeno que involucra factores de índole socioeconómico ya que provoca efectos en el desarrollo de la vida humana tales como la inestabilidad económica, resultado de la disminución de la productividad agrícola para satisfacción de las necesidades humanas, que a su vez resulta en el inicio de procesos migratorios hacia zonas urbanas dentro o fuera del país de origen y, con ello, un aumento en la marginación y la pobreza de las zonas rurales, que finalmente se ve reflejado en un deterioro en la estructura social, política y económica de un país (Becerril-Piña *et al.*, 2015; Garay-Romero y Cabero-Diéguez, 2013; Zika y Erb, 2009).

3.3.1 Antecedentes.

3.3.1.1 Marco Normativo.

En materia de desertificación, las primeras gestiones se remontan a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación realizada en Nairobi, Kenia, en el año de 1977, donde por primera vez se aprobó un Plan de Acción para la Lucha contra la Desertificación, el cual hizo un llamado a la comunidad internacional para advertir sobre los efectos de la sequía, sin embargo dicho Plan no tuvo el éxito esperado (Gobierno de España, 2016; ONU, 2014). Empero, no es hasta 1992 cuando se lleva a cabo en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, que nuevamente aborda la cuestión de la desertificación en el marco del Programa 21 (ONU, 2014). Siendo el capítulo 12 de este documento, el que explica del riesgo a la sequía y desertificación de las denominadas tierras secas; además, en él se establecen las pautas de acción para investigar, combatir y prevenir dicho fenómeno de degradación (ONU, 2016a).

Aunado a lo anterior, también se le solicitó a la Asamblea General de las Naciones Unidas la creación del Comité Intergubernamental de Negociación, el cual tuvo la responsabilidad de elaborar el instrumento jurídico vinculante con la finalidad de promover una respuesta global para combatir la desertificación (ONU, 2016b). Tal documento es conocido actualmente como la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es mitigar los efectos de la desertificación mediante la adopción de medidas eficaces en base a un enfoque integrado y acode al Programa 21 (CONANP, 2016; Gobierno de España, 2016).

Por otra parte, en México, el derecho ambiental es considerado una rama joven dentro de la disciplina jurídica. No obstante, la política mexicana ha sabido integrar los principios del derecho ambiental desde tiempos remotos (Vargas-Hernández, 2016). Ejemplo de esto es la Constitución Política de 1917, que a través de sus diversos Artículos fomentan la protección de las condiciones que hacen posible la vida (Vargas-Hernández, 2016; Brañes, 2000). Asimismo la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) es la principal normativa federal que regula los aspectos ambientales. En lo referente al suelo, esta ley aborda aspectos en cuestión del aprovechamiento sustentable, la preservación, restauración y regulación del uso de suelo, así como la prevención y control de la contaminación de dicho recurso (DOF, 2016). Además cabe señalar que el establecimiento de los estatutos pactados en la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD), se ha realizado mediante la fundación del Sistema Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (SINADES) como organismo coordinador, quien a su vez se encarga de promover la Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras, cuyas principales funciones son: establecer los lineamientos generales para la acción, así como las bases para cumplir con los compromisos nacionales ante la UNCCD y convertir dicho documento orientador en un instrumento para ser aplicado, en los términos del marco normativo nacional (SEMARNAT, 2015).

3.3.1.2 Investigación.

La desertificación de las tierras secas se ha convertido en uno de los principales objetos de estudio a nivel mundial. Históricamente los primeros estudios con respecto a la degradación de los suelos comienzan cuando, en 1972, se celebra en Estocolmo la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, como respuesta ante la creciente preocupación por la continua degradación ambiental de los recursos naturales, teniendo como

uno de sus resultados la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, por sus siglas), el cual actúa como catalizador, defensor y educador para promover el uso sensato y desarrollo sostenible del medio ambiente (CINU, 2016; De Pina-Tavares, Baptista, Ferreira, Amiotte-Suchet, Coelho, Gomes, Amoros, Amarildo Dos Reis, Furtado-Mendes, Costa, Bentub y Varela, 2015; PNUMA, 2016; Oldeman, Hakkeling y Sombroek, 1991).

Posteriormente, en 1974, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas) junto con el PNUMA llevaron a cabo una consulta con expertos sobre la degradación del suelo, quienes recomendaron realizar una evaluación global para conocer tanto el grado de degradación como el potencial del recurso suelo, todo ello en colaboración de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), la Organización Mundial Meteorológica (WMO, por sus siglas en inglés) y la Sociedad Internacional para los Sistemas de Ciencias (ISSS, por sus siglas en inglés). La evaluación se basó principalmente en la compilación de los datos existentes y la interpretación de los factores ambientales que influyen en el grado y la intensidad de la degradación del suelo, tales como el clima, vegetación, características del suelo, manejo del suelo, topografía y uso de suelo; cabe señalar que el producto de esta primera evaluación fue la creación de un mapa mundial de la Degradación del Suelo (Oldeman, *et al.*, 1991).

Durante los próximos cuatro años la FAO, la Unesco y el PNUMA desarrollarían la Evaluación Mundial de la Degradación del Suelo (GLASOD, por sus siglas en inglés), una metodología provisional cuyos resultados derivaron en una primera aproximación para identificar el grado, la gravedad, las causas y características de la degradación inducida por procesos de erosión del suelo, salinización y sodificación. No obstante, y a pesar de que años después fue ampliamente utilizada para las evaluaciones mundiales, también recibió fuertes críticas debido a su ambigüedad, sus juicios cualitativos, inconsistentes y sus suposiciones arbitrarias (Oldeman, *et al.*, 1991; Zika y Erb, 2009).

A partir de entonces varios métodos se utilizarían para evaluar el proceso de desertificación, tales como los modelos matemáticos, ecuaciones paramétricas, teledetección, observación directa y mediciones (De Pina-Tavares *et al.*, 2015). Ejemplo de ello es la publicación de Ali y Mirza (1993), donde explican cuáles son los procesos y factores que están involucrados en la desertificación de las tierras de Pakistán y cómo estos afectan al suelo y al agua. Para ello, los autores utilizaron imágenes satelitales de alta resolución junto con datos históricos con la finalidad de delimitar

cartográficamente zonas susceptibles, permitiéndoles a su vez hacer un seguimiento de los procesos de desertificación y la evolución de estrategias adecuadas para combatir esta problemática de dicho país.

Asimismo los científicos también han tratado de darle una explicación más integral al proceso de desertificación al analizar los factores antropogénicos y su relación con las variables climáticas. Jiang, Lian y Qin en 2014 hicieron una revisión exhaustiva de los impactos, las causas y las medidas de restauración de la desertificación rocosa con base en décadas de estudios en el área kárstica al suroeste de China, y las revisiones de estudios en Europa y otras partes del mundo. Su finalidad fue proporcionar información necesaria sobre este tipo de desertificación para poder combatirla además de ayudar a crear un manejo sostenible.

Sin embargo, tampoco hay que olvidar aquellas investigaciones que se han centrado en desarrollar metodologías que prevengan, detengan o gestionen el proceso de degradación de las regiones áridas, por mencionar uno de estos trabajos se encuentra el de Chang y colaboradores, quienes en el 2015 desarrollaron un método alternativo para evitar la erosión del suelo basado en la utilización de biopolímeros y cuyos resultados fueron significativamente positivos en la reducción de la erosionabilidad al mejorar la cohesión entre las partículas del suelo. Además que el tratamiento también demostró una mejora en la geminación vegetal, así como en la retención de agua contra la evaporación.

En México, las investigaciones en desertificación se han centrado en regiones al norte del país, tal es el caso de Andrade Limas, Espinoza Ramírez y Romero Díaz (2009), quienes realizaron acciones de lucha contra la desertificación para ayudar a la conservación del suelo y agua de la Cuenca Burgos. Para lograrlo evaluaron indicadores de sostenibilidad en base al análisis de las siguientes acciones de conservación: cercas vivas, bancos de proteína, introducción de especies forrajeras, estanques y abrevaderos, y sistemas de silvopastoriles. Obteniendo resultados favorables al reducir el riesgo a la erosión. Otro ejemplo es el trabajo de Manzano Camarillo en 1997, que evaluó los procesos de desertificación asociados a sobrepastoreo por caprinos en el matorral espinoso de Linares, Nuevo León. Teniendo como objetivo principal determinar los procesos de degradación causados por el pastoreo de caprinos sobre la cobertura foliar de la vegetación y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Pudiéndose detectar algunas etapas tempranas del proceso de desertificación, además de demostrar que la duplicación de la carga animal aplicada de manera intensiva y en un sólo evento de pastoreo, es para provocar

reducciones significativas de la cobertura foliar y un incremento importante en la densidad aparente del suelo.

Finalmente para el estado de Puebla, las investigaciones afines a la degradación de los suelos en zonas áridas, se reduce a estudios de suelo y vegetación. Como referencia se tiene el trabajo de Muñoz Iniestra *et.al.*, que en 2013 se plantearon el objetivo de conocer si existía relación entre el tipo de cobertura y la degradación física y biológica del suelo, en una terraza fluvial de la cuenca de Zapotitlán en el valle de Tehuacán, Puebla, México. Cuyos resultados obtenidos indicaron que la degradación física y biológica del suelo está significativamente relacionada con la cobertura o uso del terreno.

Otro caso es el de Ruiz *et al.* en 1998, que mostraron el daño ocasionado al entorno por el manejo inadecuado de los suelos, así como el avance de la erosión en áreas conservadas en la región de la Mixteca Poblana, mediante el estudio de las condiciones naturales de la región, el análisis de prospección pedológica en campo y el estudio edafológico.

3.3.2 Indicadores de Desertificación.

Un indicador se define como un parámetro o un valor derivado de parámetros, que proporciona información y una descripción del estado y la tendencia de un fenómeno (Becerril-Piña *et al.*, 2015; Rubio y Bochet, 1998). Es importante resaltar que un indicador compuesto, a menudo llamado "índice", se forma de la combinación de otros indicadores individuales, por lo cual es utilizado para entender la dinámica de un sistema en un único valor numérico (Alam, Dupras y Messier, 2016). Además, a menudo los indicadores llegan a ser parte de información sintética de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la extensión espacial y la distribución geográfica de áreas, así mismo relacionar las acciones humanas a las condiciones ambientales (Rubio y Bochet, 1998). En teoría, los indicadores sirven como base de información durante la toma de decisiones de políticas relativas a los problemas ambientales, pues a través de ellos se transmite información científica, técnica o de apreciaciones de la gente de una localidad con la finalidad de mejorar los procesos de formulación de políticas (Parada y Faúndez, s.f.).

Históricamente el desarrollo de indicadores, específicamente para evaluar la desertificación, surge ante la necesidad de obtener una metodología de referencia, que facilite la medición y

comparación de los fenómenos, además de incorporar la valoración de las dimensiones socioeconómicas en un modelo de evaluación, tornándose así en un proceso particularmente dificultoso (Abraham, Montaña y Torres, 2006).

Existen dos momentos significativos en la historia del surgimiento de los indicadores de desertificación. El primero en 1977, tras la grave sequía que había azotado al África subsahariana a inicios de esa década, con un saldo de más de 200.000 personas y millones de animales muertos por inanición, se llevó a cabo en Nairobi, Kenia, la Conferencia de Naciones Unidas sobre Desertificación, en la que por primera vez la comunidad internacional reconoce la importancia del tema y diseña un plan de acción para enfrentarlo. Es en ese marco que también por primera vez emerge la necesidad de monitorear y evaluar los procesos de desertificación y su dinámica de expansión en el planeta (Parada y Faúndez, s.f.; Abraham, *et al.*, 2006). Es así como se abre un nuevo campo de investigación científica, la de los indicadores de desertificación, que se desarrolla en paralelo a la discusión sobre las causas, las dinámicas y el “verdadero” concepto de desertificación, discusión muy abierta en los años 70’s y 80’s (Parada y Faúndez, s.f., quien cita a Krugmann, 1996).

El segundo hito importante en el desarrollo de los indicadores de desertificación es la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible celebrada en Río de Janeiro en 1992, cuyo principal producto es la Agenda 21. Tanto la Agenda como la Convención de Lucha contra la Desertificación dieron nuevas luces acerca de los procesos de recolección de información, de seguimiento y evaluación. Además se reconoce la necesidad de un desarrollo interdisciplinario e integrado de los indicadores, abarcando los aspectos físicos, biológicos, sociales y económicos (Parada y Faúndez, s.f.).

Actualmente, para la evaluación de la desertificación, existen diversas metodologías que se basan en el análisis en conjunto de indicadores ambientales, sociales y económicos. Para ello debe entenderse que los indicadores ambientales son aquellos que reflejan la evolución del estado del medio ambiente, además de que monitorean los progresos realizados en el cumplimiento de los objetivos de una política ambiental (Bosch, Büchele, y Gee, 1999); los sociales facultan para medir niveles, distribución y cambios en el bienestar social, así como identificar, describir y explicar relaciones relevantes entre distintas variables referidas al bienestar de las personas, sin dejar de lado seguimiento de los programas y proyectos en materia de desarrollo y reducción de la pobreza (Cerdeira y Vera, 2008); finalmente los económicos

proporcionan, en forma rápida y fácil, un panorama de la evolución de variables fundamentales que interactúan en la economía de un país, así como de otras externas que tienen influencia significativa en ella. Los indicadores económicos incluyen variables del sector real y del mercado laboral, variables financieras y los llamados indicadores de opinión o de sentimiento (Heath, 2012).

Un ejemplo de dichas metodologías es el enfoque de Desertificación en el Mediterráneo y el Uso del Suelo, mejor conocido como Proyecto MEDALUS, que consiste principalmente en el reconocimiento de áreas sensibles a través de enfoques de multivariados (Bakr, Weindorf, Bahnassy y El-Badawi, 2012; Salvati, Ferrara y Corona, 2015). Dicha sensibilidad de las zonas se puede definir mediante el Índice de Sensibilidad Ambiental de la Zona (ESAI, por sus siglas en inglés), que a su vez agrupa cuatro indicadores parciales: 1) índice de calidad de Clima (CQI, por sus siglas en inglés), que incluye las variables como la tasa de precipitación anual, el índice de aridez y el aspecto; 2) índice de calidad del suelo (SQI, por sus siglas en inglés), donde se engloba principalmente la textura y la profundidad del suelo, el material parental y el ángulo de la pendiente; 3) índice de calidad de vegetación (VQI, por sus siglas en inglés), cuyas variables a evaluar son el riesgo a incendios, la protección contra la erosión, la resistencia a la sequía y la cubierta vegetal; 4) índice de calidad de la gestión de las tierras (MQI, por sus siglas en inglés) que se basa en la densidad poblacional humana, el cambio en la población y la intensidad del uso de la tierra (Salvati, *et al.*, 2015).

Cabe mencionar que el MEDALUS es altamente flexible, puesto que permite actualizaciones de acuerdo a las condiciones locales y la disponibilidad de la información que se tenga (Bakr *et al.*, 2012). Y como referencia está el trabajo de Bakr y colaboradores (2012), cuyos objetivos primordiales fueron la identificación de las áreas ambientalmente más sensibles de Italia, la evaluación de los ESAIs para dos series de tiempo (1984 y 2008) para determinar los efectos de los procesos de recuperación de tierras, el ajuste de los factores MEDALUS para el 2008 y así obtener datos fiables a nivel local, y finalmente el seguimiento de cambio entre las dos series de tiempo sobre el área de estudio. Obteniendo como resultados que el 78% del área de estudio está clasificado como críticamente sensible a la desertificación, debido al impacto de la cobertura vegetal; además se ajustaron algunos parámetros de la calidad del suelo y se consideró el riesgo de la calidad del agua como nuevo indicador.

Otro instrumento de análisis que utiliza indicadores de desertificación es el Índice de Riesgo de tendencia Desertificación (DTRI, por sus siglas en inglés), que de acuerdo con Becerril-Piña *et al.* (2015) es una herramienta de bajo costo que permite evaluar y vigilar fácilmente el grado de desertificación, ya que añade la pendiente media de cada factor en una serie de tiempo, clasificando así el riesgo de desertificación de acuerdo a cuatro categorías: baja, media, alta y extrema. Este índice además se basa en el uso de imágenes Landsat y datos de población, así como los datos climatológicos, todo ello con respecto a un intervalo de tiempo (Bacerril-Piña *et al.*, 2015).

En México, como referencia del uso de indicadores se tiene la investigación de Troyo *et al.*, quien en 2014 hace un análisis de la sequía y la desertificación mediante el uso de indicadores de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California del Sur, México, donde concluye que los indicadores con integración biparamétrica constituyen una herramienta confiable para la construcción de escenarios y tendencias de cambio climático.

De igual forma se encuentra el trabajo de Etchevers Barra y colaboradores (2009), quienes realizaron tanto el análisis de indicadores edáficos (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica) como el de tres modelos generales de circulación atmosférica (MGC, por sus siglas); GFDL, ECHAM y HADLEY, para la cuenca del Río Conchos, Chihuahua, México. Con el objetivo de evaluar el estado de desertificación así como de elaborar tendencias espaciales de dicho proceso. Teniendo como conclusiones que, para su zona de estudio, existe un déficit de humedad anual como consecuencia del aumento en la temperatura, que en lo general es superior a 2°C y una disminución en la precipitación. Además la erosión hídrica en la Cuenca del Río Conchos, en general es baja, con cerca del 20% de la superficie sin afectación y un poco más del 75% con tasas de pérdida de suelo de ligera a moderada.

Finalmente para Puebla, las investigaciones publicadas en base a indicadores ambientales y socioeconómicos de desertificación son prácticamente nulas, sólo el laboratorio de Edafología, del Posgrado Iztacala de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, por sus siglas) (UNAM, s.f.), hace una referencia del trabajo de Muños Iniestra y López Galindo, cuyo título se denomina “La desertificación en la reserva de la biosfera del Valle de Tehuacán-Cuicatlan: una evaluación con indicadores biofísicos y socioeconómicos”, del cual no se presentan datos debido a que la adquisición al archivo no fue posible.

3.4 Modelación Matemática.

El estudio de los problemas del “mundo real” ha sido fuente de inspiración para que muchos matemáticos construyan nuevas teorías y modelos que expliquen y solucionen problemas de un fragmento de esa realidad (Villa-Ochoa y Ruiz-Vahos, 2009). La modelación matemática es un proceso involucrado en la obtención de un modelo matemático. Un modelo matemático de un fenómeno o situación problema es un conjunto de símbolos y relaciones matemáticas que representa, de alguna manera, el fenómeno en cuestión. Por tanto los modelos no sólo ofrecen soluciones y explicaciones particulares, sino también sirven de soporte para evaluar, diseñar e implementar aplicaciones o teorías (Salett-Biembengut y Hein, 2004; Sosa, Boucourt y Dustet, 2012).

El proceso de modelación involucra una serie de procedimientos, a saber, elección del tema; reconocimiento de la situación/problema: delimitación del problema; familiarización con el tema que va a ser modelado: referencial teórico; formulación del problema: hipótesis; formulación de un modelo matemático: desarrollo; resolución del problema a partir del modelo: aplicación; interpretación de la solución y validación del modelo: evaluación. Por tanto, la elaboración de un modelo matemático requiere, por parte del modelador, conocimientos tanto matemáticos como no matemáticos (Salett-Biembengut y Hein, 2004; Villa-Ochoa y Ruiz-Vahos, 2009).

3.4.1 Modelación Estadística.

La aplicación de la modelación estadístico-matemática a través de métodos estadísticos descriptivos e inferenciales, constituye una importante herramienta para la solución de problemas que pueden presentarse en las investigaciones en las diferentes áreas del conocimiento (Guerrero-Mantilla, Capó-Pérez y López-Padrón, 2016). Por tanto se puede asegurar que en la actualidad la Modelación Estadística cuenta con los respaldos teóricos, metodológicos y computacionales que le dan una gran viabilidad como un área de desarrollo de la Matemática Aplicada y la posibilidad de considerar modelos paramétricos y no paramétricos, estos últimos de gran importancia para las Ciencias Sociales, Humanas y de la Educación (Guerra-Bustillo, Herrera-Villafranca, Vázquez-Alfonso y Quintero-Bueno, 2014; Guerrero-Mantilla, Capó-Pérez y López-Padrón, 2016).

3.4.2 *Lógica Difusa.*

La lógica es un conjunto de reglas usadas para generar inferencias creíbles. Esta se basa en el modelo aristotélico del razonamiento exacto, es decir, una lógica binaria que admite solo dos posibilidades: verdadero-falso o bien ceros y unos. No obstante, el mundo real opera de diferente forma, pues la información que se obtiene de él es incierta e imprecisa, creándose así una fuente de incertidumbre que se deriva de tres áreas: 1) las deficiencias de la información; 2) la característica no determinista del mundo real; 3) las deficiencias de los modelos que intentan explicar la realidad (D'Negri y De Vito, 2006). Sin embargo, y en contraparte a este tipo de lógica dicotómica se han desarrollado diversas lógicas multivariadas con valores de verdad intermedios o de pertenencia gradual que ayudan a reducir dicha incertidumbre (D'Negri y De Vito, 2006; Medina-Hurtado y Paniagua-Gómez, 2007). Ejemplo de ello es la lógica difusa, una metodología que proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta (D'Negri y De Vito, 2006).

El origen de la lógica difusa se encuentra en los análisis de la vaguedad y su relación con la lógica clásica que se realizaron a comienzos del siglo XX. Siendo Lofti A. Zaded quien propuso la "Teoría de la Posibilidad" como una forma de calcular la incertidumbre y de procesar la información de los denominados conjuntos difusos a partir de la idea de pertenencia parcial (D'Negri y De Vito, 2006; Medina-Hurtado y Paniagua-Gómez, 2007). Es decir, expresar en términos matemáticos los procesos lógicos y del razonamiento aproximado que es el utilizado por el hombre en la vida cotidiana (Medina-Hurtado y Paniagua-Gómez, 2007). Cabe señalar que en un conjunto difuso la frontera no está precisamente definida y el grado de pertenencia se encuentra entre el 0 y el 1, por lo cual este último concepto reemplaza la dualidad ya que es subjetivo y dependiente del dominio (D'Negri y De Vito, 2006). De esta forma, la matemática difusa constituye un buen modelo para la toma de decisiones ya que brinda la capacidad de extraer datos de forma práctica, y a través de las capacidades analíticas y la experiencia de los evaluadores, descubrir relaciones significativas entre ellos (Brunet-Cortina y Robaina, 2010; Peñalva-Rosales, 2000). Además los modelos de lógica difusa son altamente flexibles, más tolerantes a la imprecisión de los datos y pueden trabajar con funciones no lineales de diversa complejidad, así mismo no están obligados por presunciones estadísticas acerca de las características de los datos y sus distribuciones de probabilidad y se les puede modificar fácilmente dependiendo de la solución requerida del problema (Medina-Hurtado y Paniagua-Gómez, 2007).

IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La desertificación como fenómeno complejo y multicausal entre factores ambientales y antropogénicos ha impactado en diversos aspectos de la vida humana y natural, convirtiéndose así en una de las problemáticas más importantes a nivel mundial. Por tanto su estudio debe abordarse desde un enfoque sistémico, que involucre componentes científicos, sociales, económicos y políticos, así como una delimitación espacial y temporal del territorio. Todo ello con la finalidad de conocer las causas y condiciones actuales que se encuentran involucradas en la evolución del proceso de desertificación, y que a su vez, dicha caracterización, permita el desarrollo de diferentes metodologías que puedan dar explicación y solución a este fenómeno de degradación (Becerril-Piña *et al.*, 2015).

Por lo que, en base a lo anterior, se presenta el planteamiento del problema de investigación para la zona de estudio bajo el cuestionamiento:

¿Cuál es el grado de desertificación que presenta la Microcuenca Cacaloapan al realizar el análisis de factores naturales y antropogénicos y, cuáles son las características ambientales que aumentan la susceptibilidad a sufrirla?

V. HIPÓTESIS

La interrelación entre las actividades antropogénicas y los factores naturales de la región, alteran de manera significativa la dinámica ambiental de la Microcuenca Cacaloapan, lo cual queda manifestado en el grado de desertificación que presenta la zona de estudio.

VI. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General.

Evaluar el estado de desertificación en el que se encuentra la Microcuenca Cacaloapan perteneciente al municipio de Tepanco de López, Puebla mediante el análisis de indicadores ambientales y socioeconómicos.

6.2 Objetivos Particulares.

- Evaluar el grado de desertificación mediante el empleo de indicadores ambientales y socioeconómicos que permitan determinar estado actual del área de estudio.
- Generar mapas de la variación espacial y temporal, mediante el uso de Sistemas de Información Geografía (Quantum GIS 2.14.10, ArcGis 10.5).
- Generar un modelo de la dinámica ecosistémica dentro de la microcuenca.

VII. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

7.1 Localización.

La Microcuenca Cacaloapan se encuentra ubicada dentro del Municipio de Tepanco de López que a su vez se localiza al sureste del Estado de Puebla, a una altitud entre los 1,700-2,600 msnm y abarca una superficie aproximada de 224.6Km² (CEIGEP, 2016). Y está situada al Noroeste del Municipio, entre las coordenadas 97°34'-97°38' longitud Oeste y 18°31'-18°35' latitud Norte, adyacente a la comunidad de Tepanco de López, la cual rige como Cabecera Municipal (Figura 1).

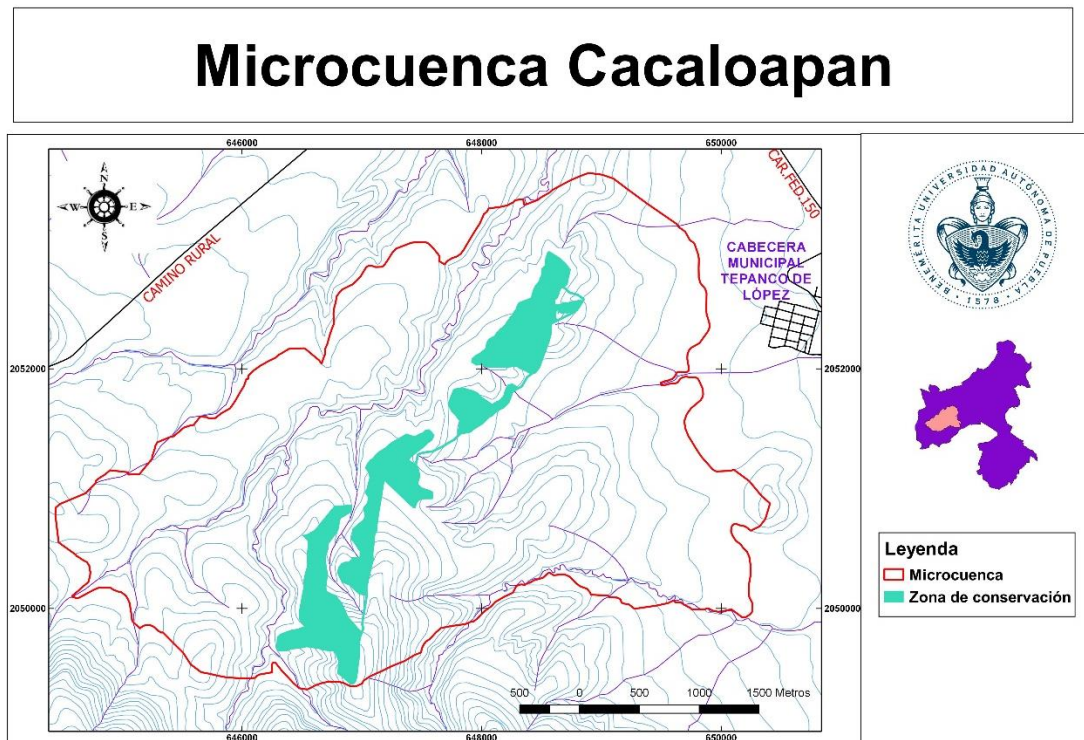


Figura 1. Localización de la Microcuenca Cacaloapan.

Fuente: INEGI 2015d.

Elaborado por: Ramírez-García, A.

Para la realización del procesamiento de la información, el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA, por sus siglas), perteneciente al Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla (ICUAP, por sus siglas), fue la institución responsable de prestar sus instalaciones durante el desarrollo de esta investigación.

7.1 1 Aspectos Generales de la Zona de Estudio.

7.1.1.1 Región VII. Tehuacán y Sierra Negra.

El Estado de Puebla encuentra dividido en siete regiones socioeconómicas, siendo estas: a) Región I Sierra Norte; b) Región II Sierra Nororiental; c) Región III Ciudad Serdán; d) Región IV Angelópolis; e) Región V Atlixco-Matamoros; f) Región VI Mixteca; y g) Región VII Tehuacán y Sierra Negra (Figura 2) (Gobierno del Estado de Puebla, s.f.). Esta última se encuentra localizada al sureste del Estado, limita al norte con la Región 3, al este con Veracruz, al sur con Oaxaca y al oeste con la Región mixteca. Se conforma de 21 Municipios, entre ellos Tepanco de López, y presenta gran variedad de climas que van desde los templados hasta los cálidos (INAFED, 2016). Además constituye una de las regiones naturales más importantes del Estado por sus recursos endémicos pertenecientes a la Reserva de la Biósfera Tehuacán- Cuicatlán (Gobierno del Estado de Puebla, s.f.).



Figura 2. Regiones socioeconómicas del Estado de Puebla.
Fuente: INAFED, 2016

Demográficamente, la región Tehuacán y Sierra Negra cuenta con 722 localidades, de las cuales 691 son rurales con una población de 187,089 habitantes, es decir, el 29% de la población total de la región (644,736 individuos). Las restantes 31 localidades son urbanas y en conjunto tienen 457,647 habitantes, el 71% del total poblacional (Gobierno del Estado de Puebla, s.f.; Gobierno del Estado de Puebla, 2014).

En base a los grados de rezago social -alto, medio y bajo-, propuestos por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), en la región de Tehuacán existen 273 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) urbanas con 463,436 habitantes, de las cuales 82 presentan rezago social Bajo con una población 218,727 personas; 131 grado intermedio y 216,667 habitantes; y por último 60 rezago social grado alto. Asimismo, con respecto a la situación de pobreza, se estima que 447,397 habitantes se encuentran en esa condición, de los cuales 312,979 presentan pobreza moderada y 134,421 pobreza extrema. Por lo que respecta a vulnerabilidad social, 122,472 personas presentan algún tipo de vulnerabilidad, además de que la región presenta los mayores porcentajes de población con carencias, principalmente en acceso a la seguridad social (Gobierno del Estado de Puebla, s.f.).

Por otra parte, el índice de desarrollo (IDH), que mide el avance en el grado de bienestar de la población en una escala que va de 0 a 1, donde 1 corresponde al máximo logro posible y 0 significa que no hay avance alguno, la región de Tehuacán y Sierra Negra tiene un índice de 0.6520, lo que la ubica en el lugar número tres entre las siete regiones estatales (Gobierno del Estado de Puebla, s.f.).

Cabe destacar que en la Región Tehuacán - Sierra Negra reside el 11.06% de la Población Económicamente Activa estatal; genera el 7.72% del valor de la producción agrícola y el 41.65% de la producción pecuaria y aunque el Valor Agregado Censal Bruto de sus manufacturas es de sólo el 4.59% del Estado, representa 15.25% de la industria alimentaria, 22.59% de la de bebidas y tabaco, y 27.87% de la fabricación de prendas de vestir (Gobierno del Estado de Puebla, 2014).

7.1.1.2 Fisiografía.

La Microcuenca, denominada Cacaloapan, corresponde en su totalidad a la Provincia Fisiográfica XII, también denominada Sierra Madre del Sur (Figura 3). Esta región limita al norte con la provincia del Eje Neovolcánico, al este con las provincias Llanura Costera del Golfo Sur y Cordillera Centroamericana, finalmente al sur y oeste con el Océano Pacífico. Se extiende a lo largo y muy cerca de la costa del Pacífico con una dirección general de noreste a sureste. Su altitud es de poco más de 2,000 msnm. Presenta varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico, en su vertiente interior se localizan las cuencas del río Balsas, Verde y Tehuantepec.

Esta provincia es de las de mayor complejidad geológica, el levantamiento de esta sierra así como muchas de sus características particulares se deben al choque de las placas tectónicas de Cocos y la placa Norteamericana. Litológicamente se pueden encontrar rocas intrusivas cristalinas, sedimentarias y metamórficas, siendo estas últimas las de mayor abundancia (INEGI, 1999).

A su vez, en el área de estudio se encuentran representadas dos subprovincias conocidas como Sur de Puebla y Sierras Centrales de Oaxaca. Esta última que se extiende desde el sureste de Xochitlán, Puebla, hasta la sierra localizada al oeste de la ciudad de Oaxaca. Para el estado de Puebla, esta región abarca el 4.54% de su superficie, colindando con la subprovincia Sur de Puebla al norte, al oeste y este; al sur con la Mixteca Alta; y al sureste con las Sierras Orientales. Esta zona comprende los municipios de Molcaxac, Xochitlán Todos Santos, Juan N. Méndez, Ixcaquixtla, Tlacotepec de Benito Juárez, Tepanco de López, Tehuacán, Coyotepec, Atexcal, Zapotitlán, San Gabriel Chilac, Caltepec, San José Miahuatlán y Coxcatlán. En ella domina el sistema de topomorfias sierra de cumbres tendidas, con pendientes moderadas y altitudes máximas superiores a los 2,500 msnm. Esta sierra está constituida por rocas sedimentarias (calizas del Cretácico) y volcánicas básicas (INEGI, 1999).

Por otra parte la subprovincia Sur de Puebla, se localiza casi totalmente dentro del estado de Puebla. Abarca los municipios de Chigmecatitlán, La Magdalena Tlatlauquitepec, San Juan Atzompa, Altepexi y Zinacatepec; además, comprende parcialmente a otros, entre ellos Molcaxac, Tepanco de López, Santa Inés Ahuatempan, Tecamachalco y Tochtepec. Limita con las subprovincias: Lagos y Volcanes de Anáhuac en el norte, Sierras Orientales en el este, Sierras Orientales y Mixteca Alta en el sur, Cordillera Costera del Sur y Sierras y Valles Guerrerenses en el occidente. Se caracteriza por ser una región de litología diversa, con rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, dentro de estas últimas se incluyen depósitos de caliche y travertino. Los sistemas de topofomas que dominan son los de llanura sin fase limitante o con piso rocoso y los lomeríos (INEGI, 1999).

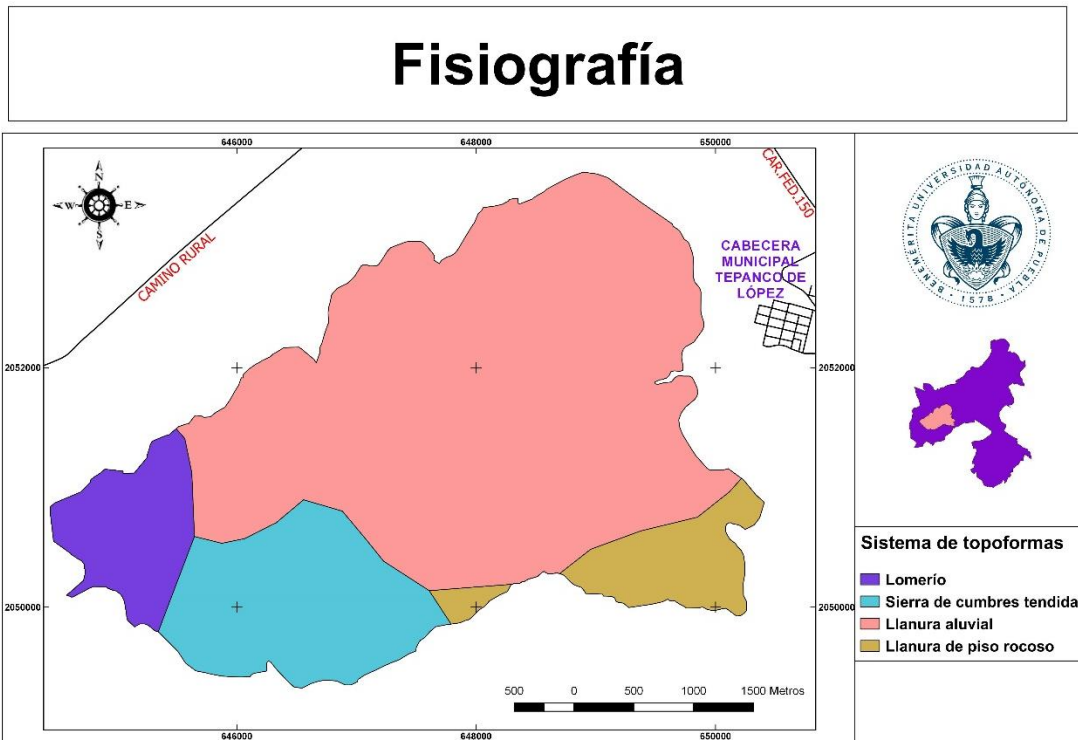


Figura 3. Sistema de topoformas de la Microcuenca.

Fuente: INEGI 1999.

Editado por: Ramírez-García, A.

7.1.1.3 Hidrología.

Hidrologicamente, la Microcuenca Cacaloapan se sitúa dentro de la subcuenca del Río Salado, que constituye el afluente principal de la cuenca del Papaloapan en la porción poblana, el cual pertenece a su vez a la región hidrológica RH-28. Cabe resaltar que dentro del Estado, el Río Papaloapan ocupa las zonas de Quimixtlán, Chichiquila, la sierra Mazateca y la cañada Poblana-Oaxaqueña (INEGI, 1999). Con respecto a hidrología subterránea, el área de estudio pertenece al acuífero denominado Valle de Tehuacán, que limita al norte con el acuífero Valle de Tecamachalco, al noreste y este con el acuífero Tuxtepec, al sur con el acuífero Cuicatlán, al sureste con el acuífero Huajuapán de León y al oeste con el acuífero Ixcaquixtla (CONAGUA, 2013).

Finalmente, la parte del acuífero que se encuentra en la zona de estudio está formado, en su parte superior, por depósitos aluviales con espesor que varía desde pocos metros hasta 50 m. La parte inferior está compuesta por clastos calcáreos, yesos y conglomerados, con espesor de 100 a 200 m. De esta forma la microcuenca de estudio se caracteriza por presentar una

permeabilidad media en material consolidado o roca coherente (M) y alta en material no consolidado (a) (Figura 4) (INEGI, 1999). Además, se encuentra una zona de explotación en equilibrio, con una recarga media anual de 246.9 millones de metros cúbicos (Mm³), una disponibilidad media anual de 35.62 Mm³, un volumen de extracción anual de 204.5 Mm³ y según CONAGUA (2013), aparentemente sin problemas de déficit (DOF, 2015).

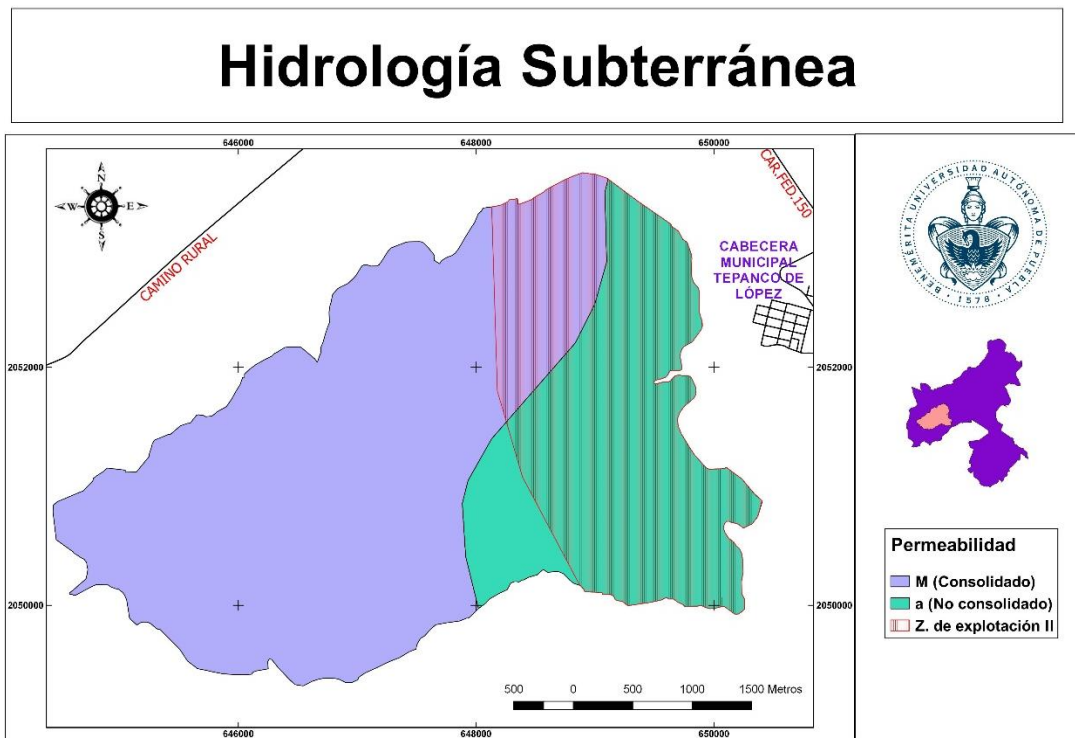


Figura 4. Hidrología subterránea de la Microcuenca.
 Fuente: INEGI 1999.
 Editado por: Ramírez-García, A.

7.1.1.4 Geología.

La naturaleza geológica del estado de Puebla es variada y compleja, especialmente en la porción Sur, donde se encuentran terrenos metamórficos con edades del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, los cuales se hallan yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de fallas (INEGI, 1999).

La cronoestratigrafía para la zona de estudio está representada por el Cretácico Inferior (Ki) referente a la era Mesozoica y el Cuaternario (Q) para el Cenozoico, ambas con litología de rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias. No obstante en el primer periodo, que se encuentra en

la región sur de la microcuenca, predominan las calizas, Ki(cz), mientras que para el segundo periodo, correspondiente al Cuaternario, se encuentra predominando al norte caliche Q(ch) y al este una unidad aluvial Q(al) en su parte este (Figura 5)(INEGI, 1999).

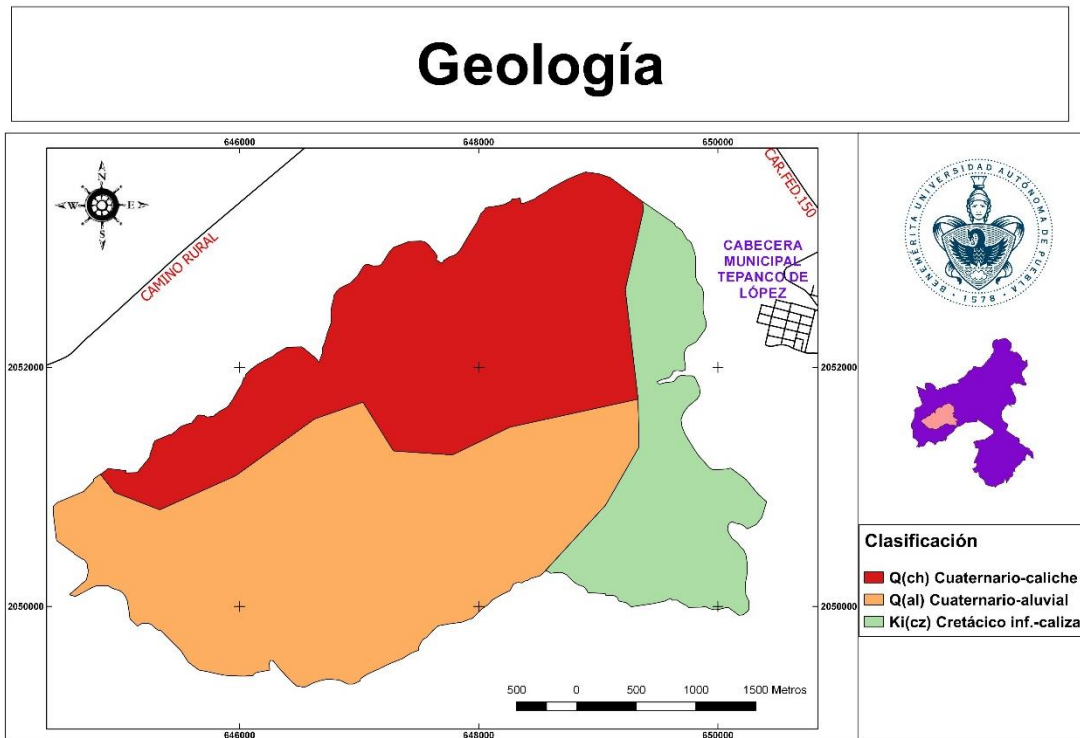


Figura 5. Geología de la Microcuenca.
Fuente: INEGI 1999.
Editado por: Ramírez-García, A.

Cabe señalar que las rocas calizas se caracterizan por formar sierras altas y alargadas de una orientación general nornoroeste-sursureste. La secuencia rocosa está integrada por sedimentos carbonatados marinos, formados como depósitos de borde de plataforma y talud (INEGI, 1999).

Por otra parte el caliche consiste en una costra blanco amarillenta de 1.5 m de espesor aproximadamente, con un promedio de regolita de 50 cm; la cual contiene clastos de caliza y fragmentos de conchas de gasterópodos. Este material, es el resultado de la acción capilar y de la evaporación de aguas ricas en óxido de calcio sobre un sustrato calcáreo antiguo. Descansa sobre calizas y lutitas del Cretácico Superior (INEGI, 1999).

Así mismo los depósitos aluviales cuaternarios son aquellos que rellenan valles fluviales y conforman planicies, con espesores que pueden variar desde decenas de centímetros, hasta 200

o 300 m. Estos depósitos están constituidos por partículas del tamaño de arcilla, limo, arena y grava, que van de angulosos a bien redondeados. El origen de los clastos es variado, y comprende fragmentos de cuarzo, feldespatos, micas, arcillas y fragmentos de las rocas circundantes (INEGI, 1999).

7.1.1.5 Suelo.

Los suelos que predominan en la Micocuenca Cacaloapan son los Leptosoles seguido de los Vertisoles. Dentro del primer grupo encontramos el Leptosol rendzico (Lprz) y el Leptosol calcárico-lithico (LPcali), mientras que en el grupo de los vertisoles encontramos representado el Vertisol calcárico-humico (VRcahu) y el Vertisol pelico-petrocalcico (VRpepc) (Figura 6) (WRB, 2014; INEGI, 2014).

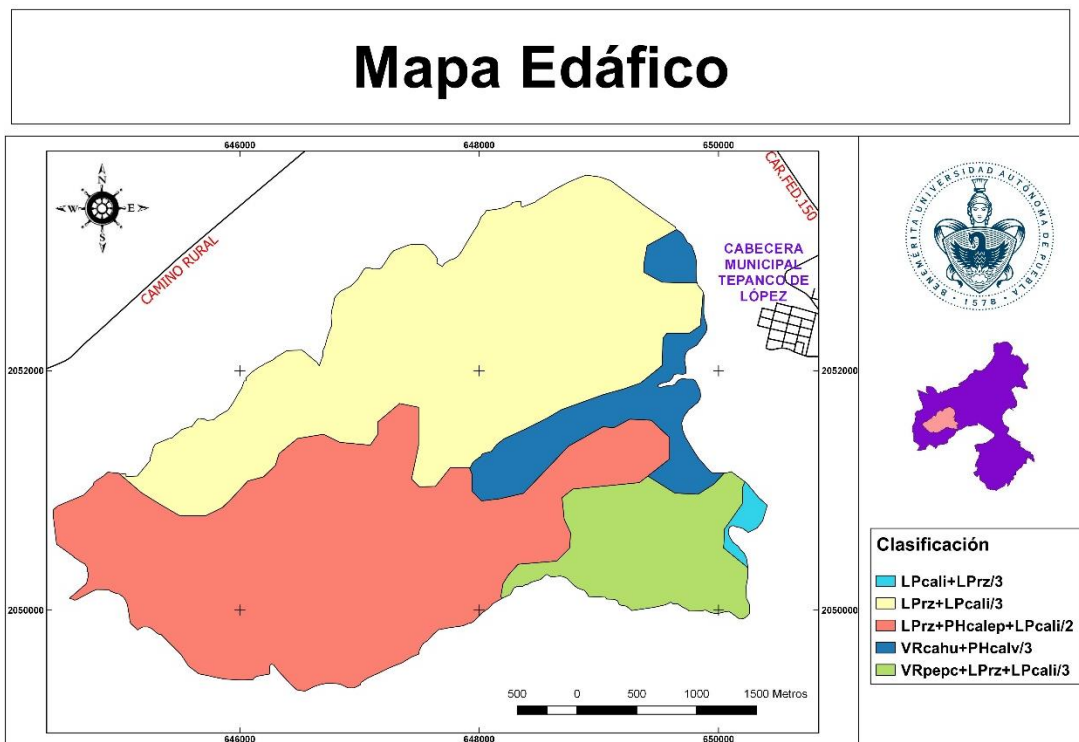


Figura 6. Mapa de suelos de la Micocuenca.
Fuente: INEGI 1999.
Editado por: Ramírez-García, A.

La palabra Leptosol (LP) proviene del griego Leptos, que significa delgado. Estos suelos se caracterizan por ser poco profundos o extremadamente pedregosos; el material parental es roca

continua o materiales no consolidados con menos del 20%, en volumen, de tierra fina; en material calcáreo meteorizado pueden tener un horizonte móllico. Se desarrollan principalmente en terrenos de elevada o mediana altitud y con una fuerte pendiente topográfica. Los Leptosoles se encuentran distribuidos desde los trópicos hasta las regiones polares, particularmente en las zonas cálido-secas, montañosas y en áreas intensamente erosionadas. Los Leptosoles son un recurso potencial para el pastoreo en temporada húmeda y como terrenos forestales, sin embargo la erosión es la mayor amenaza que sufren estos suelos, además, el drenaje interno y la poca profundidad de muchos Leptosoles puede causar sequía, incluso en ambientes húmedos (WRB, 2014).

Los Vertisoles (VR) son suelos de arcillas pesadas con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman profundas y anchas grietas, desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo cual sucede en la mayoría de los años. La mayoría de los Vertisoles se encuentran distribuidos en los trópicos semiáridos con promedio anual de precipitación de 500-1000 mm, aunque también se encuentran en los trópicos húmedos. Se localizan a menudo en las posiciones más bajas del paisaje, como en el fondo de lagos secos, cuencas hidrográficas, terrazas inferiores de ríos y otras tierras bajas que están periódicamente húmedas en su estado natural. Estos suelos tienen gran potencial agrícola, no obstante sus características físicas y el régimen de humedad del suelo representan serias limitaciones para su manejo. La textura del suelo es pesada y el predominio de minerales de arcillas expandibles dan lugar a un estrecho rango de humedad del suelo entre estrés de humedad y exceso de agua. Por tanto la labranza se ve obstaculizada por la adhesividad cuando el suelo está mojado y dureza cuando está seco (WRB, 2014).

De acuerdo a la World Reference Base (WRB, por sus siglas en inglés) (2014), el calificador Rendzico (rz) hace referencia a un horizonte móllico que contiene o yace directamente sobre material calcárico con $\geq 40\%$ de carbonato de calcio equivalente. Así mismo el calificador Calcárico (ca) se utiliza para describir suelos con material calcárico en todo su espesor entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo, o entre 20 cm y roca continua. El calificador Lithico (li), en suelos Leptosoles, hace mención a tener roca continua o material duro técnico que comienza a menos de 10 cm de la superficie del suelo.

El calificador Húmico (hu) se utiliza para suelos con más del 1% de carbono orgánico en la fracción de tierra fina, hasta una profundidad de 50 cm de la superficie del suelo mineral. El

calificador Pelico (pe) se utiliza para suelos que tienen en los primeros 30 cm de espesor, y en base a la clasificación de la tabla Munsell, un color con brillo menor o igual a 3 y un croma menor o igual a 2, ambos en húmedo, cabe decir que este calificador es particular de los Vertisoles. Finalmente el calificador Petrocálcico (pc) corresponde a suelos que tienen un horizonte petrocálcico, es decir, un horizonte cálcico, continuo, cementado o endurecido por carbonato cálcico y en algunas partes por algo de carbonato magnésico (WRB, 2014).

7.1.1.6 Vegetación.

El Estado de Puebla está influenciado por varios factores geográficos, como son la orografía y la altitud, así como por el clima, que en gran medida han condicionado el establecimiento de cada uno de los tipos de vegetación. En la parte centro-sur del Estado existen climas secos y semisecos, debido primordialmente a la conformación y ubicación de la Sierra Madre Oriental, del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, que en conjunto constituyen un obstáculo para las masas de aire cargado de humedad, por tanto es común que en estas regiones se establezcan comunidades cuya composición florística es capaz de soportar precipitaciones escasas, tal es el caso de la selva baja caducifolia, los matorrales xerófilos y el mezquital. Cabe señalar que dentro de los matorrales xerófilos se incluyen los denominados crasicaules y desértico rosetófilo (INEGI, 1999).

La Microcuenca de estudio presenta de manera general comunidades vegetales compuestas por matorral xerófilo, con los tipos matorral crasicaule (MCC) y matorral desértico rosetófilo (MDR) (Figura 7). Es importante destacar que el matorral crasicaule es uno de los de mayor distribución en el Estado, después de la selva baja caducifolia. Habitualmente el matorral crasicaule se presenta en las laderas occidentales de la Sierra Madre del Sur, con altitudes que van de 1 000 a 1 900 m. Abarca la franja de climas semiáridos, su temperatura media va de 18 a 24°C y precipitaciones de 400 a menos de 800 mm anuales. Se presenta sobre laderas conformadas por rocas ígneas, con suelos bajos en contenido de materia orgánica, pedregosos, limitados en profundidad por fases petrocálcicas. Las especies que caracterizan este matorral presentan tallos suculentos, con o sin hojas y presencia de espinas; esta morfología les permite resistir altas temperaturas y bajas concentraciones de humedad. Algunas de las especies características de este tipo de matorral son: *Neobuxbaumia spp.* (tetetza), *Cephalocereus spp.*, *Bursera spp.* y *Pachycereus ssp.* las cuales dan al matorral una fisonomía muy particular (INEGI, 1999).

El matorral desértico rosetófilo se distribuye en pequeñas extensiones sobre lomeríos en la cuenca de Oriental, así como en las laderas orientales y occidentales de la Sierra Madre del Sur a más de 2 400 msnm. Es una agrupación vegetal donde predominan las plantas con hojas largas, en algunos casos carnosas, espinosas y cuya disposición es en forma de roseta con tallos reducidos. La franja climática en donde se encuentra va de los secos muy cálidos a los semisecos semicálidos con lluvias en verano, con temperaturas anuales de 20 a 24°C, donde la precipitación anual promedio va de menos de 500 a 600 mm, con presencia de canícula. Se desarrolla sobre suelos claros, pobres en materia orgánica, poco profundos y pedregosos, originados a partir de rocas sedimentarias como calizas y lutitas (INEGI, 1999).

Este tipo de vegetación ha sufrido, en algunos lugares, fuertes alteraciones debido al pastoreo desordenado, principalmente de ganado caprino, lo que ha provocado que el estrato inferior presente un marcado deterioro y reducción en la cobertura del suelo, lo que ocasiona pérdidas de suelo. La agricultura, que en general es difícil desarrollarse con éxito en estos lugares debido a la escasa precipitación, ha desplazado en algunas zonas la vegetación original, sobre todo en áreas incorporadas con riego. En estas agrupaciones vegetales existe además un intenso saqueo de especies aprovechables (INEGI, 1999).

El pastizal inducido (PI) se localiza al norte de la Microcuenca. Esta vegetación surge cuando es substituida la vegetación original, debido sobre todo a las actividades humanas. Este pastizal puede aparecer como consecuencia de desmontes en cualquier tipo de vegetación, lo que a su vez dificulta el establecimiento de un patrón ecológico que lo caractericé; también puede ocupar terrenos agrícolas en abandono o bien, como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Se distribuye de manera dispersa en muy distintos lugares del estado, pero destaca su presencia sobre todo en la parte centro y sur, bajo condiciones variables (INEGI, 1999).

Asimismo la agricultura de temporal (CT) se ubica al este del área de estudio, siendo los principales cultivos maíz y frijol. Cabe destacar que esta práctica agrícola se caracteriza por aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y la capacidad del suelo para retener el agua. Las regiones para ser clasificadas como de temporal deberán permanecer sembradas al menos en un 80% del ciclo agrícola (INEGI, 1999).

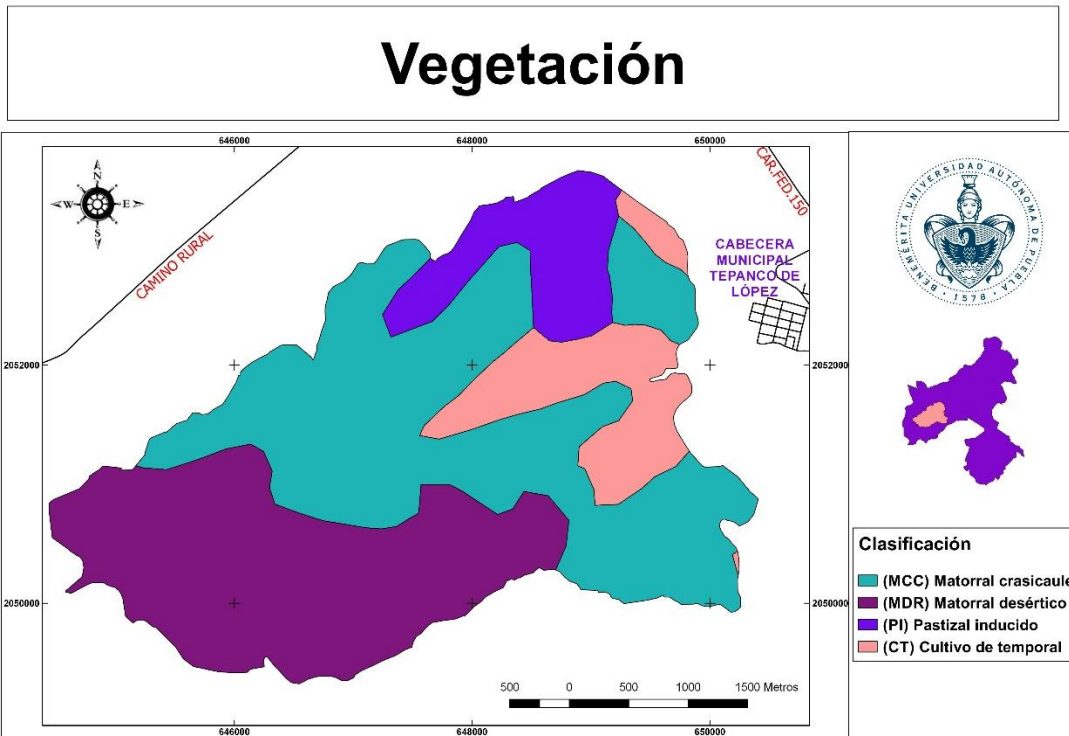


Figura 7. Comunidades vegetales de la Microcuenca.
 Fuente: INEGI 1999.
 Editado por: Ramírez-García, A.

7.1.1.7 Uso Potencial Agrícola, Forestal y Pecuario.

En casi la mitad del territorio estatal pueden ser efectuadas actividades agrícolas de diferente índole, desde las más tecnificadas hasta las que sólo pueden utilizar herramientas manuales. Sin embargo las condiciones ambientales son en gran medida los que limitan las actividades agrícolas, con diferente intensidad, tanto en los aspectos técnicos como biológicos. Entre los principales factores limitantes se encuentra la topografía, la profundidad efectiva del suelo, la obstrucción superficial, el drenaje interno, la erosión, la salinidad y sodicidad, así como la disponibilidad de humedad (INEGI, 1999).

De esta forma, y de acuerdo con la información cartográfica, la zona de estudio se considera no apta para la agricultura, debido principalmente a las características ambientales que la constituyen (Figura 8).

Uso Potencial Agrícola

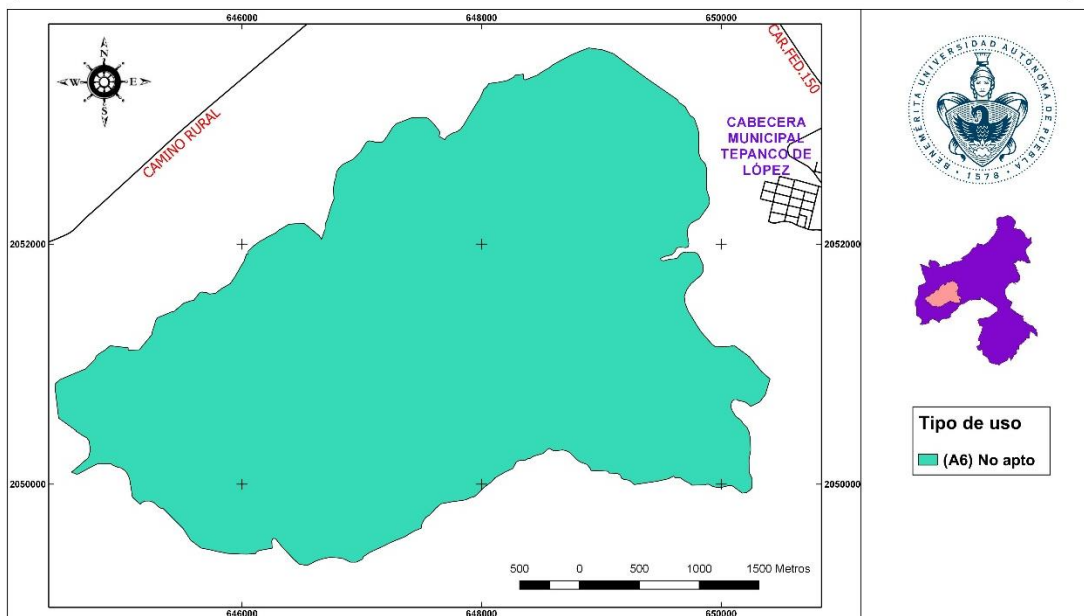


Figura 8. Uso agrícola en la Microcuenca.

Fuente: INEGI 1999.

Editado por: Ramírez-García, A.

Aunque por otra parte es importante destacar que la Microcuenca Cacaloapan presenta principalmente un uso potencial forestal maderable con orientación doméstica (F2.2), donde parte de su sección central tiene un nivel de aptitud de la tierra medio, mientras que la región oeste cuenta con un nivel bajo (Figura 9). Esto debido principalmente a que la vegetación natural ha sido alterada o se trata de comunidades consideradas como secundarias. También se encuentra una región no apta para la utilización forestal (F4), no obstante en ella hay extracción de productos forestales (INEGI, 1999).

Cabe mencionar que para la región de interés, el principal uso pecuario es el pastoreo sobre otros agostaderos con un bajo desarrollo de especies forrajeras, así como baja movilidad del ganado en el área de pastoreo y un nivel de aptitud bajo de vegetación aprovechable (P3 (3033)). No obstante también se encuentra una zona de pastoreo para ganado caprino con movilidad media en el área de pastoreo y donde las características de la vegetación aprovechable son bajas (P4 (0023)) (Figura 10) (INEGI, 1999).

El pastoreo sobre otros agostaderos se refiere a terrenos que poseen condiciones ambientales que los imposibilitan para el establecimiento de praderas cultivadas y presentan vegetación diferente del pastizal, en ellos únicamente es posible realizar un pastoreo de carácter extensivo. Es decir, se trata de lugares aún accesibles a los bovinos como las partes menos accidentadas de las sierras, lomeríos y mesetas, donde generalmente se presentan suelos delgados y pedregosos, con pendientes menores de 40%. Soportan baja capacidad de carga animal debido a que la vegetación susceptible de ser aprovechada por el ganado está constituida por selvas bajas o matorrales (INEGI, 1999).

Asimismo, en el pastoreo de ganado caprino las regiones se caracterizan por ser cerriles con ciertos procesos erosivos donde las comunidades vegetales muestran baja cobertura y condición, por lo que es común que el ganado se desplace grandes extensiones para alimentarse.

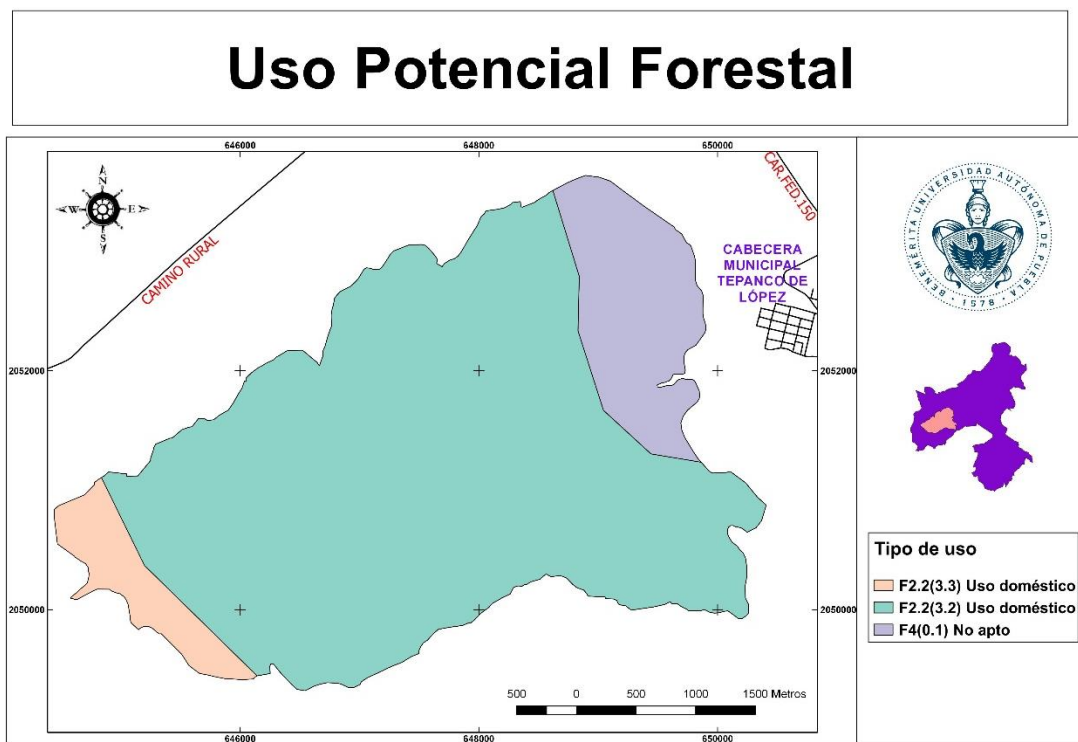


Figura 9. Uso forestal en la Microcuenca.

Fuente: INEGI 1999.

Editado por: Ramírez-García, A.

Uso Potencial Ganadero

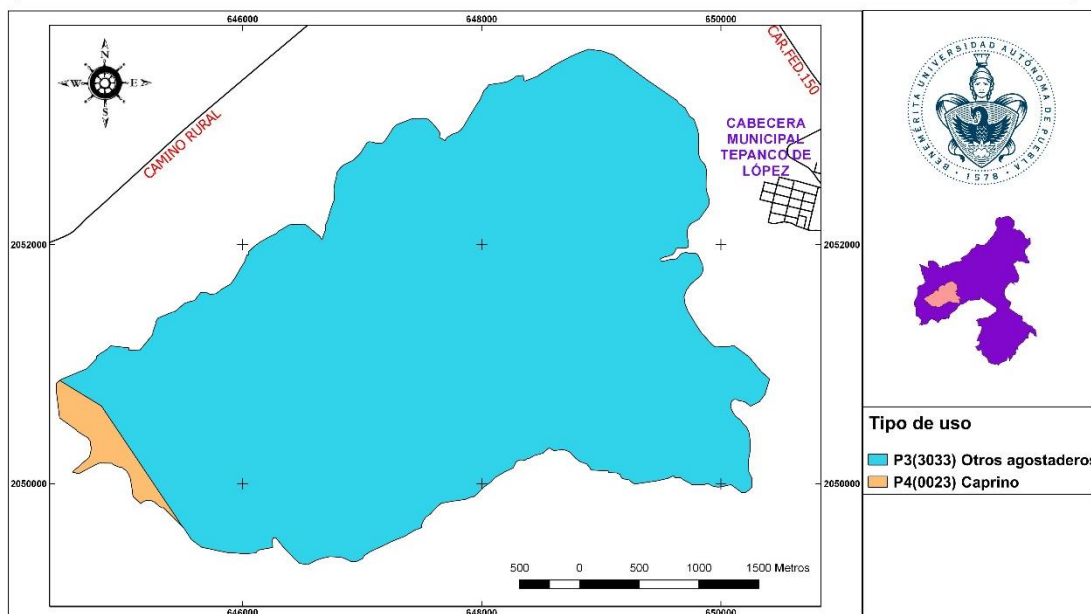


Figura 10. Uso ganadero en la Microcuenca.

Fuente: INEGI 1999.

Editado por: Ramírez-García, A.

7.1.1.8 Clima, Precipitación total anual y Temperatura media anual.

En base a cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1999), el área de estudio presenta clima templado subhúmedo con precipitaciones en verano (Cw), y un porcentaje de precipitación invernal menor del 5% (Figura 11). De manera más específica en la Microcuenca se encuentra representado el subtipo templado subhúmedo C(w0)(w), que se caracteriza por ser el clima más seco de los subhúmedos con un cociente precipitación-temperatura (P/T) menor a 43.2 (INEGI, 1999). Asimismo, la precipitación total anual para dicho tipo de clima se encuentra entre los 500-700 mm (Figura 12). Mientras que la media de temperatura anual está dada entre los 14-18 °C (Figura 13) (INEGI, 1999).

Clima

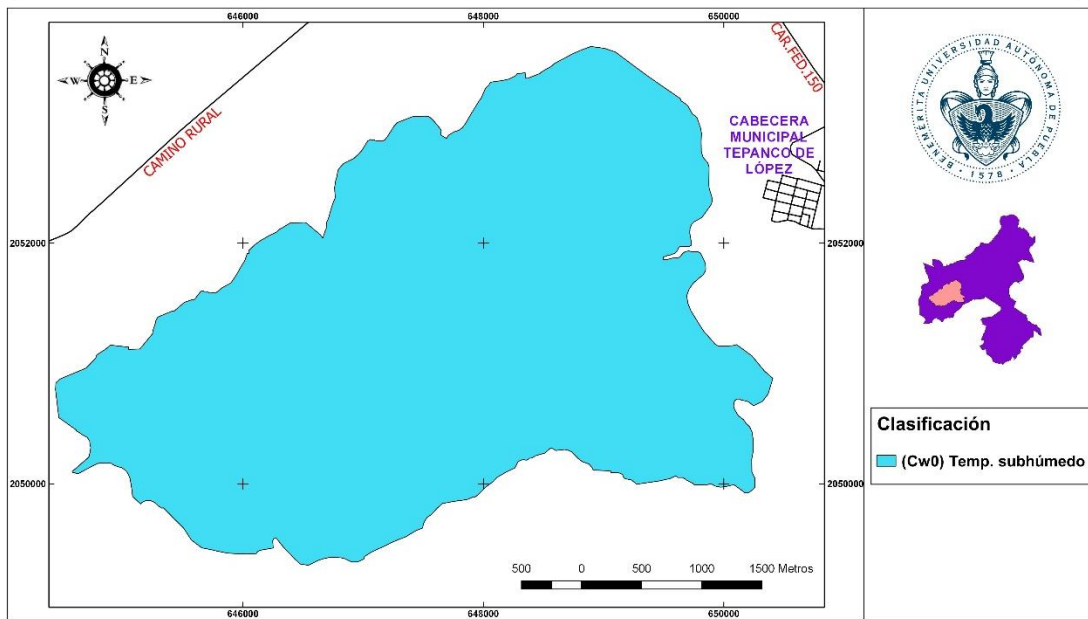


Figura 11. Clima de la Microcuenca.
Fuente: INEGI 1999.
Editado por: Ramírez-García, A.

Precipitación Total Anual

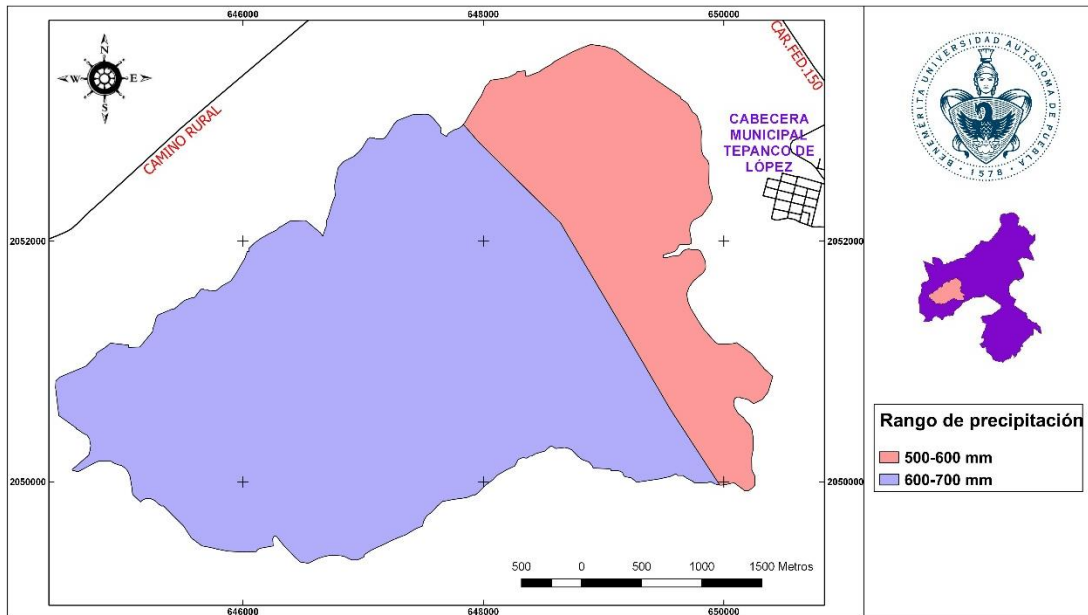


Figura 12. Precipitación total anual de la Microcuenca.
Fuente: INEGI 1999.
Editado por: Ramírez-García, A.

Temperatura Media Anual

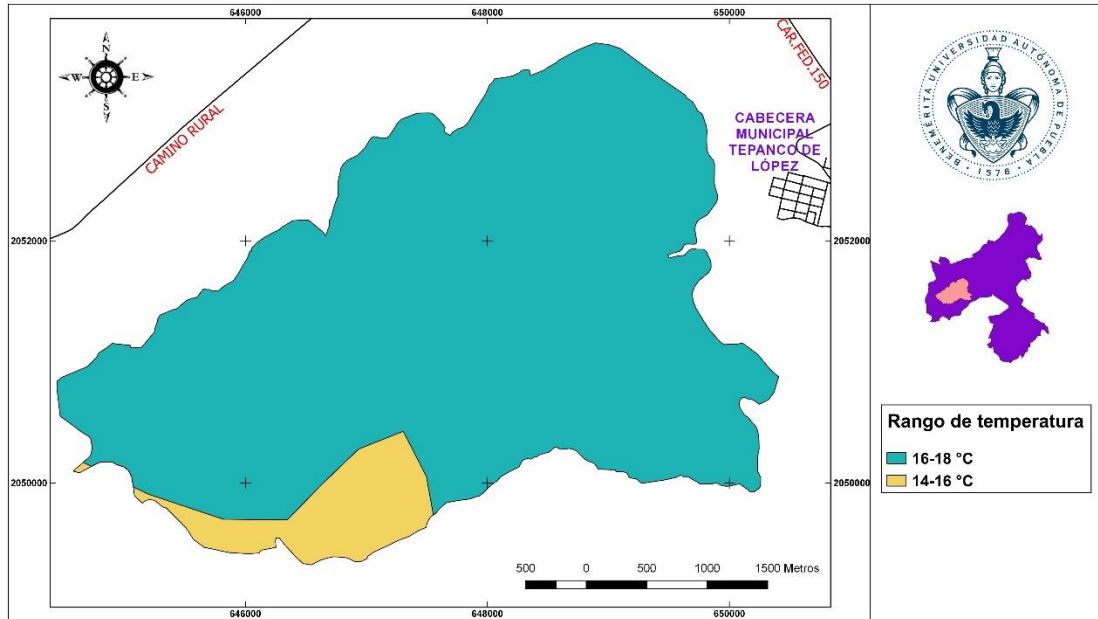


Figura 13. Temperatura media anual de la Microcuenca.

Fuente: INEGI 1999.

Editado por: Ramírez-García, A.

7.2 Metodología de la Investigación.

La división natural del ambiente está asociada a ecosistemas determinados o a grandes ecosistemas como biomas, unidades fitogeográficas o tipos forestales. Sin embargo, la unidad territorial que mejor refleja las relaciones e interacciones entre sociedad y naturaleza es la cuenca hidrológica. Esto último por ser un sistema ambiental existente en el territorio delimitado por una línea divisoria a partir del cual las aguas superficiales o subterráneas escurren o drenan hacia un río o área en común. El carácter permanente de la divisoria de las aguas de las cuencas hidrográficas permite identificar las entradas y las salidas del sistema natural, por tanto es posible aplicar un enfoque sistémico al análisis de los fenómenos y procesos del ambiente natural presente en la cuenca (Alfaro, 2005). Con base en lo anterior, se propuso una metodología con enfoque de cuencas que consistió en tres etapas básicas para cumplir con los objetivos planteados (Figura 14).

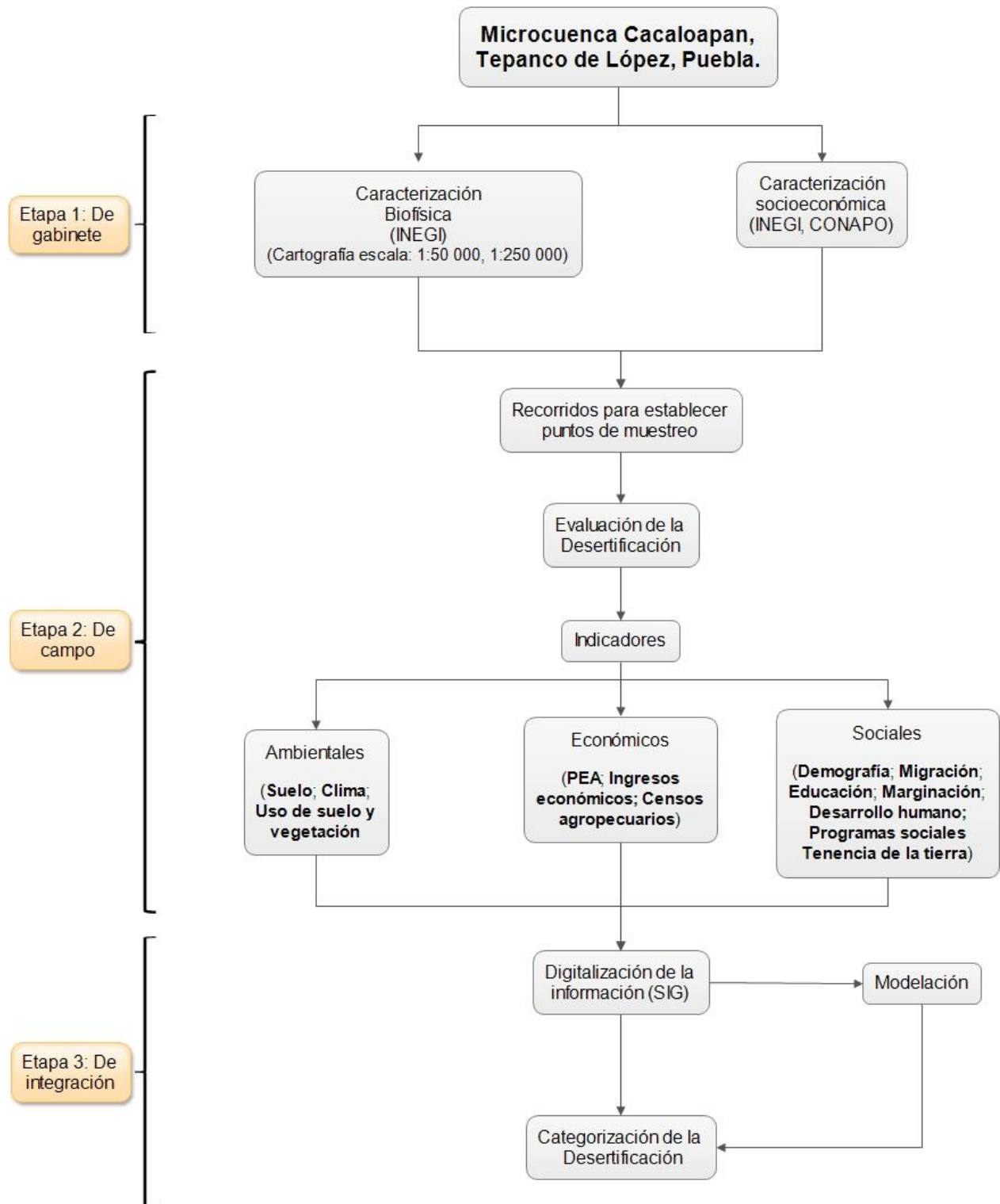


Figura 14. Diagrama metodológico.

7.2.1 Etapa 1: Gabinete.

En esta etapa se realizó una descripción detallada de los componentes ambientales y socioeconómicos de la microcuenca y sus interacciones. Para lograrlo se efectuó una recopilación y sistematización bibliográfica, acorde a los indicadores, de toda la información disponible de la zona de estudio. Dicha información se obtuvo de cartografía escala 1:50 000 y 1: 250 000, dada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, por sus siglas), en las temáticas de clima, edafología, uso de suelo y vegetación, fisiografía, hidrología, geología, entre otros. Así como de datos estadísticos realizados por INEGI y el Consejo Nacional de Población (CONAPO, por sus siglas) durante el intervalo comprendido entre 1970-2015, además de información obtenida de los habitantes de la región mediante encuestas. La finalidad fue establecer y cuantificar las variables que tipifican el área de estudio, al mismo tiempo, conformar una base de datos que permitió la digitalización de toda la información obtenida con el uso de Sistemas de Información Geográfica (Quantum GIS 2.14.6 y ArcGis 10.5).

7.2.1.1 Caracterización biofísica de la microcuenca

La localización geográfica de la zona de estudio y la información referente a la fisiografía, geología, edafología, vegetación, clima e hidrología se obtuvo de los mapas respectivos escala 1:250 000, así como de la cartografía estatal topográfica escala 1:50 000, ambas publicaciones de INEGI. Con el propósito de realizar una base de datos en los Sistemas de Información Geográfica Quantum GIS 2.14.6 y ArcGis 10.5, que permitió la elaboración de los mapas correspondientes de cada tema para la microcuenca evaluada. Para con ello proceder a su cotejo en campo mediante la realización de recorridos de reconocimiento y muestreo.

7.2.1.2 Caracterización socioeconómica de la microcuenca

La caracterización socioeconómica se basó en la obtención de datos estadísticos publicados tanto por INEGI como por CONAPO e información proporcionada por habitantes de mayor edad y miembros activos del Consejo de Comuneros de Tepanco de López a partir de la aplicación de un cuestionario validado (Anexo 1), con la finalidad de cuantificar las variables de población, marginación, educación, migración, desarrollo humano, tenencia de la tierra y economía de 1970 al 2015.

7.2.2 Etapa 2: Campo.

Esta etapa estuvo dirigida a determinar el estado ambiental actual de la cuenca, considerando su capacidad natural y las tendencias de las intervenciones humanas sobre el ambiente. Prioritariamente se pretendió conocer las características, potencialidades, interacciones, causas y consecuencias, a la problemática de desertificación de la microcuenca, desde una perspectiva ambiental, económica y social, con ayuda de la interpretación de indicadores (Cuadro 1 y 2). Cabe señalar que en primea instancia se realizó un recorrido de reconocimiento que permitió establecer las posibles zonas de muestreo, así como su georreferenciación, además de comprobar y actualizar la información recopilada previamente.

Cuadro 1. Indicadores ambientales propuestos para el diagnóstico ambiental de la Microcuenca

Subsistema	Elemento del subsistema	Proceso	Indicador
Ambiental	Suelo	Degradación biológica	% de Materia orgánica % de Nitrógeno total
		Compactación	Densidad aparente
		Salinidad	pH Conductividad eléctrica
		Intercambio catiónico	Capacidad de Intercambio Catiónico Bases intercambiables
		Erosión hídrica	$A = R K L S C P$
		Erosión eólica	$E = I C K L V$
	Clima	Balance hídrico	Precipitación anual y mensual Temperatura media anual y mensual Evapotranspiración potencial Índice de aridez
	Uso de suelo y vegetación	Cambio de uso de suelo	Índice de vegetación (NDVI)
		Perdida de cobertura vegetal	Tasa de cambio Probabilidad de permanencia

Cuadro 2. Indicadores socioeconómicos propuestos para el diagnóstico ambiental de la Microcuenca

Subsistema	Elemento del subsistema	Indicador
Económico	Economía	Población económicamente activa (PEA) Tasa de participación económica Ingresos económicos (salarios mínimos) Censos agropecuarios (producción agrícola y ganadera)
Social	Demografía	Población Total (hombres y mujeres) Población indígena
	Migración	Tasa de migración neta Población de 5 años y más emigrante
	Educación	Porcentaje de población de 15 años o más analfabeta Porcentaje de población de 15 años o más sin primaria completa
	Marginación	Índice de marginación Grado de marginación
	Desarrollo humano	Índice de desarrollo humano
	Tenencia de la tierra	Tipo de propiedad

7.2.2.1 Diagnóstico ambiental de la microcuenca.

7.2.2.1.1 Morfometría de la Cuenca.

Para el análisis morfométrico se tomó en cuenta la carta topográfica E14B65 de Santiago Miahuatlan, Puebla publicada por INEGI en 2015, que incluye: *curvas de nivel* y *aguas superficiales*. Además se realizaron los cálculos de *forma*, *relieve* e *hidrología* mediante la aplicación de las siguientes fórmulas matemáticas:

$$Kf = A / L^2 \quad \text{Ecuación 1 (Domínguez, 2004; INE, 2004)}$$

Donde, Kf= coeficiente de forma; A= área de la cuenca (Km²); L= longitud axial de la cuenca (Km).

$$Kc = 0.28 P / \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 2 (Domínguez, 2004 que cita a Monsalve, 1999)}$$

Donde, Kc= coeficiente de compacidad; A= área de la cuenca (Km²); P= perímetro de la cuenca (Km).

$$Rb = S_{0-1} / S_0 \quad \text{Ecuación 3 (Domínguez, 2004; INE, 2004)}$$

Donde, S_0 = número de corrientes en un orden dado; S_{0-1} = número de corrientes en el siguiente nivel bajo.

$$Dd = L / A \quad \text{Ecuación 4 (Domínguez, 2004 que cita a Monsalve, 1999)}$$

Donde, Dd = densidad del drenaje; L = longitud total de las corrientes de agua (Km); A = área de la cuenca (Km^2).

$$Dh = Ni / A \quad \text{Ecuación 5 (Domínguez, 2004; INE, 2004)}$$

Donde, Dh = densidad hidrográfica, en número de corrientes por Km^2 ; Ni = número corrientes de agua; A = área de la cuenca (Km^2).

$$I = A / 4L \quad \text{Ecuación 6 (Domínguez, 2004)}$$

Donde, I = extensión media del escurrimiento superficial (Km); L = longitud total de las corrientes (Km); A = área de drenaje (Km^2).

$$Sc = Dn * Lb / A \quad \text{Ecuación 7 (Campos-Aranda, 1998)}$$

Donde, Sc = pendiente media de la cuenca; Lb = longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (Km); Dn = desnivel constante entre curvas de nivel (Km); A = área de la cuenca (Km^2).

$$Pm = (\Delta H_{max}) / L \quad \text{Ecuación 8 (Domínguez, 2004)}$$

Donde, Pm = pendiente media de la corriente principal (m/Km), ΔH_{max} = desnivel máximo del río (m) (diferencia de altitud entre el punto más alejado de la cuenca y el punto de salida) y L = longitud del cauce principal (Km).

$$Hsi = (H_{media} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}) \quad \text{Ecuación 9 (Alcaraz et al., 2011; Bustos et al., 2013)}$$

Donde, Hsi = Integral hipsométrica; H = altura (msnm).

$$H = \sum (ci * ai) / A \quad \text{Ecuación 10 (Becerra, 2007)}$$

Donde, H= Altura media de la cuenca (msnm); c_i = cota media del área i entre dos curvas de nivel (msnm); a_i = área entre dos curvas de nivel (Km^2); A= área total de la cuenca (Km^2).

7.2.2.1.2 Clima.

El análisis de la variabilidad climática es de suma importancia en el estudio de la desertificación debido a que es prácticamente imposible separar los impactos de la sequía y a este fenómeno de degradación, dado que ambos procesos suceden de forma simultánea (Mercado-Mancera, Troyo-Diéquez, Aguirre-Gómez, Murillo-Amador, Beltrán-Morales y García-Hernández, 2010). Por lo que para esta investigación se elaboró el climograma de los principales indicadores climatológicos: *Precipitación*, *Temperatura media* y *Evapotranspiración*; y cuya información se obtuvo de la red de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, por sus siglas) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, por sus siglas), aledañas a la zona de estudio, entre las que destacan la. Estación Meteorológica Cacaloapan con clave 21033, Estación Meteorológica Tehuacán (21083), Estación Meteorológica Zapotitlán Salinas (21109), Estación Meteorológica Tecamachalco (21082) y Estación Meteorológica Loma Grande (30486).

Asimismo para la estimación de la condición hídrica a partir del coeficiente de aridez se aplicó el *Índice de Aridez de De Martonne*:

$$IA = [(12*pp) / (tm + 10)] \quad \text{Ecuación 11 (Troyo et al., 2014)}$$

Donde, IA= índice de aridez, P= precipitación media mensual (mm) y t_m = temperatura media mensual ($^{\circ}C$).

No obstante con la finalidad de alcanzar una mayor sensibilidad del índice antes mencionado, se utilizó el modelo alternativo desarrollado por Troyo y colaboradores (2014), el cual consiste en un ajuste numérico a la ecuación de De Martonne, cuya escala está limitada de 0 a 10 unidades y es aplicable a las condiciones de aridez puesto que está altamente correlacionado con el déficit hídrico y a los valores mínimos de precipitación. Dicho indicador alternativo está definido a través de las siguientes funciones:

$$IDHA = Ke (12*pp)/(t + 10) \quad \text{Ecuación 12 (Troyo et al., 2014)}$$

Donde, IDHA= Índice de Disponibilidad Hidroambiental, PP= precipitación mensual (mm), t= temperatura media mensual (°C) y Ke= coeficiente adimensional de ajuste de escala, con valor de 0.193.

$$\text{ISHA} = 10 - \text{IDHA}$$

Ecuación 13 (Troyo *et al.*, 2014)

Donde, ISHA= Índice de Sequía Hidroambiental.

$$\text{BHE} = 10 - (2 \cdot \text{IDHA})$$

Ecuación 14 (Troyo *et al.*, 2014)

Donde, BHE= brecha hídrica estandarizada

Además se realizó el análisis de tendencias para las variables climáticas a través de la prueba no paramétrica denominada Mann-Kendall, asimismo el Análisis de Series de Tiempo mediante un modelo de Tendencia Lineal, todo ello con la finalidad de conocer los cambios de la temperatura, evapotranspiración y precipitación a lo largo del tiempo.

7.2.2.1.3 Suelo.

En base a la salida previa de reconocimiento se establecieron dos zonas de muestreo (Figura 15). La primera de estas se caracteriza por presentar prácticas de conservación del suelo contra la erosión (zanjas bordo y reforestación, muros de contención, y gaviones), las cuales fueron establecidas a través del programa denominado Pago por Servicios Ambientales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, por sus siglas) en conjunto con los pobladores de la cabecera municipal de Tepanco de López en el año de 2011, y cuya superficie abarca aproximadamente 120 hectáreas. La segunda zona de muestreo, a diferencia de la primera, no presenta ninguna acción de protección contra la pérdida de suelo. De esta forma, se realizaron salidas al campo donde se establecieron puntos de muestreo y describieron perfiles edáficos de acuerdo a la metodología establecida por Ruiz *et al.*, (1999) (Anexo 2); además se colectaron muestras de material edáfico de aproximadamente 500 gr por horizonte, que posteriormente fueron llevadas al Laboratorio de suelos del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA, por sus siglas) para sus respectivos análisis. El desarrollo metodológico se efectuó en base a lo decretado

en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis.

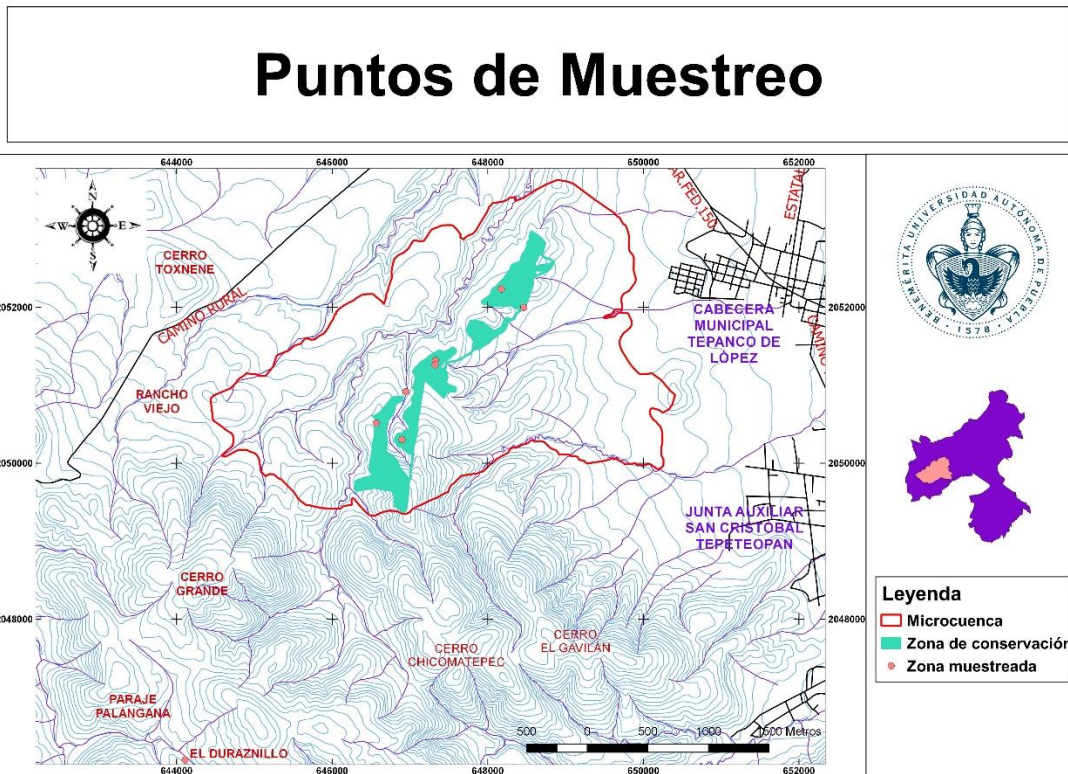


Figura 15. Zonas muestreadas.

Fuente: INEGI 2015d.

Elaborado por: Ramírez-García, A.

Los principales indicadores que se evaluaron fueron: 1) porcentaje de *Materia orgánica* (M.O), mediante el método de Walkley y Black; 2) porcentaje de *Nitrógeno total* por el método AS-25; 3) *Compactación*, utilizando el método de la probeta para obtener la densidad aparente; y 4) la *Salinización* al determinarse el pH y Conductividad eléctrica con el método AS-02, así como la Capacidad de Intercambio Catiónico y la disponibilidad de las Bases intercambiables ambos por el método AS-12.

7.2.2.1.3.1 Erosión hídrica potencial.

El cálculo de la *Erosión Hídrica Potencial* se evaluó en función de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), dada por la expresión matemática:

$$A = f(R K L S C P)$$

Ecuación 15 (Jones, Griggs, Williams y Srinivasan, 1992)

Donde, A= pérdida de suelo (t/ha/año), R = erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h), K= factor de erosionabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm), LS= factor topográfico longitud-pendiente, C= factor de cobertura vegetal y P= prácticas de conservación.

Asimismo el *factor R*, que representa la energía potencial de la lluvia y su escurrimiento asociado para un área específica, normalmente es determinado por la ecuación:

$$R = \sum_{j=1}^n (EI_{30})$$

Ecuación 16 (SAGARPA, s.f.)

Donde, R= erosividad de la lluvia, n= número de eventos durante el año, EI₃₀= índice de erosividad de la lluvia por evento

No obstante, debido a la carencia de información relativa a la intensidad en periodos de tiempo tan cortos, se optó por aplicar las ecuaciones de erosividad asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana (Figura 16; Cuadro 3) determinadas por Cortés (Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011; SAGARPA, s.f.; Pastrana-Ortiz, 2014). Siendo la ecuación de la región cinco, que representa el sureste del Estado de Puebla, la aplicada al presente estudio.



Figura 16. Regionalización Nacional del factor R.
Fuente: Pastrana-Ortiz, 2014.

Cuadro 3. Ecuaciones regionalizadas del factor R para la República Mexicana.

Región	Ecuación	R ²
1	$R = 1.2078P + 0.002276P^2$	0.92
2	$R = 3.4555P + 0.006470P^2$	0.93
3	$R = 3.6752P - 0.001720P^2$	0.94
4	$R = 2.8559P + 0.002983P^2$	0.92
5	$R = 3.4880P - 0.00088P^2$	0.94
6	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$	0.90
7	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$	0.98
8	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$	0.98
9	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$	0.97
10	$R = 6.8938P + 0.000442P^2$	0.95
11	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$	0.98
12	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$	0.96
13	$R = 10.7427P - 0.00108P^2$	0.97
14	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$	0.95

Fuente: Pastrana-Ortiz, 2014.

Para el *factor k*, que indica el grado de susceptibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión, tradicionalmente, la metodología usada es el nomograma de Wischmeier y Smith, el cual toma en cuenta ciertas propiedades del suelo, como contenido de materia orgánica, contenido de arenas, contenido de limos, estructura y permeabilidad, entre otras. Empero, para el presente estudio y debido a que no se cuenta con información detallada y

completa para el empleo de la metodología tradicional, se aplicó la metodología de la FAO, cuyos valores están en función al tipo de suelo y la textura (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB.

Clasificación WRB		Textura			Clasificación WRB		Textura		
Nombre	Símbolo	Gruesa	Media	Fina	Nombre	Símbolo	Gruesa	Media	Fina
Acrisol	AC	0.026	0.04	0.013	Kastanozem	KS	0.026	0.04	0.013
Alisol	AL	0.026	0.04	0.013	Leptosol	LP	0.013	0.02	0.007
Andosol	AN	0.026	0.04	0.013	Luvisol	LV	0.026	0.04	0.013
Arenosol	AR	0.013	0.02	0.007	Lixisol	LX	0.013	0.02	0.007
Chernozem	CH	0.013	0.02	0.007	Nitisol	NT	0.013	0.02	0.007
Calcisol	CL	0.053	0.079	0.026	Phaeozem	PH	0.013	0.02	0.007
Cambisol	CM	0.026	0.04	0.013	Planosol	PL	0.053	0.079	0.026
Durisol	DU	0.053	0.079	0.026	Plinthosol	PT	0.026	0.04	0.013
Fluvisol	FL	0.026	0.04	0.013	Regosol	RG	0.026	0.04	0.013
Ferrasol	FR	0.013	0.02	0.007	Solonchak	SC	0.026	0.04	0.013
Gleysol	GL	0.026	0.04	0.013	Solonetz	SN	0.053	0.079	0.026
Gypsisol	GY	0.053	0.079	0.026	Umbrisol	UM	0.026	0.04	0.013
Histosol	HS	0.053	0.02	0.007	Vertisol	VR	0.053	0.079	0.026

Fuente: Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011.

El *factor LS*, donde L es la longitud de la pendiente y S el grado de la pendiente se obtuvo mediante las fórmulas:

$$L = (x/22.13)^m \quad \text{Ecuación 17 (Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011)}$$

Donde, $m = \beta/(1+\beta)$; $\beta = (\text{sen } \Theta / 0.0896) / (3(\text{sen } \Theta)^{0.8} + 0.56)$; Θ = pendiente del terreno.

$$S_1 = 10.8 \text{ sen } \Theta + 0.03 \quad \Theta \leq 9\%$$

$$S_2 = 16.8 \text{ sen } \Theta - 0.50 \quad \Theta > 9\% \quad \text{Ecuación 18 (Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011)}$$

Para el *factor C*, se utilizaron los datos contenidos en el Cuadro 5, que establece los valores en base al tipo de cobertura vegetal y/o uso de suelo (Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011).

Cuadro 5. Factor C.

Vegetación y/o uso de suelo	Factor C	Vegetación y/o uso de suelo	Factor C
Bosque de ayarin	0.01	Pastizal gipsofilo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino	0.10	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.10	Popal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de táscate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque mesófilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.50
Manglar	0.10	Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Matorral de coníferas	0.20	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico microfilo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico rosetofo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.10
Matorral rosetofo costero	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral sarcocaule	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sarco-crasicaule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25	Vegetación halófila	0.85
Matorral submontano	0.35	Zona urbana	0.005
Matorral subtropical	0.12	Cuerpos de agua	1.0
Mezquital	0.65	Agricultura de riego	0.55
Palmar inducido	0.75	Agricultura de temporal	0.75
Palmar natural	0.75	Agricultura de humedad	0.25

Fuente: Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011.

Finalmente y de igual forma, el *factor P* se estableció en relación a los datos contenidos en el Cuadro 6 (CENAPRED, 2004).

Cuadro 6. Factor P.

Tipos de obra de control de erosión	Factor P
Cuando más del 90% de las laderas de la cuenca tienen terrazas	0.1
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 61% y 90%	0.2
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 41% y 60%	0.3
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 21% y 40%	0.4
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 6% y 20%	0.5
Reforestación más del 90% del área de la cuenca	0.2
50% < reforestación < 90%	0.3
30% < reforestación < 49%	0.4
5% < reforestación < 29%	0.5
Si existen presas de gaviones en las barracas de la cuenca	0.3
Si existen desarenadores en las localidades a la salida de la cuenca	0.35
Sin no existen obras de control de erosión en toda la cuenca	1.0

Fuente: CENAPRED, 2004

7.2.2.1.3.2 Erosión potencial eólica.

Para *erosión eólica* la estimación se fundamentó en la Ecuación de la Erosión Eólica (WEQ, por sus siglas en inglés), propuesta por Skidmore y colaboradores en 1970 (Eltaif y Gharaibeh, 2011), y la cual se expresa mediante la siguiente función:

$$E = f(I C K L V) \quad \text{Ecuación 19 (Eltaif y Gharaibeh, 2011)}$$

Donde, E= erosión actual (t/ha/año), I= erosionabilidad del suelo, C= factor de agresividad climática, K= factor de rugosidad, L= longitud del terreno en la dirección prevaeciente de los vientos y V= factor de cobertura vegetal.

A su vez, el *factor de erosionabilidad* del suelo se obtuvo mediante la ecuación:

$$I = 662-148 \ln(X) \quad \text{Ecuación 20 (Eltaif y Gharaibeh, 2011)}$$

Donde I= erodabilidad del suelo (mg·ha⁻¹), y X= porcentaje de la fracción de suelo seco > 0.84 mm.

Para el *factor de agresividad climática* se usó la ecuación:

$$C = 1/100 \sum_{i=1}^{12} V^3 ((ETP - P)/ETP) n \quad \text{Ecuación 21 (Eltaif y Gharaibeh, 2011)}$$

Donde, V= velocidad el viento (m/s) a 2 m de altura, ETP= evapotranspiración potencial mensual (mm), P= precipitación mensual (mm) y n= número de días del mes en el mes correspondiente.

Los *factores de rugosidad y cobertura vegetal* se obtuvieron mediante el análisis topográfico de las curvas de nivel de la carta topográfica E14B65 denominada “Santiago Miahuatlan, Puebla” publicada por INEGI, así como de las imágenes satelitales LANDSAT 8 dadas por el servidor U.S. Geological Survey, para la creación de los mapas del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI, por sus siglas en ingles) para los meses de Enero y Mayo de 2017.

Finalmente la categorización para ambas estimaciones de erosión se realizó según lo establecido por Wischmeier y Smith en 1978 (Pastrana-Ortiz, 2014) (Cuadro 7), que clasifica la erosión en: Nula, Ligera, Moderada, Severa, Muy severa.

Cuadro 7. Evaluación de la degradación de los suelos, establecida por la FAO.

Grado	Pérdida de suelo t/ha/año	Grado de erosión
1	< 5	Nula
2	5-10	Ligera
3	10-50	Moderada
4	50-200	Severa
5	> 200	Muy Severa

Fuente: Pastrana-Ortiz, 2014

7.2.2.1.4 Vegetación

Para el *cambio de uso* de suelo se usó la información obtenida de las cartas topográficas publicadas por INEGI para las series de tiempo 1987-1997, 1997-2003, 2003-2013, la cual se estructuró en una base geográfica digital, utilizando la metodología de Moolenaar, que consiste en que cada punto, línea o área de un mapa tenga información sobre la localización (datos geométricos) y el contenido (información temática), con un identificador único (Castelán-Vega, Ruiz-Careaga, Linares-Fleites, Pérez-Avilés y Tamariz-Flores, 2007). Además se calculó *la tasa de cambio* y la *probabilidad de permanencia* con las siguientes expresiones matemáticas:

$$TD = ((S_2/S_1)^{(1/n)} - 1) * 100 \quad \text{Ecuación 22 (Miranda-Aragón et al., 2013)}$$

Donde, TD= Tasa de cambio (%), S1= Superficie en el año inicial (ha), S2= Superficie en el año final (ha) y n= número de años en el periodo de análisis.

$$P_{ij} = S_{ij} (1987) / S_j (2013) \quad \text{Ecuación 23 (Castelán-Vega et al., 2007)}$$

Donde, P_{ij}= Tasa de permanencia, S_{ij}= Superficie de "ij" de la matriz de transición de uso del suelo en 1987 y S_j = Superficie de la clase de uso del suelo "j" en 2013. La interpretación se realizará utilizando las siguientes clases de probabilidad: 0-33% (baja), 34-66% (media) y 67-100% (alta) (Castelán-Vega et al., 2007).

7.2.2.2 Diagnóstico económico de la microcuenca

El diagnóstico económico estuvo basado en la obtención de datos estadísticos publicados por INEGI para las variables *Población económicamente activa (PEA)*, *Ingresos económicos (salarios mínimos)* y *Tasa de participación económica*. Así mismo se incluyó *información agropecuaria* de la producción agrícola, ganadera y su valor económico dentro del municipio.

7.2.2.3 Diagnóstico social de la microcuenca

El diagnóstico social estuvo basado en la recolección de datos estadísticos publicados tanto por INEGI como por CONAPO para el municipio de Tepanco de López durante el intervalo de tiempo comprendido entre 1970 y 2015, los cuales permitieron asignar valores cuantitativos y cualitativos a los indicadores demográficos (*Población total*, *Número de mujeres*, *Número de hombres* y *Población indígena*); de migración (*Migración neta* y *Población de 5 años o más emigrante*); de marginación (*Índice* y *Grado de marginación*); educación (*Población de 15 años o más analfabeta* y *Población de 15 años o más sin primaria completa*); *Índice de desarrollo humano*; programas gubernamentales y tenencia de la tierra (*Tipo de propiedad*) (INEGI, 2016; CONAPO, 2016). Además se reunió información proporcionada por habitantes de la localidad a través de encuestas, que permitieron conocer las condiciones sociales actuales en las que vive la población.

7.2.2 Etapa 3: Integración.

En esta etapa se ordenó la información obtenida en una base de datos para digitalizarla en un Sistema de Información Geográfico (Quantum GIS 2.14.6 y ArcGis 10.5) con el propósito de obtener mapas digitales que permitan establecer la distribución espacial y temporal de los parámetros evaluados. Así mismo se elaboró el diagrama de las interrelaciones establecidas entre los diferentes subsistemas de la Microcuenca, que a su vez sirvió de base para la creación de un prototipo de modelo causal en el programa MATLAB R2015a, el cual se sustentó en la aplicación del álgebra de la causalidad y la lógica difusa, una metodología que proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, imprecisa, con ruido o incompleta (D'Negri y De Vito, 2006; Laza-Vásquez, 2006). Todo ello con la finalidad de diagnosticar el grado de desertificación como producto de la interacción e interrelación de los

factores ambientales y socioeconómicos de la Microcuenca Cacaloapan perteneciente al municipio de Tepanco de López.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se reportan los resultados obtenidos de la evaluación sistémica de los indicadores ambientales y socioeconómicos propuestos, con el propósito de conocer la dinámica ambiental y antropogénica que repercute directa o indirectamente en el grado de desertificación que presenta la Microcuenca Cacaloapan. Además se presenta el desarrollo metodológico de un prototipo matemático cuya base fue la aplicación de lógica como factor en la toma de decisiones para la estimación del grado de degradación de dicha problemática.

8.1 Subsistema Biofísico.

8.1.1 Morfometría de la Cuenca.

La forma de la superficie terrestre es el resultado de un complejo equilibrio entre un conjunto de características y procesos medioambientales (Romero-Díaz y López-Bermúdez, 1987; Matoš, Pérez-Peña y Tomljenović, 2016). Dicho equilibrio dinámico origina unidades topográficas denominadas cuencas, cuya función hidrológica es la de captar la precipitación pluvial convirtiéndola en escurrimientos, los cuales están definidos por los puntos altímetros más elevados, las condiciones climatológicas y características geomorfológicas particulares de la cuenca (Senisterra, Rodríguez-Vagaría, Gaspari y Mazzucchelli, 2014; Cruz-Romero, Gaspari, Rodríguez-Vagaría, Carrillo-González y Téllez-López, 2015). Por tanto el estudio morfométrico de una cuenca es un elemento sustancial en la descripción de la dinámica hídrica, ya que permite conocer el comportamiento de los caudales que transitan por ella, además de que sirve para hallar parámetros que caracterizan el ambiente geomorfológico (Senisterra *et al.*, 2014; Romero-Díaz y López-Bermúdez, 1987; González de Matauco, 2004; Gerald, Piccolo y Perillo, 2010).

De acuerdo al análisis morfométrico, la zona de estudio se encuentra clasificada como una Microcuenca exorreica (Domínguez, 2004; INE, 2004), ya que presenta una superficie aproximada de 14.80 Km², que corresponde a su vez al 6.58% del área total del municipio de Tepanco de López, cuya extensión estimada es de 224.72 Km² (CEIGEP, 2016); además cuenta con una periferia aproximada de 19.7 Km. Su forma, en base al coeficiente de compacidad obtenido (Kc) y al coeficiente de forma (Kf), es de oval redonda a oval oblonga, y ligeramente achatada (Dominguez, 2004; INE, 2004); mientras que la pendiente media de la cuenca (Sc) es de 0.2015 Km (Caudro 8).

Cuadro 8. Parámetros de forma para la Microcuenca.

Medición	Símbolo	Valor	Unidades
Área	A	14.8	Km ²
Perímetro	P	19.68	Km
Coeficiente de compacidad	Kc	1.43	-
Coeficiente de forma	Kf	0.36	-
Pendiente media de la cuenca	Sc	0.2015	Km

En relación con los parámetros de relieve, la Microcuenca se encuentra en una elevación de entre los 1,880-2,320 msnm (Figura 17), con altitud media de 2,032 msnm, sin embargo este dato difiere con el de la curva hipsométrica (CH), ya que para el 50% del área de estudio se presentan cotas entre 2,051 msnm (Cuadro 9; Gráfica 1). Por otra parte, tanto la integral hipsométrica calculada (IH) como la curva hipsométrica adimensional, con valores de 0.35 y 0.42 respectivamente (Cuadro 9, Gráfica 2), demuestran que la Microcuenca Cacaloapan presenta procesos erosivos balanceados, es decir, que presenta un estado transitorio en la evolución de su relieve (Quezada, Cerda y Jensen, 2010). Esta clasificación es de acuerdo a lo publicado por Senisterra *et al.*, 2014; Quezada *et al.*, 2010 y Matoš *et al.*, 2016, donde, en base al valor de la integral hipsométrica, una cuenca se puede clasificar en tres grupos distintivos: a) IH entre 0.30 y 0.60 con curva suavemente en forma de “s” es típica de cuencas en etapas maduras, es decir, representan estados transitorios en la evolución del relieve donde los procesos erosivos y tectónicos están equilibrados; b) HI entre 0 - 0.30 y curva cóncava, representa una cuenca con relieve de baja amplitud en su elevación, además de que corresponde a un relieve senil; y c) valores de la IH entre 0.60 y 1 se asocian a curvas convexas que indican estadios juveniles y cuencas de altitudes elevadas.

Cuadro 9. Parámetros de relieve para la Microcuenca.

Medición	Símbolo	Valor	Unidades
Altitud máxima	Hmax	2,320	msnm
Altitud mínima	Hmin	1,880	msnm
Altura media de la cuenca	H	2,032.2	msnm
Integral Hipsométrica	HI	35	%

Mapa de Elevación

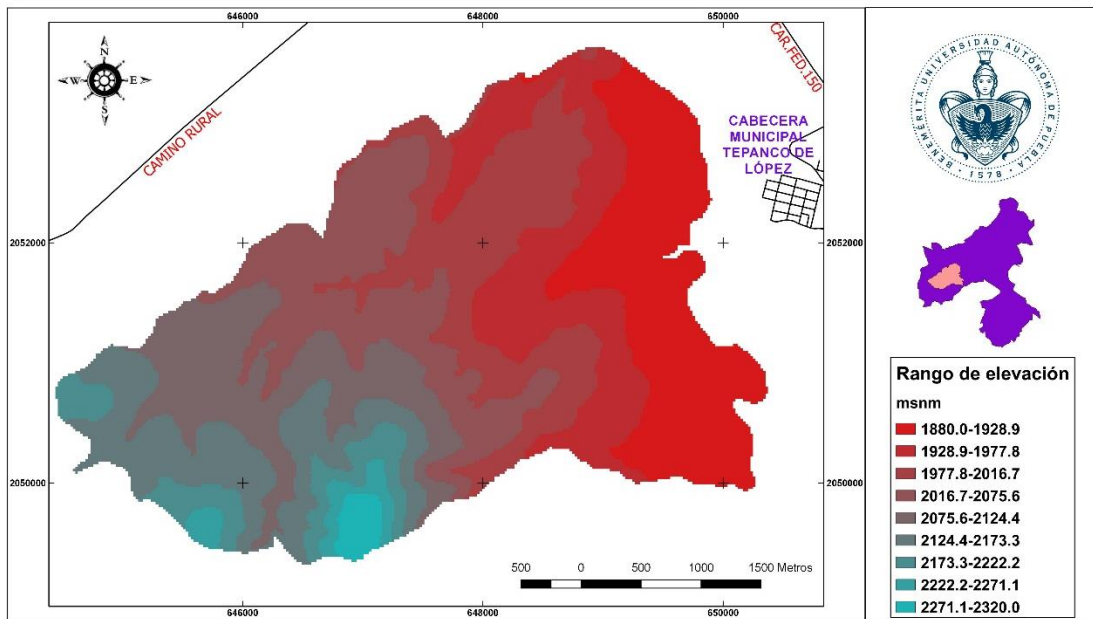
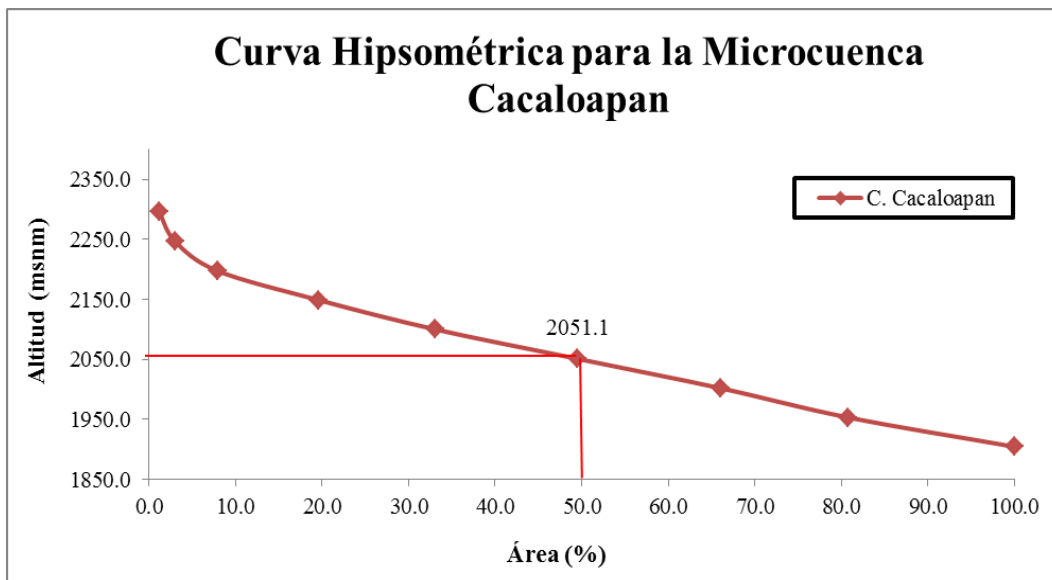
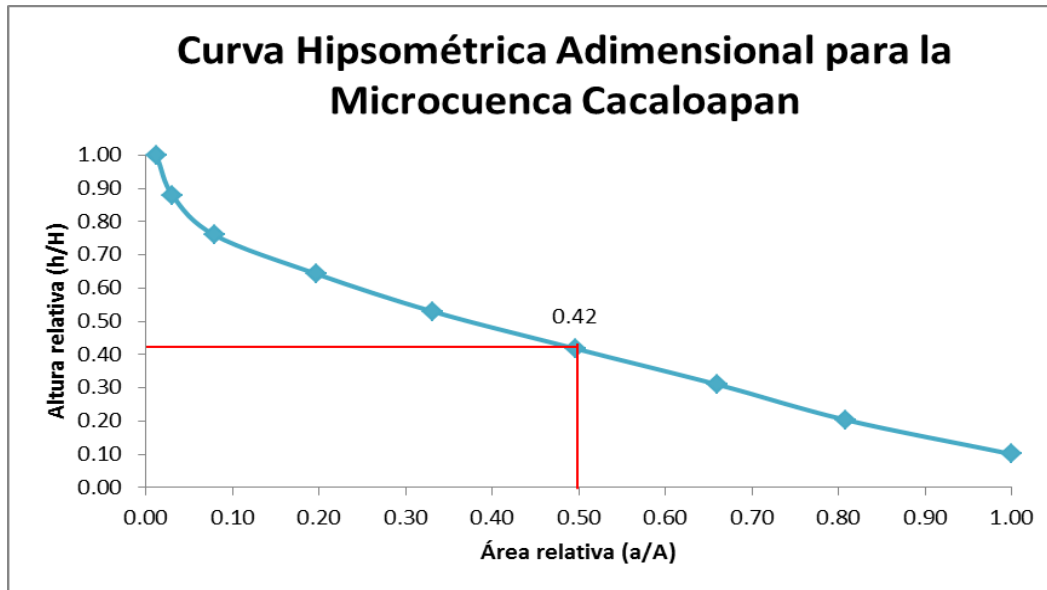


Figura 17. Mapa de elevación de la Microcuenca.
Fuente: INEGI 2015d.
Elaborado por: Ramírez-García, A.



Gráfica 1. Curva hipsométrica para la Microcuenca.



Gráfica 2. Curva hipsométrica adimensional para la Microcuenca.

Cabe decir que la red hídrica de la zona de estudio se encuentra distribuida en 25 causas efímeros, los cuales conforman una longitud total de 25.91 Km. En cuanto al orden de los escurrimientos se detectaron 19 causas de primer orden, 5 de segundo orden y 1 de tercer orden, además la relación de bifurcación promedio (R_b) de las corrientes de agua es de 4.4. Por otra parte el cauce principal presenta una longitud estimada de 6.33 Km, con una pendiente media (P_m) de 0.0694 m/Km. La densidad del drenaje (D_d) es de 1.75 Km/Km² por lo que, de acuerdo a Domínguez (2004), la Microcuenca está bien drenada; mientras que la densidad hidrográfica (D_h) es de 1.68/Km². Asimismo, la extensión media del escurrimiento superficial (I) es de 0.142 Km (Cuadro 10) (Figura 18).

Cuadro 10. Parámetros hidrológicos para la Microcuenca.

Medición	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud de la red hídrica	L	25.91	Km
Longitud del cauce principal	Lc	6.33	Km
Densidad del drenaje	Dd	1.75	Km/Km ²
Densidad hidrográfica	Dh	1.68	/Km ²
Relación de Bifurcación	Rb	4.4	-
No. Causas 1° orden	-	19	-
No. Causas 2° orden	-	5	-
No. Causas 3° orden	-	1	-
Pendiente media del cauce principal	Pm	0.0694	m/Km
Extensión media del escurrimiento	I	0.142	Km

Red Hídrica

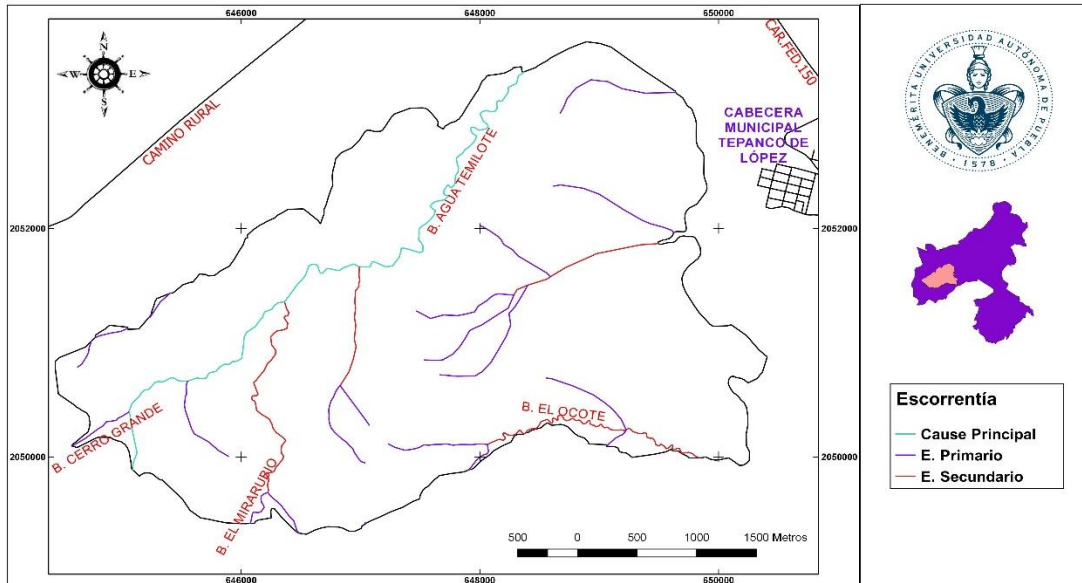


Figura 18. Hidrología superficial de la Microcuenca.

Fuente: INEGI 2015d.

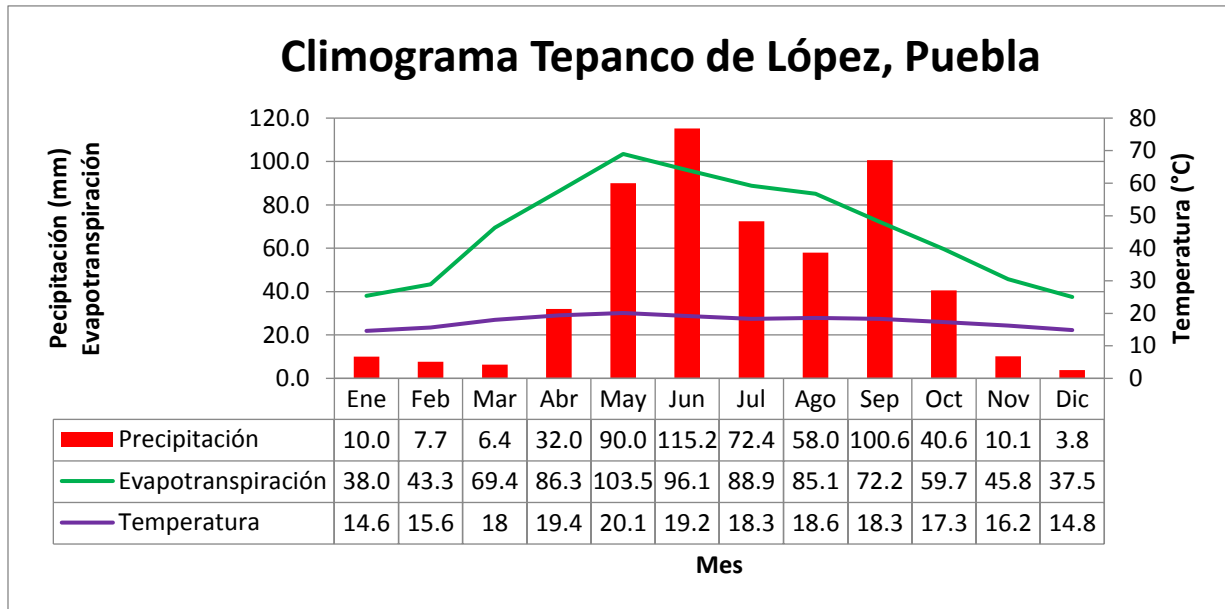
Elaborado por: Ramírez-García, A.

8.1.2 Análisis Climatológico.

Desde su origen, la desertificación ha sido asociada estrechamente con condiciones de aridez. Los factores que la definen son: escasez de precipitaciones, tanto en cantidad como intensidad y regularidad; alta radiación solar, lo que origina altas temperaturas y una evapotranspiración superior al volumen de agua disponible, así como baja humedad atmosférica (Mercado-Mancera *et al.*, 2010; Troyo-Diéguez *et al.*, 2014).

En el climograma (Gráfica 3) que corresponde al periodo de tiempo de 1951-2010 se presentan datos de temperatura media (17.53°C anual), precipitación total (546.8 mm anual) y evapotranspiración total (825.8 mm anual) para la zona de estudio. Donde la temperatura más alta está reportada para el mes de Mayo con 20.1°C ; y la más baja (14.6°C) en el mes de Enero (CONAGUA, 2016). Por otro lado las precipitaciones más importantes están dadas en el periodo de tiempo que comprende de Mayo a Septiembre, denotando así una temporada húmeda y otra seca, donde Junio es el mes más lluvioso con 115.2 mm y Diciembre el más seco con apenas

3.8 mm de precipitación total. Para la evapotranspiración se observa un aumento durante los meses de Febrero, Marzo, Abril y Mayo, siendo este último el que presenta el pico más elevado, para después ver una tendencia decreciente, donde Diciembre es el mes que menor evapotranspiración presenta (CONAGUA, 2016).



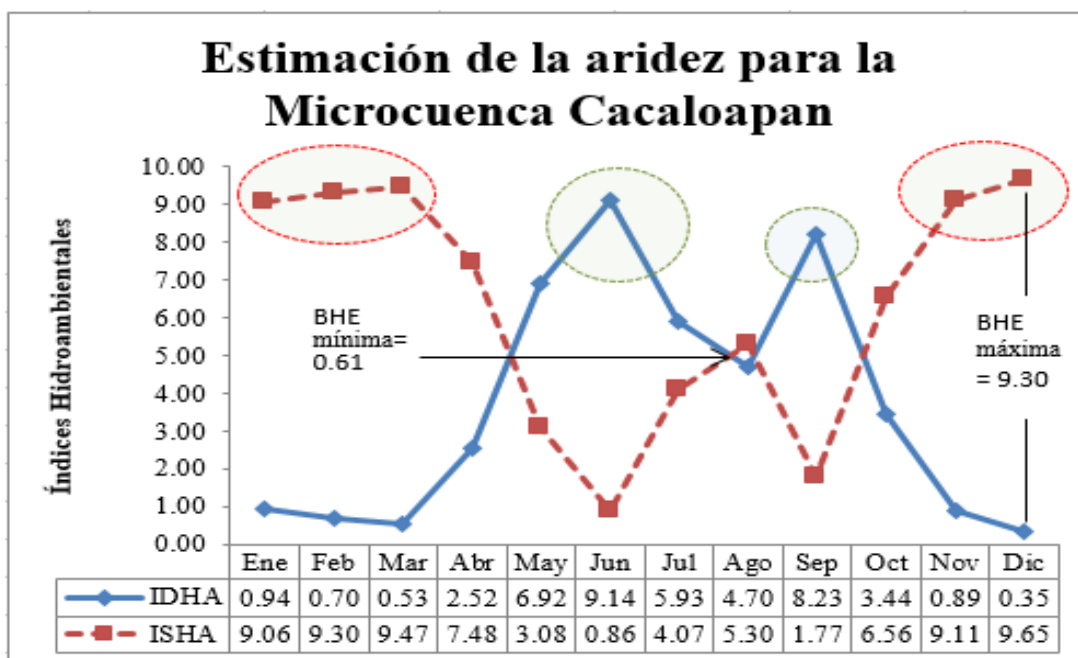
Gráfica 3. Climograma para el Municipio de Tepanco de López, serie 1951-2010. Fuente: CONAGUA (2016), Estación Meteorológica Cacaloapan.

En base a la información cartográfica el área de estudio presenta clima templado subhúmedo con precipitaciones en verano (Cw), y porcentaje de precipitación invernal menor del 5% (INEGI, 1999). No obstante de acuerdo al análisis de indicadores climáticos tales como el Índice de Aridez De Martonne (IAM), el Índice de Disponibilidad Hidroambiental (IDHA), el Índice de Sequía Hidroambiental (ISHA) y la brecha hídrica estandarizada (BHE), la Microcuenca Cacaloapan corresponde a una zona hiperárida, es decir, una región con condiciones desérticas, puesto que su IA anual es de 1.65 (Cuadro 11). Al mismo tiempo al evaluar los índices hidroambientales mensuales se obtuvieron resultados más puntuales del balance hídrico, pues se establece que para la zona de estudio existen dos períodos húmedos que corresponden a los meses de Junio y Septiembre, con valores de IDHA de 9.1 y 8.2 respectivamente; además de una época seca que va desde Noviembre hasta Marzo (ISHA); y donde la brecha hídrica mínima (0.61) corresponde al mes de Agosto, mientras que Diciembre es el de mayor estrés hídrico debido a las bajas precipitaciones (BHEmax= 9.30) (Gráfica 4).

Cuadro 11. Clasificación del Índice de Aridez de De Martone (1926).

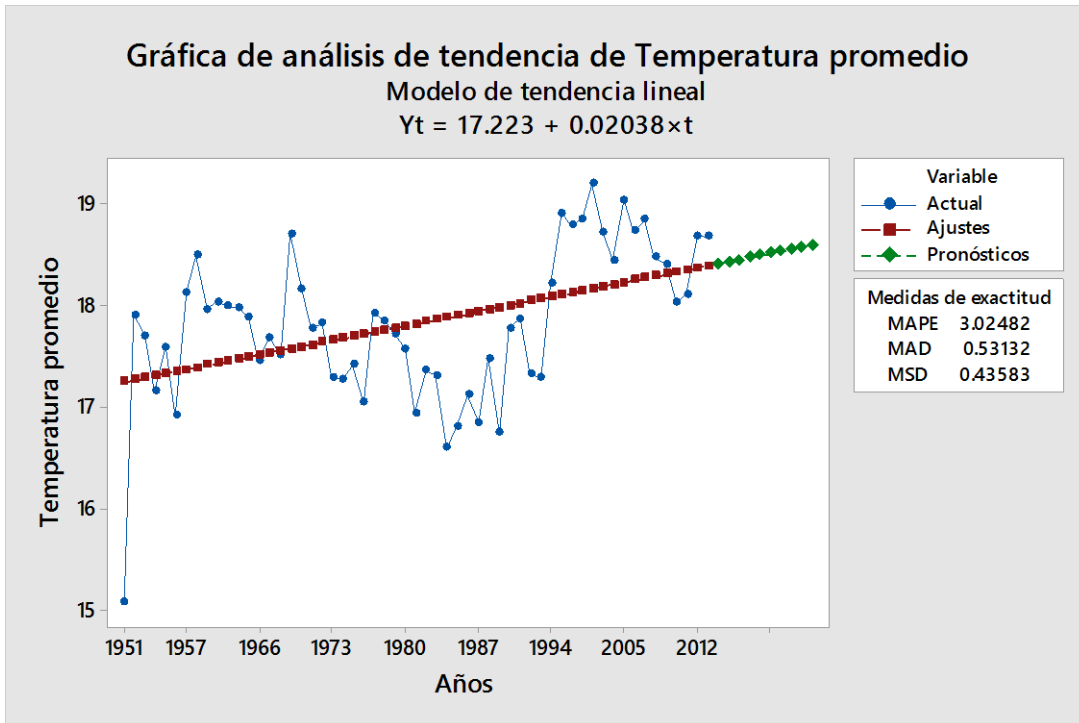
Clasificación IA	Intervalo
Desiertos (hiper-árido)	0 a 5
Semidesierto (árido)	5 a 10
Semiárido de tipo mediterráneo	10 a 20
Subhúmeda	20 a 30
Húmeda	30 a 60
Perhúmeda	> 60

Fuente: Troyo *et al.*, 2014.

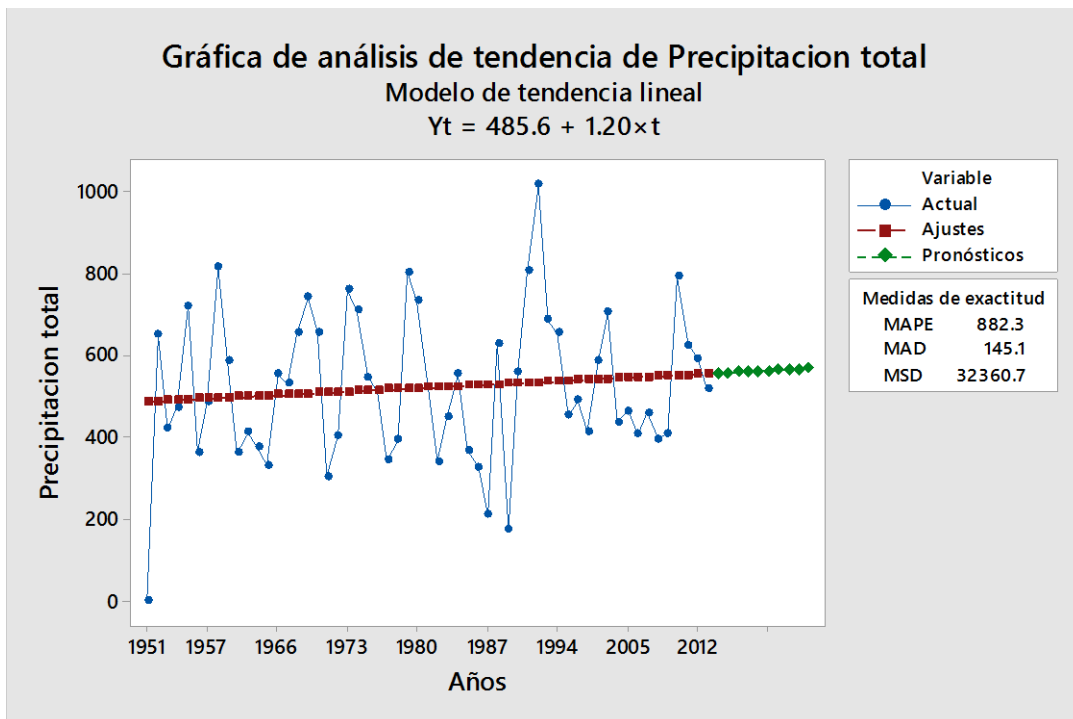


Gráfica 4. Estimación de la aridez mediante Índices hidroambientales.

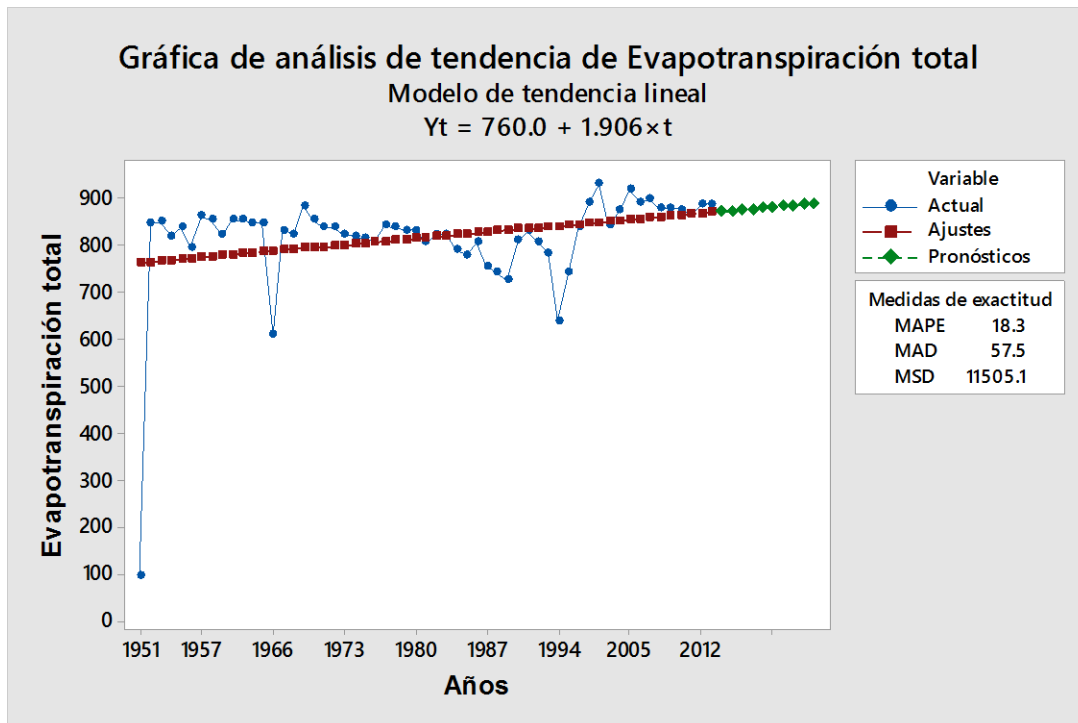
Finalmente al realizar el análisis de tendencias para las condiciones climáticas, se observa que la temperatura promedio anual para el periodo de tiempo comprendido entre 1951 y 2014 ha aumentado hasta 1°C conforme al transcurso de los años (Z-value= 2.4) (Gráfica 5), mientras que la cantidad de precipitación (486.8-554.2 mm) y evapotranspiración (761.9-868.6 mm), a pesar de que gráficamente muestran tendencias al aumento, estadísticamente no son significantes, lo cual indica que se han mantenido relativamente constantes (Z-value precipitación= 0.51 y Z-value evapotranspiración= 1.3, respectivamente) (Gráficas 6 y 7).



Gráfica 5. Tendencia de la Temperatura Promedio Anual para Tepanco de López.



Gráfica 6. Tendencia de la Precipitación Total Anual para Tepanco de López.



Gráfica 7. Tendencia de la Evapotranspiración Total Anual para Tepanco de López.

8.1.3 Índice de Vegetación Diferencial Normalizada.

Mediante el análisis de imágenes satelitales se obtuvo el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) para los meses de Enero y Mayo de 2017 (Figura 19 y 20). Dicho índice mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a +1. En la práctica, los valores que están por debajo de 0.1 corresponden a los cuerpos de agua y al suelo desnudo, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de matorral, el bosque templado, la selva y la actividad agrícola (Meneses-Tovar, 2011). De esta forma se puede observar que para la Microcuenca Cacaloapan el NDVI es mucho menor para el mes de Enero que en el mes de Mayo, al tener un valor máximo de 0.25 mientras que el segundo tiene un máximo de 0.45, lo cual indica que el mes de Enero al ser el más seco tiene menor actividad fotosintética y, por tanto, la densidad vegetal disminuye (Meneses-Tovar, 2011). En contra parte, Mayo, al comenzar con la temporada de precipitaciones, la actividad metabólica aumenta y por ende la cobertura vegetal se renueva. Cabe resaltar que las regiones,

para ambos meses, que presentan menor densidad vegetal se encuentran principalmente con dirección al Este a elevaciones entre los 1,800-1,977 msnm, aproximadamente. A su vez las zonas con mayor vegetación se encuentran desde la porción central de la microcuenca con dirección al Oeste, aunque específicamente para Mayo la mayor densidad y cobertura vegetal se encuentra aledaña a la zona de conservación, en las comunidades de matorral crasicaule, a diferencia de Enero donde las poblaciones vegetales se concentran al Oeste, donde predomina el matorral desértico rosetófilo. Finalmente cabe señalar que la vegetación se encuentra agrupada en islas, que de acuerdo a Muñoz Iñiesta y colaboradores (2017), son características de las regiones áridas y semiáridas, al actuar como unidades funcionales del ecosistema en conjunto.

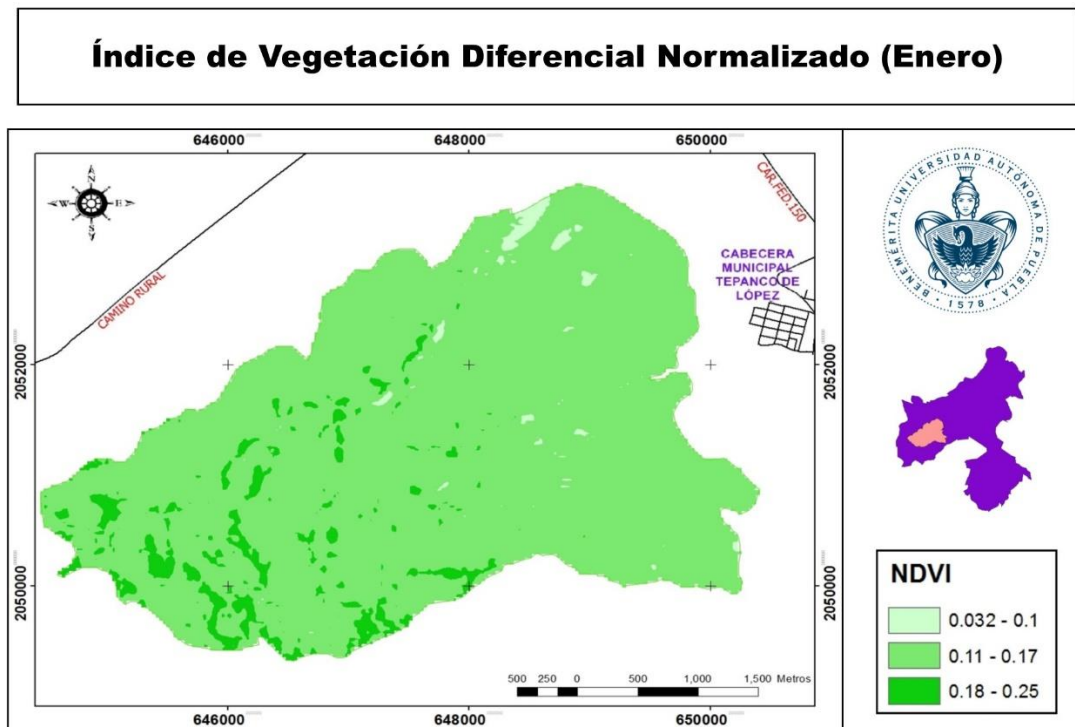


Figura 19. Índice de vegetación diferencial normalizado para el mes de Enero.
Fuente: U.S. Geological Survey.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

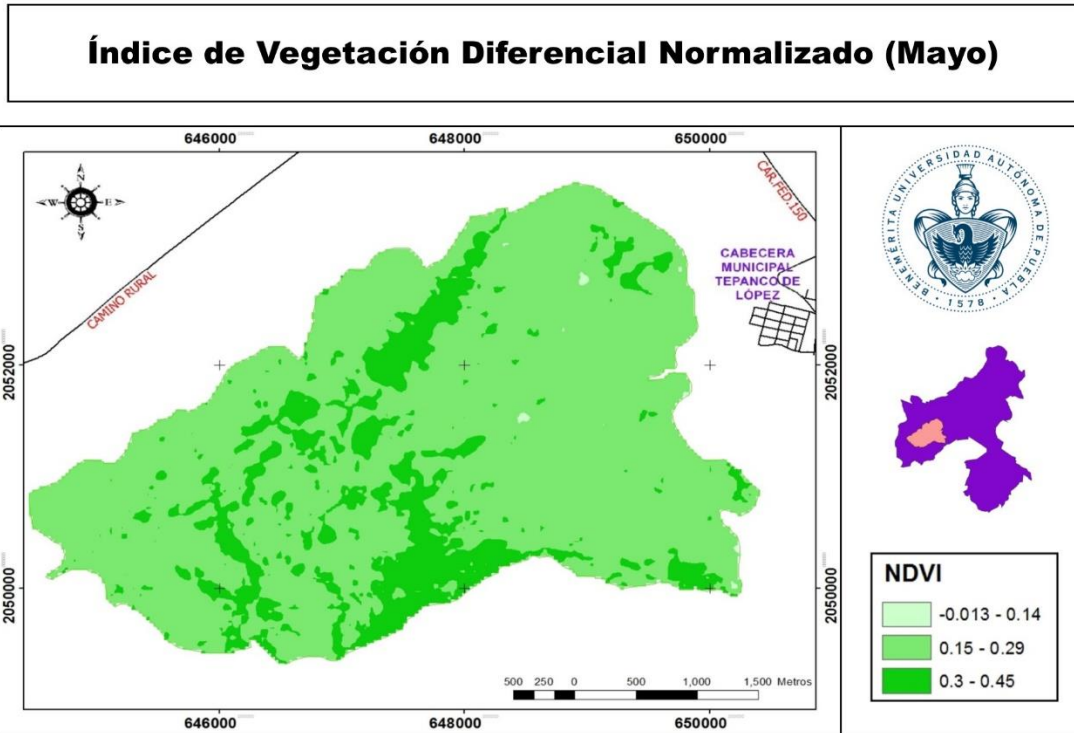


Figura 20. Índice de vegetación diferencial normalizado para el mes de Mayo.
Fuente: U.S. Geological Survey.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

8.1.4 Dinámica de Cambio Espacio-Temporal de Uso de Suelo

Existen diversos factores ambientales, demográficos, socioculturales y económicos que influyen de manera significativa en el cambio de uso de suelo y en la pérdida de cobertura vegetal (López-Vázquez, Balderas-Plata, Chávez-Mejía, Juan Pérez y Gutiérrez Cedillo, 2015; Osuna-Osuna, De Jesús Díaz-Torres, De Anda-Sánchez, Villegas-García, Gallardo-Valdez y Davil-Vázquez, 2015). Estos cambios en los ecosistemas terrestres inducen, de manera local, a la pérdida de material edáfico, a los cambios en el microclima y a la pérdida en la biodiversidad de especies; sin olvidar que a nivel regional se ve afectado tanto el funcionamiento de las cuencas hidrográficas como el de los asentamientos humanos; además de que coadyuvan a la pérdida de bienes y servicios ambientales, la alteración de los ciclos biogeoquímicos, la emisión de gases de efecto invernadero y al cambio climático global, entre otras consecuencias (Bocco, Mendoza y Masera, 2001; Pineda-Jaimes, Bosque-Sendra, Gómez-Delgado y Plata-Rocha, 2009; Velázquez, Mas, Díaz-Gallegos, Mayorga-Saucedo, Alcántara, Castro, Fernández, Bocco, Ezcurra y Palacio, 2002).

Por tanto, el estudio de la magnitud, dinámica y causalidad de los procesos de cambio de vegetación y uso de suelo se ha convertido en una tarea prioritaria de la investigación ambiental (Bocco *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2002; Osuna-Osuna *et al.*, 2015). Actualmente la evaluación de estos cambios en las variaciones es a partir de la medición de los cambios en la cobertura vegetal y no vegetal del mismo, a través del uso de metodologías y procedimientos estadísticos, que se complementan con técnicas de trabajo de campo, así como la aplicación de sistemas de información geográfica y cartografía automatizada, que permiten sentar las bases para conocer las tendencias de los procesos de degradación, deforestación, desertificación y pérdida de biodiversidad de una región determinada (López-Vázquez *et al.*, 2015; Velázquez *et al.*, 2002).

En la Microcuenca Cacalaopan las comunidades vegetales están integradas por: a) matorral xerófilo, dentro del cual destacan el matorral desértico rosetófilo (MDR) y el matorral crasicaule (MCC), que hasta 2013, sumaban una extensión de 1,162.1 hectáreas, es decir, el 75.51% del área total de la Microcuenca; b) pastizal inducido (PI), cuya superficie en ese mismo año era de 143.2 ha; y c) cultivos agrícolas de temporal (CT) con un área de 174.8 ha. (Cuadro 12).

Cuadro12. Dinámica de cambio de uso del suelo, 1987-2013

Uso de suelo	Superficie (ha)							
	1987	%	1997	%	2003	%	2013	%
MDR	387.27	26.16	432.35	29.21	506.74	34.23	505.86	34.17
MCC	778.09	52.56	691.27	46.70	656.89	44.37	656.32	44.34
PI	168.74	11.40	173.93	11.75	143.86	9.72	143.29	9.68
CT	146.22	9.88	182.78	12.35	172.83	11.67	174.84	11.81
Total	1,480.32	100	1,480.32	100	1,480.32	100	1,480.32	100

MDR= Matorral desértico rosetófilo; MCC= Matorral crasicaule; PI = Pastizal inducido; CT= Cultivo de temporal

Para comprender a mayor detalle la dinámica de cambio espacio-temporal de uso de suelo de la microcuenca de estudio se desglosaron tres períodos: el primero que comprende del año 1987 a 1997; el segundo de 1997 a 2003; y por último el que va del 2003 a 2013. En el Cuadro 13 y la Gráfica 8 se muestran los porcentajes y tasas de cambio para cada periodo y en las Figuras 21, 22 y 23, la distribución espacial del uso de suelo de los mismos.

**Dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación
(1987-1997)**

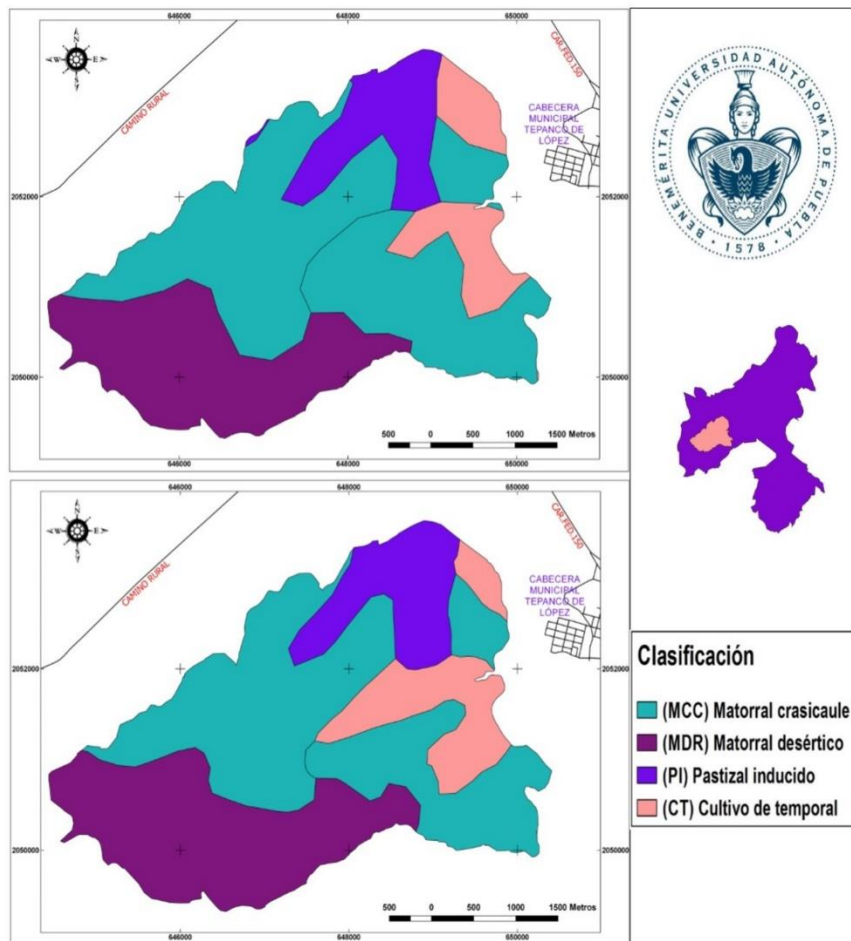


Figura 21. Mapa comparativo espacial de uso de suelo 1987-1997.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

**Dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación
(1997-2003)**

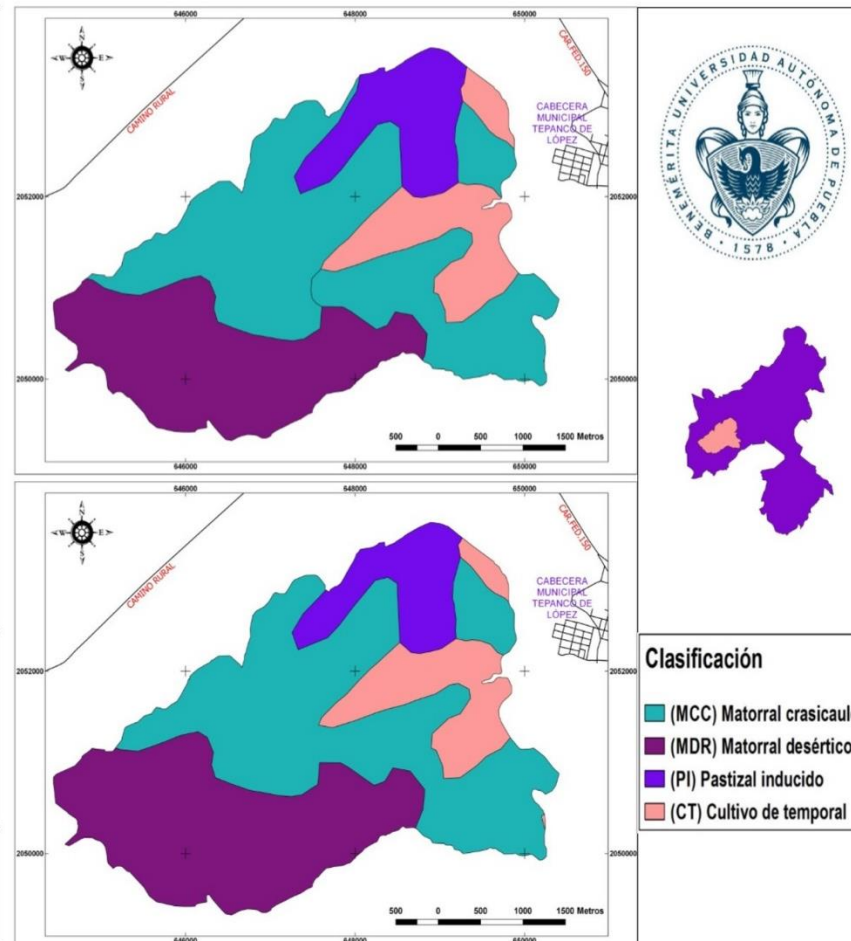


Figura 22. Mapa comparativo espacial de uso de suelo 1997-2003.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

Dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación (2003-2013)

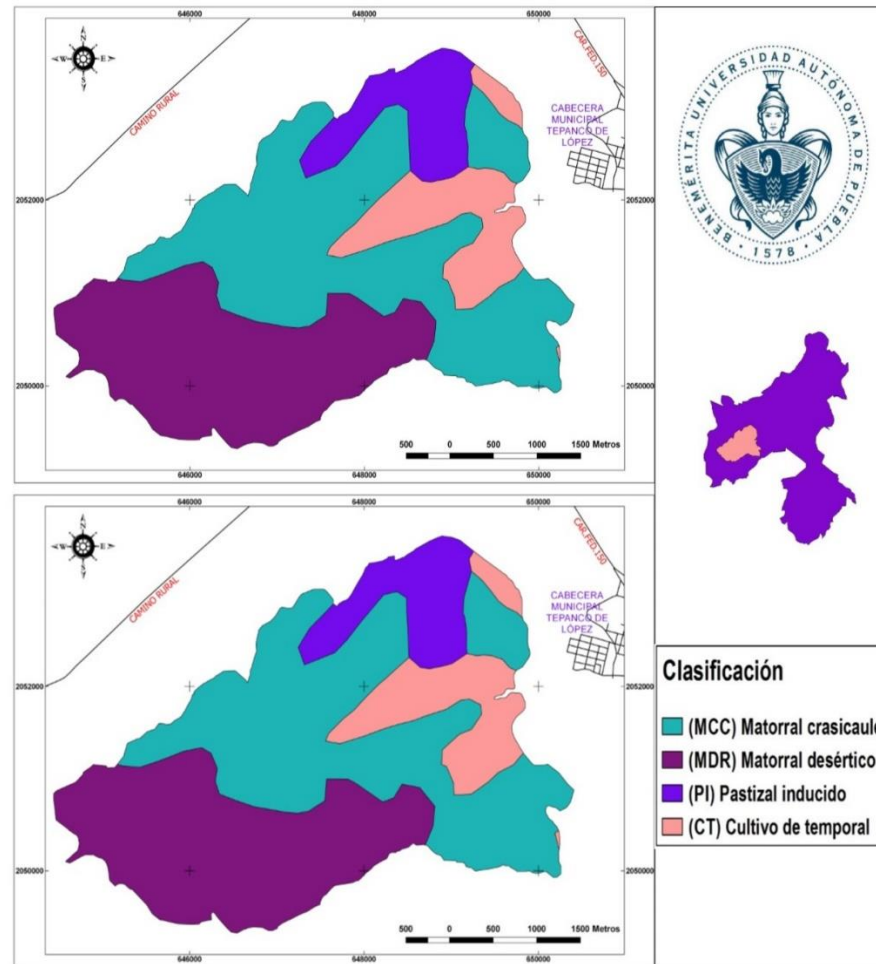
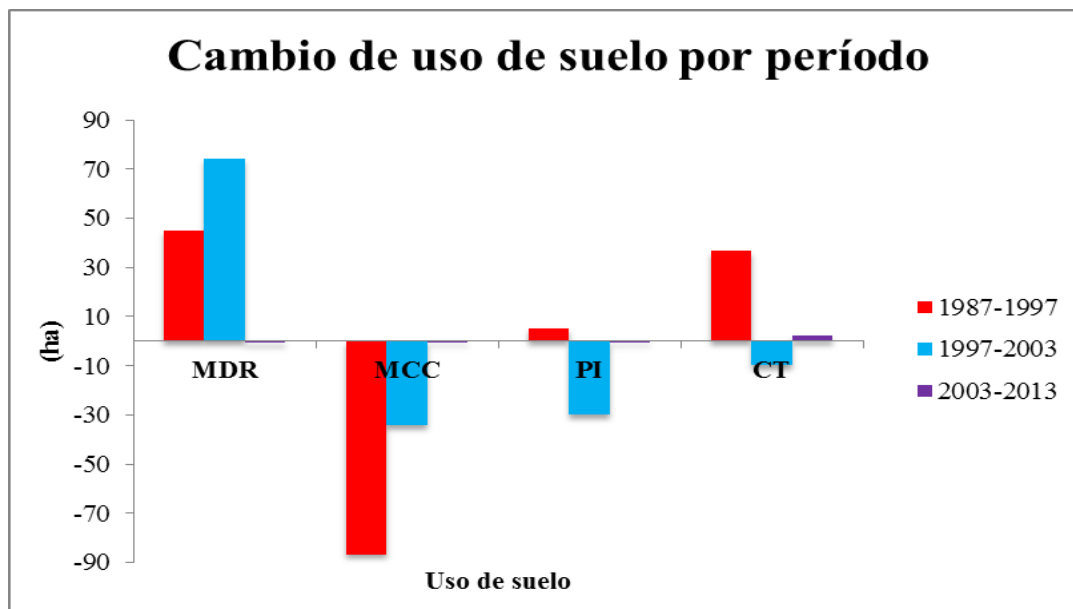


Figura 23. Mapa comparativo espacial de uso de suelo 2003-2013.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

Cuadro 13. Tasa de cambio de uso del suelo, 1987-2013

Uso de suelo	Cambio (ha)			Cambio (%)			Tasa de Cambio		
	1987-1997	1997-2003	2003-2013	1987-1997	1997-2003	2003-2013	1987-1997	1997-2003	2003-2013
MDR	45.07	74.40	-0.88	3.04	5.02	-0.06	1.11	2.68	-0.02
MCC	-86.82	-34.38	-0.57	-5.86	-2.32	-0.04	-1.18	-0.85	-0.01
PI	5.19	-30.07	-0.57	0.35	-2.03	-0.04	0.30	-3.11	-0.04
CT	36.56	-9.95	2.02	2.47	-0.67	0.13	2.26	-0.93	0.12



Gráfica 8. Uso de suelo por período evaluado en la Microcuenca.

Durante el primer período (1987-1997), el matorral desértico rosetófilo pasó de 387.2 a 432.3 ha, con una razón de cambio de 1.1% anual, lo cual significó un aumento de este tipo de cobertura en 45.0 ha. En contraste, el matorral crasicuale disminuyó su superficie 5.86%, ya que de 778.09 cambió a 691.2 ha, con una tasa de -1.18% anual. En lo referente al pastizal inducido tuvo un aumento en su cobertura de 5.1 ha, con un razón de cambio del 0.30% anual. Finalmente, el área ocupada para la agricultura de temporal también tuvo un incremento importante en su extensión, pues de representar, en 1987, el 9.88% de la superficie total de la Microcuenca pasó a ser el 12.35% en 1997, es decir, tuvo un crecimiento del 2.47%, con una tasa de cambio del 2.26% anual.

Para el segundo periodo (1997-2003), la superficie de matorral desértico nuevamente se expandió hasta alcanzar las 506.7 ha, por lo que tuvo un crecimiento del 5.02% (74.40 ha) del área total, con una tasa de cambio anual del 2.68%. Por otra parte, la cobertura del matorral

crasicaule pasó de 691.2 a 656.8 ha, perdiéndose así cerca de 34.3 ha y cuya razón de cambio fue de -0.85% anual. Cabe señalar que las coberturas restantes también sufrieron cambios en su extensión territorial, pues tanto el pastizal inducido como el cultivo de temporal se vieron mermadas; para el primero se redujo en 2.03% su territorio, quedando para el año 2003 un total de 143.86 ha de las 173.93 que poseía en 1997, con una tasa de cambio de -3.11% anual; mientras que para el cultivo de temporal se perdieron cerca de 10 ha de las 182.7 que presentaba en 1997 y cuya razón de cambio anual fue de -0.93%.

En el caso del último intervalo de tiempo, 2003 a 2013, los cambios fueron relativamente mínimos, ya que prácticamente las comunidades vegetales conservaron sus superficies. Tal es el ejemplo del pastizal inducido con apenas una razón de cambio de -0.04% anual, quedando así, para 2013, un total de 143.2 ha; el matorral crasicaule disminuyó en un 0.04% (0.57 ha) su superficie, es decir, que de 656.8 pasó a 656.3 ha, por lo cual su tasa de cambio anual fue de -0.01%. A su vez, el matorral desértico pasó de 506.7 a 505.8 ha, perdiendo alrededor de 0.9 ha de superficie, con una razón de cambio de -0,02% anual. Por último, la zona agrícola fue la única que se expandió durante este periodo, debido a que ganó aproximadamente 2 ha más de su superficie, quedando con un área total de 174.8 ha, y una tasa de cambio anual de 0.12%.

Se generaron las matrices de transición y de permanencia desde 1987 a 2013, donde las filas y columnas representan las pérdidas y ganancias que se han producido por cambios de cobertura y uso del suelo, así como también las áreas que han permanecido intactas hasta el 2013 (diagonal principal) (Osuna-Osuna *et al.*, 2015).

En el periodo 1987-1997 la cobertura con mayor superficie era el matorral crasicaule con 778 ha, no obstante a lo largo de este período se conservó únicamente el 81% de su área (630.4 ha). A su vez, el matorral desértico es la vegetación que menos cambio sufrió, ya que se preservó el 99% de su superficie (382.6 ha), ganando además 49.7 ha de matorral crasicaule. El pastizal inducido mantuvo una superficie de 139.8 ha, correspondiente al 83% del territorio de la Microcuenca. La zona de cultivo de temporal preservó un área de 96 ha de las 142.6 ha originales, ganando también una superficie 77.9 ha de matorral crasicaule y 8.8 ha de pastizal para el final del periodo (Cuadro 14).

Cuadro 14. Matriz de transición, 1987-1997

Uso de suelo 1987	Uso de suelo 1997				Total 1987
	MDR	MMC	PI	CT	
MDR	382.65	4.62	0.00	0.00	387.27
MCC	49.70	630.41	20.05	77.92	778.09
PI	0.00	20.09	139.80	8.84	168.74
CT	0.00	36.15	14.08	96.00	146.22
Total 1997	432.35	691.27	173.93	182.78	1,480.32

Durante el segundo periodo (1997-2003) la superficie del matorral desértico fue la de mayor preservación, con un 99% de permanencia. En contraste, el matorral crasicaule y el pastizal inducido fueron los tipos de vegetaciones que tuvieron pérdidas en su extensión territorial, ya que solo se conservaron el 81 y 74 %, respectivamente, de su superficie. En cuanto al área de cultivo de temporal que se transformó en matorral crasicaule fue de 66.3 ha, conservándose así el 64% de su cobertura (116.4 ha) (Cuadro 15).

Cuadro 15. Matriz de transición, 1997-2003

Uso de suelo 1997	Uso de suelo 2003				Total 1997
	MDR	MMC	PI	CT	
MDR	429.81	2.53	0.00	0.00	432.35
MCC	76.93	558.58	14.50	41.25	691.27
PI	0.00	29.44	129.36	15.14	173.93
CT	0.00	66.33	0.00	116.44	182.78
Total 2003	506.74	656.89	143.86	172.83	1,480.32

En el periodo 2003-2013, fue poco el cambio de uso de suelo que se presenta, siendo el matorral desértico la cobertura que prácticamente no transformó, pues tan solo 1.75 ha pasaron a ser parte del matorral crasicaule, por lo tanto el matorral desértico es la cobertura que mayor probabilidad de permanencia ha presentado a través del tiempo. De la misma forma el matorral, el pastizal inducido y el cultivo de temporal conservaron un 99% sus superficies (Cuadro 16).

Cuadro 16. Matriz de transición, 2003-2013

Uso de suelo 2003	Uso de suelo 2013				Total 2003
	MDR	MMC	PI	CT	
MDR	504.99	1.75	0.00	0.00	506.74
MCC	0.87	651.61	1.52	2.89	656.89
PI	0.00	1.82	141.63	0.41	143.86
CT	0.00	1.14	0.14	171.55	172.83
Total 2013	505.86	656.32	143.29	174.84	1,480.32

Finalmente para el periodo de 1987-2013 el matorral desértico es la cobertura que mayor probabilidad de permanencia presentó (99%), ganando a su vez 120.36 ha de matorral casicaule. Con respecto a esta última cobertura, a pesar de tener una amplia superficie, su probabilidad de permanencia es del 68%, con tendencia a transformarse en matorral desértico y zona de cultivo de temporal de 15 y 12% de probabilidad, respectivamente. En el caso del pastizal inducido su permanencia fue del 62%, mientras que la zona de cultivo fue del 41%, no obstante la zona agrícola invadió 95.6 ha de matorral crasicaule y 18 ha de pastizal (Cuadros 17 y 18).

Cuadro 17. Matriz de transición, 1987-2013

Uso de suelo 1987	Uso de suelo 2013				Total 1987
	MDR	MMC	PI	CT	
MDR	385.51	1.77	0.00	0.00	387.27
MCC	120.36	533.13	28.94	95.66	778.09
PI	0.00	45.46	105.18	18.09	168.74
CT	0.00	75.96	9.16	61.09	146.22
Total 2013	505.86	656.32	143.29	174.84	1,480.32

Cuadro 18. Matriz de probabilidad de permanencia de uso de suelo, 1987-2013.

Uso de suelo 1987	Uso de suelo 2013				Total
	MDR	MMC	PI	CT	
MDR	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
MCC	0.15	0.69	0.04	0.12	1.00
PI	0.00	0.27	0.62	0.11	1.00
CT	0.00	0.52	0.06	0.42	1.00

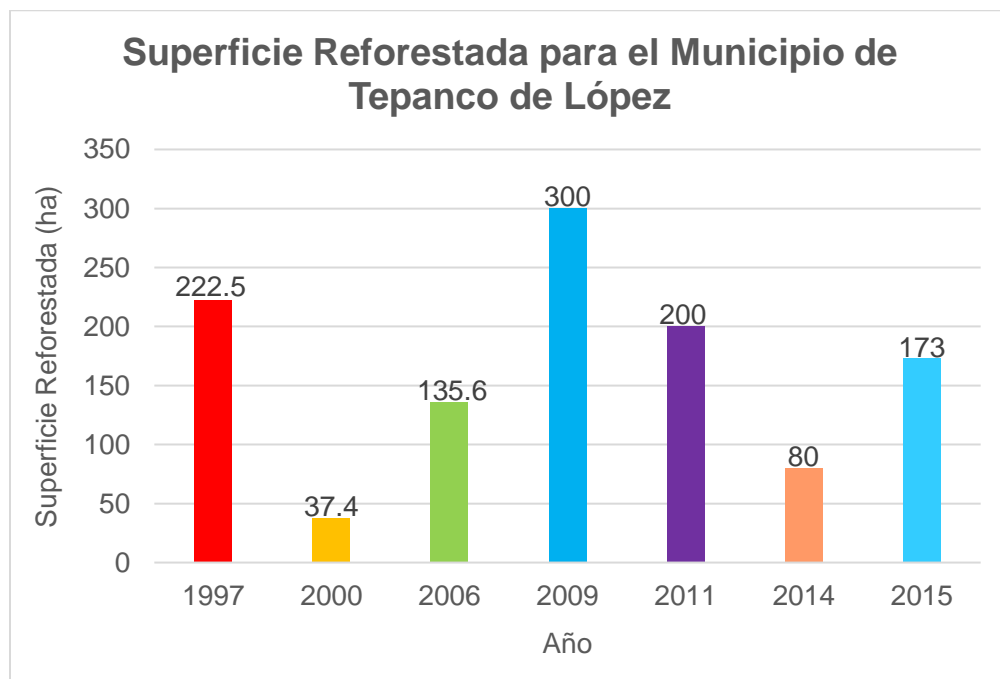
Es importante destacar que dentro del municipio de Tepanco de López, algunos de los factores que han contribuido al cambio en las comunidades vegetales son la agricultura, la actividad ganadera, la extracción de recursos forestales para el autoconsumo así como el saqueo ilegal de especies vegetales de relevancia económica como la palma (*Brahea spp*), biznaga (*Mammillaria*

spp), agave (*Agave spp*) ocote (*Pinus spp*), izote (*Yucca spp*), mezquite (*Prosopis spp*), entre otros, sin olvidar a fenómenos naturales como los incendios forestales que afectan principalmente a las coberturas arbustivas y de pastizales dentro de la región (Cuadro 19) (INEGI, 2016b). No obstante, también se han establecido prácticas que han permitido frenar estos cambios en la cobertura y uso de suelo, ejemplo de ello son los programas sustentables de manejo, uso, conservación aprovechamiento forestal y reforestación como ProÁrbol o el Programa Nacional Forestal (Gráfica 9), así como la implementación de y obras físicas de conservación dirigidos a la recuperación del suelo, mismas que han permitido la permanencia de las comunidades vegetales durante los últimos diez años.

Cuadro 19. Incendios forestales que han afectado al Municipio de Tepanco de López.

Año	Núm. de Incendios	Superficie afectada (ha)	Hierba y arbustos (ha)	Pastos (ha)	Reforestado (ha)	Arbolada (ha)
1998	7	931	443	478	6	4
2000	1	3	3	0	0	0
2001	1	65	15	50	0	0
2002	2	2	0	2	0	0
2004	1	20	0	0	10	10
2005	1	30	0	30	0	0
2013	1	16	16	0	0	0

Fuente: INEGI, 2016b



Gráfica 9. Reforestación para el Municipio de Tepanco de López.
Fuente: INEGI, 2016b.

8.1.5 Análisis Físicoquímico del Suelo

Los resultados obtenidos del análisis físicoquímico se presentan en los Cuadros 20 y 21, en los cuales se clasificaron cinco sub-zonas de muestreo: 1) Zona con obras de conservación del tipo zanjas bordo y con plan de reforestación de agave y mezquite (AP1) (Figura 24); 2) Zona con obras de conservación del tipo muros de contención (AP2) (Figura 25); 3) Zona con obras de conservación del tipo gaviones (AP3) (Figura 26); 4) Zona sin prácticas de conservación y perturbada (SPP) (Figura 27); y 5) Zona de encino y palma relativamente conservada aunque sin ninguna medida de conservación (SPC) (Figura 28). Aunado a lo anterior se muestra la comparación estadística de las áreas donde se presenta algún tipo de obra de conservación (AP1, AP2, AP3) con respecto a aquellas que no tienen y están perturbadas (SPP), dicha comparación se realizó mediante un Análisis de Varianza de una vía (ANOVA, por sus siglas en inglés) y una prueba LSD de Fisher, ambas a un nivel de significancia de 0.05 (Cuadro 22).



Figura 24. Zona de zanjas bordo y plan de reforestación con agave y mezquite
Fotografía de: Ramírez-García, A.



Figura 25. Zona de muros de contención.
Fotografía de: Ramírez-García, A.



Figura 26. Zona de gaviones.
Fotografía de: Ramírez-García, A.



Figura 27. Zona sin prácticas de conservación y perturbada.
Fotografía de: Ramírez-García, A.



Figura 28. Zona de encino y palma sin prácticas de conservación.
Fotografía de: Ramírez-García, A.

Cuadro 20. Propiedades físicas del suelo evaluadas.

Sub-zona de Muestreo	Clave	D.A (g/cm ³)	Textura			
			% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase Textural
Zanja Bordo y Reforestación	AP1	1.03 ± 0.08	33.50 ± 6.80	42.00 ± 10.67	24.50 ± 13.04	Franco-Arcillosa
Muro de Contención	AP2	0.85 ± 0.07	23.11 ± 5.64	32.00 ± 12.0	44.89 ± 16.49	Franca
Gavión	AP3	0.91 ± 0.05	27.46 ± 11.10	48.50 ± 11.0	24.04 ± 9.03	Franca
Sin Protección Perturbada	SPP	0.92 ± 0.09	22.96 ± 3.17	27.50 ± 3.79	49.54 ± 4.56	Franco-Arcillo-Arenosa
Sin Protección Conservada	SPC	0.84 ± 0.22	29.97 ± 3.60	31.43 ± 4.12	38.60 ± 5.29	Franco-Arcillosa

Cuadro 21. Propiedades químicas del suelo evaluadas.

Sub-zona de Muestreo	Clave	pH	C.E (dS/m)	% N total	% M.O	CIC (Cmol (+) Kg ⁻¹)	Bases Intercambiables (Cmol (+)Kg ⁻¹)			
							Na	K	Ca	Mg
Zanja Bordo y Reforestación	AP1	7.4 ± 0.21	1.85 ± 0.44	0.61 ± 0.38	6.56 ± 1.61	20.32 ± 9.5	0.35 ± 0.05	0.67 ± 0.34	17.78 ± 0.37	1.34 ± 0.27
Muro de Contención	AP2	7.7 ± 0.4	1.7 ± 0.53	0.57 ± 0.49	9.48 ± 1.94	23.70 ± 10.2	0.25 ± 0.06	0.93 ± 0.74	17.94 ± 0.89	1.91 ± 0.93
Gavión	AP3	7.8 ± 0.28	1.74 ± 0.31	1.06 ± 0.91	9.28 ± 0.46	22.45 ± 13.3	0.37 ± 0.24	0.91 ± 0.49	18.57 ± 0.46	1.77 ± 0.66
Sin Protección Perturbada	SPP	7.8 ± 0.45	1.93 ± 0.62	0.50 ± 0.15	7.73 ± 1.66	26.46 ± 17.7	0.31 ± 0.13	1.09 ± 0.49	18.36 ± 0.15	4.34 ± 3.36
Sin Protección Conservada	SPC	6.5 ± 0.62	1.59 ± 1.50	NA	10.7 ± 12.32	34.86 ± 7.67	0.41 ± 0.01	1.67 ± 0.51	NA	NA

NA= No Analizada.

Cuadro 22. Tabla ANOVA de las propiedades fisicoquímicas evaluadas.

	D.A (g/cm ³)	pH	C.E (dS/m)	% M.O	% N Total	CIC (Cmol (+)Kg ⁻¹)	Na (Cmol (+)Kg ⁻¹)	K (Cmol (+)Kg ⁻¹)	Ca (Cmol (+)Kg ⁻¹)	Mg (Cmol (+)Kg ⁻¹)
ANOVA (p-Value)	0.0055	0.0477	0.9033	0.0148	0.4776	0.9029	0.6278	0.6095	0.1022	0.0847
Obra (LSD de Fisher)	Gavión - Zanja Muros - Zanja SPP - Zanja	Gavión - Zanja SPP - Zanja		Gavión - Zanja Muros - Zanja						

* Nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

En primera instancia, las propiedades físicas que se analizaron fueron la densidad aparente y la textura (Cuadro 20). Acorde a la clasificación textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (Cuadro 23) y de manera general, los suelos de la Microcuenca Cacaloapan se clasifican como Francos. Aunque, específicamente, aquellos cuya clase textural es Franco-Arcilloso (AP1 y SPC) y Franco-arcillo-arenoso (SPP) corresponden a texturas moderadamente finas, mientras que para los catalogados Franca (AP2 y AP3) la textura es media (FAO, 2017c; Honorato-Pinto, 2000).

Cuadro 23. Clases texturales de suelos, según el USDA.

Textura	Clase Textural	
Textura Gruesa	Arenoso Arenoso-Franco	Suelos Arenosos
Textura moderadamente gruesa	Franco-Arenoso	Suelos Francos
Textura media	Franco Franco-Limoso Limoso	
Textura moderadamente fina	Franco-Arcilloso Franco-Areno-Arcilloso Franco-Limoso-Arcilloso	
Textura Fina	Arcilloso-Arenoso Arcilloso-limoso Arcilloso	Suelos Arcillosos

Fuente: FAO, 2017c.

En base a los valores de densidad aparente (D.A) y conforme a lo establecido por la NOM-021-SEMARNAT-2000, estos suelos son valorados como orgánicos, exceptuando el correspondiente a la zona AP1 que se considera como suelo arcilloso. Asimismo la prueba ANOVA (Cuadro 22) demuestra que dicha zona es la que presenta mayor densidad aparente ($p\text{-value} = 0.0055$), por tanto mayor compactación, en comparación a los otros sitios muestreados. Esto debido a que la zona de zanjas bordo, y de acuerdo a lo narrado por el consejo de vigilancia de los Bienes comunales y lo reportado por INEGI en 2005 (INEGI, 2016b), anteriormente era una región de pastoreo caprino que sufrió de un incendio forestal el cual disminuyo gran parte de su cobertura vegetal. En contraste a lo anterior, el suelo con menor densidad aparente es para la zona denominada SPC, esto debido a que presenta una vegetación abundante con formas de vida arbóreas los cuales contribuyen al aumento en el porcentaje de Materia Orgánica (M.O), propiedad química que está relacionada a la densidad del suelo (Salamanca-Jiménez y Sadeghian-Khalajabadi, 2005).

En cuanto a las propiedades químicas (Cuadro 21) encontramos que en las regiones donde se encuentran las obras de conservación así como la zona perturbada presentan suelos ligeramente salinos (pH 7.4–7.8), mientras que para la zona correspondiente al bosque de encino y palma estos son moderadamente ácidos (pH 6.5) (NOM-021-SEMARNAT-2000). Cabe mencionar que al realizar el análisis estadístico para esta propiedad (Cuadro 22) se obtuvo que tanto la zona de los gaviones y del área perturbada difieren significativamente con respecto a la región de reforestación (p -value= 0.0477), esto debido a que, tanto en los sedimentos como el suelo de los gaviones y el área perturbada respectivamente, contienen un importante contenido de material parental (roca caliza) en formas de gravas, esto como resultante de los procesos erosivos y las condiciones topográficas en dichas zonas.

Por otra parte, las características de pH junto con la textura y el alto porcentaje de materia orgánica (M.O) indican que la región con prácticas de conservación presentan Capacidades de Intercambio Catiónico (CIC) medias, mientras que para las zonas sin conservación la CIC es alta (NOM-021-SEMARNAT-2000). Esto debido a que los suelos con altos contenidos en arcillas y materia orgánica, como los del bosque de encino y palma, presentan a su vez una alta CIC, lo cual brinda una mayor capacidad de retener nutrientes (Paz-González, Toba-Castro y Gómez-Suárez, 1997). Además de que conforme el pH del suelo aumenta de neutro a alcalino, también lo hace la CIC y el porcentaje de bases saturadas, ya que en las regiones áridas y semiáridas los cationes más abundantes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ (Honorato-Pinto, 2000). Asimismo es importante señalar que la prueba ANOVA para el porcentaje de materia orgánica es significativa al contrastar las zonas AP2 y AP3 contra la AP1, ya que esta última es la que menor porcentaje presenta con respecto a los demás sitios muestreados (Cuadro 22).

Por otra parte el porcentaje de nitrógeno, en base a la categorización de la NOM-021-SEMARNAT-2000, está clasificado como alto tanto para la región de conservación como para la zona sin protección-perturbada. Aunque de forma específica al comparar dichas zonas, se observa que la zona de gaviones (AP3) es la que presenta mayor porcentaje de nitrógeno total (1.06%), seguida de la zona con zanjas bordo (AP1) con 0.61%, mientras que el menor fue para la zona perturbada (0.5%), no obstante estas diferencias de porcentaje estadísticamente no son significativas (Cuadro 22). Cabe resaltar que el proceso de nitrificación en zonas áridas se da en parches, de manera heterogénea, en respuesta a condiciones de microclima y aporte de materia orgánica de plantas presentes en islas de fertilidad. Además de que la actividad microbiana se presenta durante lapsos breves de tiempo, generalmente posteriores a periodos de precipitación,

mientras que en sequía el nitrógeno disponible se acumula, puesto que tanto los organismos microbiológicos como vegetales disminuyen su actividad metabólica durante esa época de estrés hídrico (Celaya-Michel y Castellanos-Villegas, 2011).

De esta forma, si bien las obras de conservación aún no muestran la recuperación paulatina de todas las propiedades fisicoquímicas originales de estos suelos, si contribuyen a frenar el constante arrastre del suelo y los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal por efecto de la erosión. Pues cabe señalar que, en comparación al tiempo que se requiere para la formación y recuperación del recurso suelo mediante los procesos de génesis, el tiempo de construcción de las obras de protección ha sido corto (Silva-Arroyave y Correa-Restrepo, 2009).

8.1.5 Erosión.

La degradación de los suelos se entiende como una disminución de la productividad actual o potencial de estos, como consecuencia del mal uso y manejo de la tierra (Vega-Carreño y Febles-González, 2005). Siendo los principales tipos de degradación la salinización, acidificación, contaminación, encostramiento, compactación, mineralización de la materia orgánica y la erosión (Maya, 2011; Pando-Moreno, Gutiérrez-Gutiérrez, Maldonado-Hernández, Palacio-Prieto y Estrada-Castillón, 2003). Esta última se define como la eliminación acelerada de la capa superior del suelo debido al desprendimiento, transporte y depósito de las partículas que lo conforman por acción de agentes erosivos como del agua, el viento o la labranza (Bolaños, *et al.*, 2016; Flores-López, De la Mora-Orozco, Ruíz-Corral y Chávez-Durán, 2013). Además, dicho proceso está estrechamente vinculado con la desertificación, el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, consecuencias que a su vez acentúan los índices de pobreza y migración, la disminución de la productividad agrícola, el abandono de tierras y la pérdida de cultura (Bolaños *et al.*, 2016; Huerta-Fernández y Loli-Figueroa, 2014).

8.1.8.2.1 Erosión hídrica potencial.

Dentro de las diversas metodologías para evaluar la erosión hídrica, se encuentra el empleo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica, los cuales permiten evaluar riesgo de erosión, es decir, el

efecto combinado de los factores causales de la erosión: lluvia, escurrimiento, suelo vegetación y topografía (Montes-León, Uribe-Alcántara y García-Celis, 2011).

En base a lo anterior se presenta el mapa de la erosión hídrica potencial para la Microcuenca Cacaloapan (Figura 29), el cual está en función al grado de erosión establecido por la FAO (Cuadro 24). También se incluye el mapa de pendientes, que regionaliza aquellas áreas con pendientes escarpadas (de hasta 40.6°) así como las que están poco inclinadas (2.4°) (Figura 30).

De esta forma se observa que cerca del 50% (7.4 Km²) del territorio presenta un grado de erosión moderado, el cual se distribuye en gran parte de la superficie de la zona de estudio. A su vez, el 25.6% de la superficie presentan un grado nulo de erosión con una pérdida anual de entre 0 a 5 toneladas por hectárea, y que se encuentra concentrado en la porción norte de la microcuenca, donde predomina la zona de pastizal, matorral crasicaule y la regiones con pendientes llanas. Mientras que el 12.6% de la Microcuenca corresponde a un grado de erosión alto, debido a que en dicha zona se encuentran regiones de serranía y pendientes escabrosas, por lo que deben considerarse como áreas de riesgo en el cual implementar programas de conservación; cabe señalar que las tendencias de distribución de este grado de erosión son hacia el centro de la microcuenca afectando las comunidades vegetales de matorral crasicaule y desértico rosetófilo. Por otra parte el grado de erosión ligera corresponde al 11.3% del territorio con 1.6 Km², ubicándose principalmente en zonas poco escarpadas. Por último solo el 0.1% de la superficie de la zona de estudio presenta un grado de erosión muy alto.

Cuadro 24. Grado y porcentaje de erosión hídrica para la Microcuenca Cacaloapan.

Grado de erosión hídrica	Rango	Superficie (Km ²)	%
Nula	<5	3.78	25.6
Ligera	5 a 10	1.66	11.3
Moderada	10 a 50	7.42	50.4
Alta	50 a 200	1.85	12.6
Muy alta	>200	0.014	0.1

Erosión Hídrica Potencial

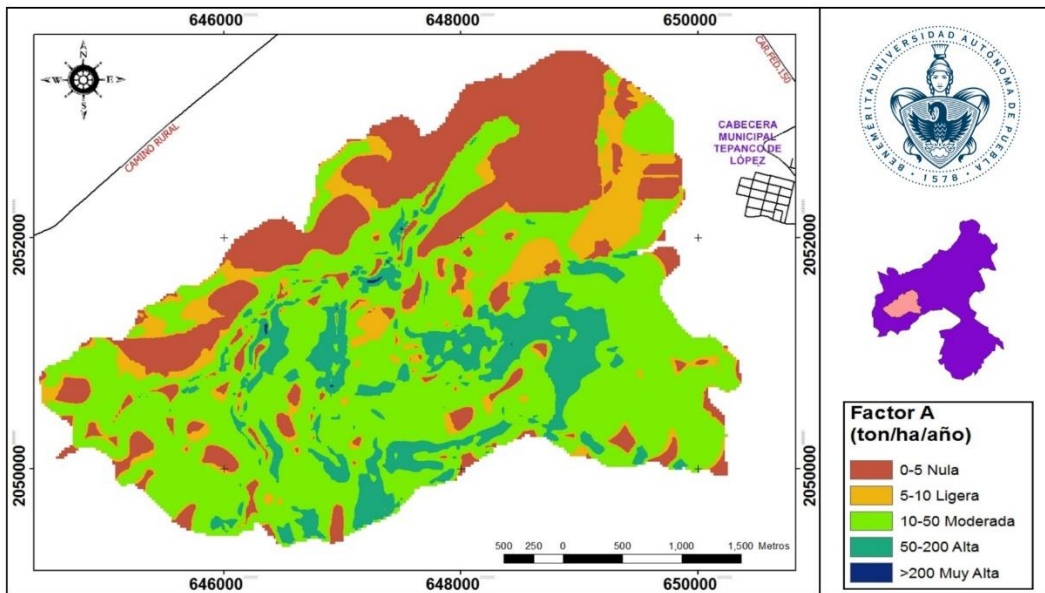


Figura 29. Mapa de Erosión hídrica potencial (Factor A).
Elaborado por: Ramírez-García, A.

Mapa de Pendientes

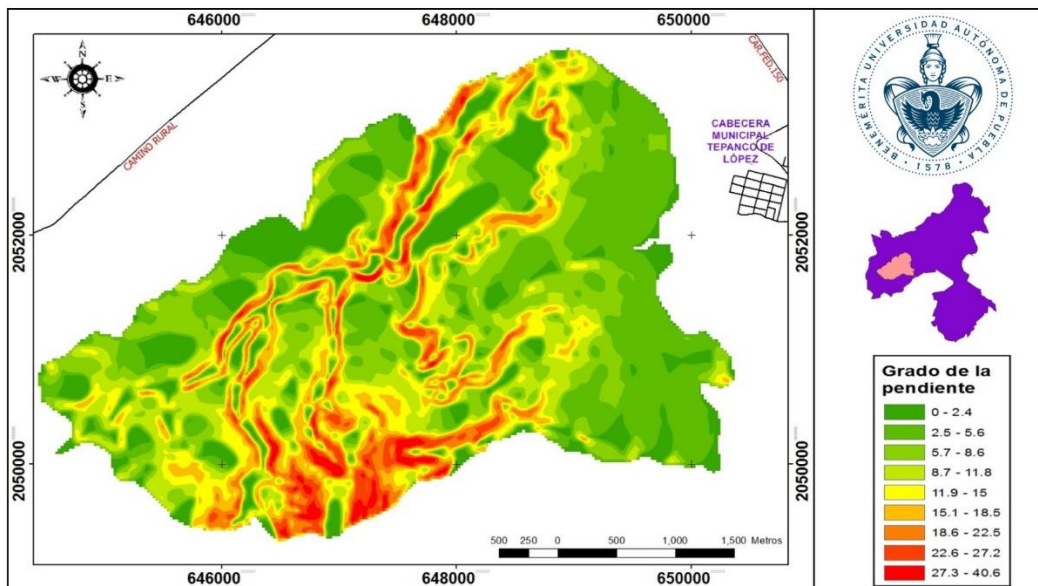


Figura 30. Mapa de pendientes.
Elaborado por: Ramírez-García, A.

Así pues, la cobertura vegetal y el uso del suelo son factores determinantes para la erosión hídrica del suelo, puesto que los cambios en las comunidades vegetales incrementan el riesgo de degradación, resultando así en el desarrollo de cárcavas, incremento en la carga de sedimentos en ríos y formación de nuevas estructuras sedimentarias como terrazas fluviales y deltas. Asimismo el relieve influye directamente en los procesos erosivos ya que entre más escarpado sea el terreno, o el sistema de topoformas presente pendientes pronunciadas como el caso de las serranías y lomeríos, mayor será el grado de erosión hídrica y eólica (Nájera-González, Bojórquez-Serrano, Flores-Vilchez, Murray-Núñez y González-García-Sancho, 2016; Bolaños-González, Paz-Pellat, Cruz-Gaistardo, Argumedo-Espinoza, Romero-Beníte y de la Cruz-Cabrera, 2016).

8.1.8.2.2 Erosión eólica potencial.

En México, la erosión eólica es un proceso de degradación que afecta principalmente las regiones secas del país. Sus causas se atribuyen a una insuficiente protección del suelo por la cubierta vegetal, destrucción de la estructura del suelo, velocidad viento alta y niveles bajos de humedad (Návar y Treviño, 1997; SEMARNAT, 2012a). No obstante, son muy pocas las investigaciones que existen acerca de los procesos de erosión eólica, por ende las metodologías para su análisis no son del todo claras (Gómez, Monterroso y Lechuga, 2014; Návar y Treviño, 1997; Torres-Benites *et al.*, 2003). Pese a ello, el presente trabajo se enfocó en hacer una estimación de la erosión eólica para la microcuenca Cacaloapan en base al uso de la Ecuación de la Erosión Eólica mediante el análisis cartográfico y el de datos climatológicos proporcionados por el Sistema Nacional Meteorológico (SNM, por sus siglas), los cuales abarcaron un periodo de 90 días iniciando desde el 17 de Mayo al 15 de Agosto del presente año. Obteniéndose así que el grado de erosión potencial que predomina en la región de estudio es el moderado, con el 96.8% de la superficie abarcada y donde anualmente se pierden entre 10 y 50 toneladas por hectárea aproximadamente. Por otra parte el grado de erosión ligero abarca una extensión total de 0.24 Km², distribuidos en islas dentro de regiones de llanura con coberturas de pastizal, matorral crasicaule y cultivo de temporal que protegen al suelo de la acción del viento. Finalmente el grado severo corresponde a 1.6% del área de estudio, cuya máxima pérdida por erosión eólica es de 68 toneladas por hectárea al año, cabe destacar que este tipo de erosión se localiza en regiones de matorral desértico rosetófilo, con paisajes de lomerío y sierra de cumbres tendidas (Cuadro 25 y Figura 31).

Cuadro 25. Grado y porcentaje de erosión eólica para la Microcuenca Cacaloapan.

Grado de erosión eólica	Rango	Superficie (Km ²)	%
Ligera	0 a 10	0.24	1.6
Moderada	10 a 50	14.19	96.8
Alta	50 a 200	0.23	1.6

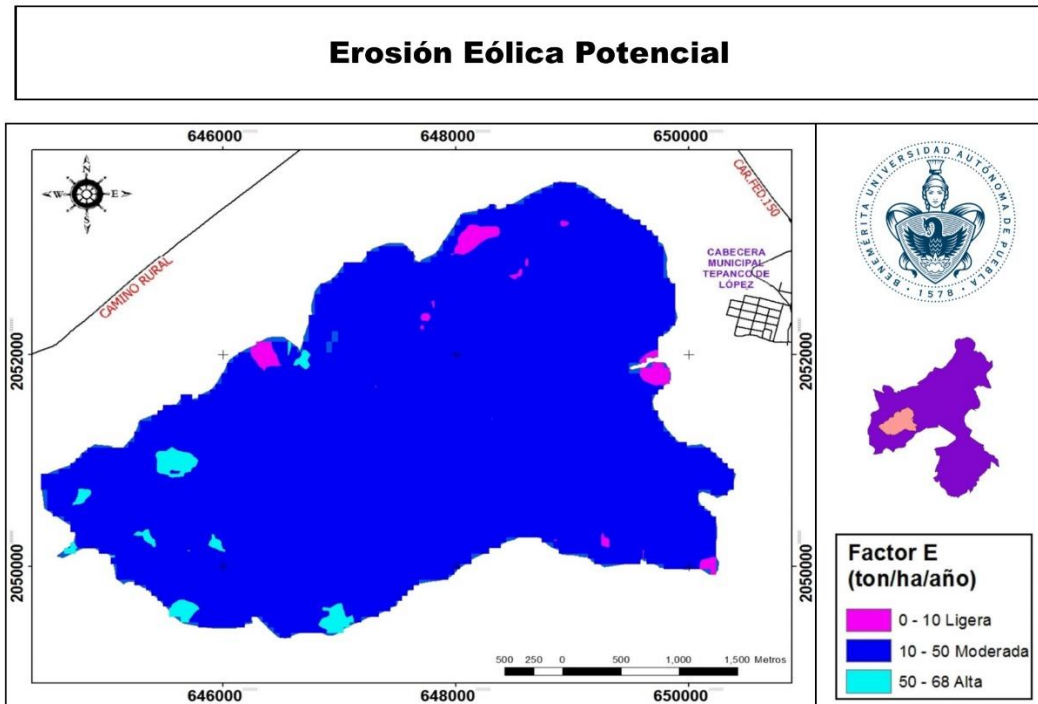


Figura 31. Mapa de Erosión eólica potencial (Factor A).
Elaborado por: Ramírez-García, A.

8.2 Subsistema Político- Socioeconómico.

8.2.1 Población.

Específicamente para el Municipio poblano de Tepanco de López, los datos poblacionales obtenidos durante el período de tiempo de 1970 al 2015 se encuentran representados en los Cuadros 26 y 27 así como en la Gráfica 10. Donde la población total para los años de 1970 y 2015 es de 7,483 y 20,580 individuos respectivamente, mostrándose un crecimiento aproximado de 13,097 habitantes durante este intervalo de tiempo, siendo la población femenina la predominante con más del 50% de los residentes.

Para 1970 y 1980, el rango de edad comprendido entre 0-9 años fue el que presentó mayor número de individuos (2,027 niños), seguido de la población adolescente (1,697 sujetos) cuyo intervalo de edad está dado de los 10-19 años, con una subsecuente disminución para el resto de los rangos de edad. No obstante, a partir de 1990 y hasta 2015 esta tendencia cambia, ya que la población preponderante tiene edades entre los 20 y 40 años. Cabe destacar que tanto para 1990 y 2000 la población infantil se convierte en segunda más abundante con 4,207 y 4,420 individuos respectivamente, en contra parte, para el 2010 y 2015 el rango que ocupa el segundo puesto es el comprendido entre 10-19 años. Finalmente los habitantes en etapa madura y senil son los que menos representación tuvieron durante el intervalo de 1970 a 2015 (INEGI, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010, 2015; SNIM, 2016).

Cuadro 26. Población total en Tepanco de López.

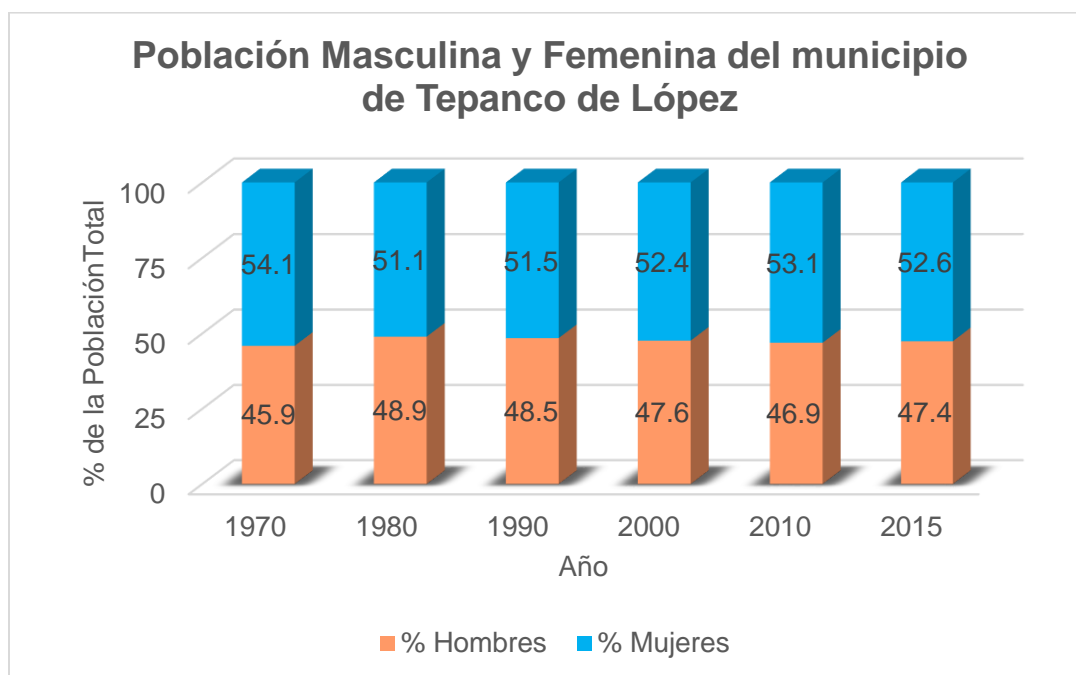
Año	Población Total	Población Masculina	Población Femenina
1970	7,483	3,435	4,048
1980	10,721	5,247	5,474
1990	13,137	6,365	6,772
2000	16,717	7,961	8,756
2010	19,002	8,916	10,086
2015	20,580	9,758	10,822

Fuente: INEGI, (1970; 1980; 1990; 2000; 2010; 2015).

Cuadro 27. Población por rango de edad.

Rango de Edad	Año					
	1970	1980	1990	2000	2010	2015
0 a 9	2,703	3,528	4,207	4,420	4,342	4,228
10 a 19	1,697	2,818	3,254	4,121	4,406	4,342
20 a 39	1,619	2,468	3,450	4,692	5,674	6,453
40 a 59	922	1,308	1,431	1,976	3,157	3,865
60 y más	542	594	771	1,118	1,419	1,686

Fuente: INEGI, (1970; 1980; 1990; 2000; 2010; 2015).



Gráfica 10. Porcentaje de población masculina y femenina en Tepanco de López.

8.2.2 Características Económicas.

Algunos de los principales indicadores a tomar en cuenta en materia de economía son la Población Económicamente Activa (PEA, por sus siglas) y la tasa de participación económica. Para la región de estudio, durante el año de 1990, la población de 12 años y más que trabajaba o estaba en busca de empleo era de 3,191 individuos, es decir el 39.2% de la población. Entretanto para el 2000 la tasa de participación incremento hasta el 46.7% (5,152 personas) con respecto a la población total (16,717 habitantes). Asimismo en 2010 la PEA contó con 9,026

sujetos, teniendo una tasa de participación del 47.4%(Cuadro 28) (INEGI, 1990, 2000, 2010; SNIM, 2016). Finalmente, para el 2010 la población en situación de pobreza era del 74.04% (14,940 individuos), del cual el 19.96% se clasifica como extrema, mientras que el 54.08% (10,913 residentes) como moderada (CEIGEP, 2016).

Cuadro 28. Indicadores Económicos en Tepanco de López.

Año	Población económicamente activa (P.E.A)	Tasa de participación
1990	3,191	39.27
2000	5,152	46.75
2010	9,026	47.48

Fuente: INEGI (1990; 2000; 2010)

8.2.3 Actividad Agropecuaria.

En el caso del Municipio de Tepanco de López las principales actividades agropecuarias que se llevan a cabo son la agricultura y la ganadería. Siendo la producción de maíz, frijol, jitomate, alfalfa y carne los más destacados (INEGI, 2016b).

La agricultura en el municipio se caracteriza por presentar cultivos bajo sistema de riego en invernadero, ejemplo de ello es la producción jitomate, tomate, alfalfa, lechuga, calabacita, maíz y frijol, no obstante estos dos últimos también se desarrollan como cultivos de temporal a cielo abierto, aunque en menor extensión debido a su baja productividad (INEGI, 2016b). Al analizar el intervalo de tiempo comprendido entre 1991 y 2014, se observa un aumento de la superficie cultivo en 2,944 hectáreas, donde los años 2001 y 2011 son los más productivos con un volumen de cosecha de 65,065 y 72,896 toneladas respectivamente, no obstante en cuanto a ganancias económicas es el 2011 el que mayor valor productivo presenta con \$144, 571.⁰⁰ pesos mexicanos, seguido del 2014 con \$81,813.⁰⁰ pesos (Cuadro 29).

Para ese mismo periodo de tiempo, la producción de las granjas porcinas y avícolas pertenecientes al municipio, fue la más lucrativa para la región. Destacándose así el año 2006 por presentar la mayor productividad tanto de cerdos y aves de corral como de abejas. Por otra parte, el año 2000 contó con el mayor número individuos bovinos, caprinos, equinos y guajolotes. Sin embargo, es importante destacar que en 2007 la producción de especies ganaderas se vio

mermada en cuanto al número de cabezas, mas no así en su valor productivo el cual fue de \$2,070,684⁰⁰ pesos mexicanos (Cuadro 30).

Cuadro 29. Producción agrícola en Tepanco de López.

Año	Superficie Sembrada (ha)	Volumen de Producción (ton)	Valor de Producción (miles de pesos)
1991	2,909	24,940	12,337
1994/95	5,655	37,932	36,798
2001	6,037	65,065.5	38,647.7
2006	5,698	47,070	34,465
2011	5,640	72,896	144,571
2014	5,853	46,771	81,813

Fuente: INEGI, 2016b.

Cuadro 30. Producción ganadera en Tepanco de López.

Año	Cabezas								Valor de producción (miles de pesos)
	Bovinos	Porcinos	Ovinos	Caprinos	Equinos	Aves	Guajolotes	Abejas	
1991	3,069	103,790	13,158	25,351	0	1,289,902	709	316	214.2
1993	2,985	141,495	13,616	28,393	1,273	1,800,760	1,500	750	432,285.12
2000	5,250	136,496	12,900	28,500	1,870	3,376,883	3,200	950	524,259.66
2006	3,356	290,319	8,174	12,167	996	4,295,000	1,784	1,149	1,009,928.7
2007	1,510	77,223	9,836	5,436	927	ND	ND	106	2,070,684.7
2014	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2,463,497.1

ND= Información no disponible.

Fuente: INEGI, 2016b.

8.2.4 Educación.

El analfabetismo para el Municipio de Tepanco de López decreció durante el periodo de 1995-2015, ya que de representar el 16 % de la población de 15 años y más, en 1995, pasó a tener 8% en 2015. Además se observa que durante los años de 1970 y 1980 el número de personas que terminaban la educación primaria se incrementó de 3,871 a 5,548, no obstante en 1990 la población estudiantil que concluía el nivel básico decayó hasta el 6%, aunque posteriormente se recuperó, pues en 2015 el porcentaje de los residentes que tenía la primaria completa alcanzó el 60% de la población de 15 años y más (8,443 residentes) (Cuadro 31 y Gráfica 11). Es importante resaltar que un considerable porcentaje de los pobladores en Tepanco de López no terminaba su educación primaria durante los años de 1990, 2000 y 2005 (24, 22 y 19% respectivamente), sin

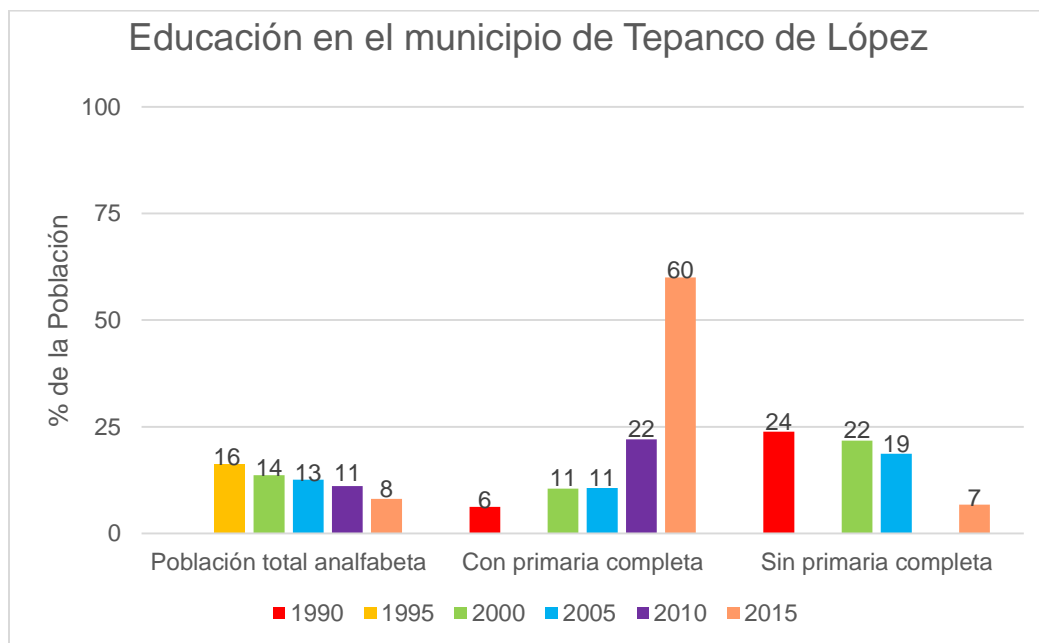
embargo, es en 2015 cuando la tasa de deserción desciende hasta el 7% (945 habitantes) (INEGI, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015; SNIM, 2016). Finalmente en el 1990 la condición de rezago educativo afectó al 40.74% de la población (6.809 individuos), mientras que para 2015 se calculó en 28.6% (SEDESOL, 2017)

Cuadro 31. Población analfabeta de 15 años y más, en Tepanco de López.

Año	Población total analfabeta	Con primaria completa	Sin primaria completa	Rezago educativo (%)
1970	2,023	3,671	ND	ND
1980	1,995	5,548	ND	ND
1990	ND	1,422	5,170	40.74
1995	1,346	ND	ND	ND
2000	1,317	2,781	6,049	29.95
2005	1,337	2,881	5,305	ND
2010	1,393	2,763	ND	34.99
2015	1,142	8,443	945.5	28.60

ND= Información no disponible.

Fuente: INEGI, (1990; 1995; 2000; 2005; 2010; 2015).



Gráfica 11. Porcentaje de la población analfabeta, con y sin primaria concluida de 15 años y más, para Tepanco de López.

8.2.5 Población Indígena.

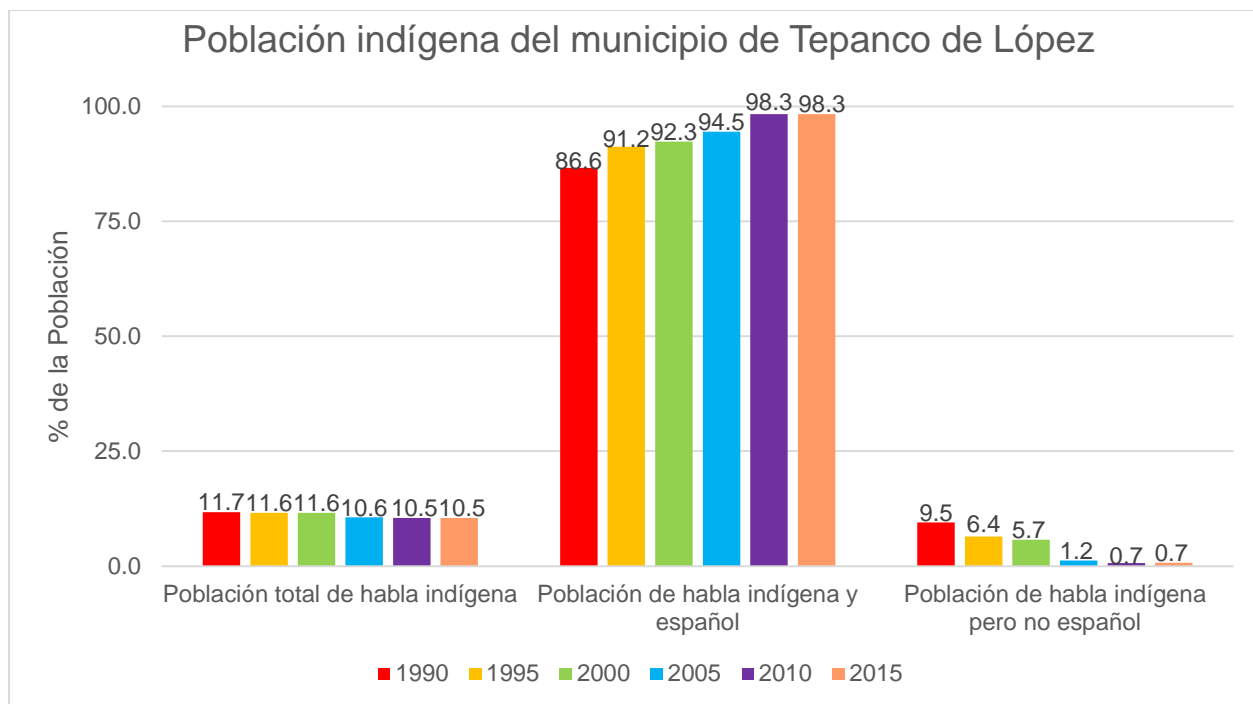
En México la composición de la población indígena es heterogénea, además de que se trata de una de las de mayor diversificación en el mundo. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015c), determina que para el municipio de Tepanco de López el Náhuatl, Popoloca y Mazateco son las lenguas indígenas de mayor habla, aunque también se encuentra el Mixteco, Chocho, Zapoteco, Mazahua, Otomí, Tzeltal, entre otros (SNIM, 2016).

En el Cuadro 32, se presentan los datos encontrados para el rango de tiempo comprendido de 1980 a 2015, siendo este último el que mayor número de residentes exhibió. No obstante al evaluar el intervalo de 1990-2015 se puede observar que 2015 presentó apenas el 10.5% de la comunidad de habla indígena de 3 años y más, siendo junto con el 2005 y 2010, el de menor densidad poblacional étnica. Por otra parte es importante destacar que de 1990 a 2015 la población apenas se ha reducido en un 1.2% (Gráfica 12). Asimismo se denota que la mayor parte de la sociedad indígena habla también el idioma español (INEGI, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010; 2015).

Cuadro 32. Población de habla indígena de 3 años y más, en Tepanco de López.

Año	Población total de habla indígena	Población de habla indígena y español	Población de habla indígena pero no español
1980	1,276	1,105	121
1990	1,287	1,174	83
1995	1,464	1,445	18
2000	1,659	1,532	95
2005	1,595	1,493	18
2010	1,883	1,779	23
2015	2,029	1,995	14

Fuente: INEGI, (1980; 1990; 1995; 2000; 2005; 2010; 2015).



Gráfica 12. Población indígena de 3 años y más, en Tepanco de López.

8.2.6 Desarrollo Humano.

El índice de desarrollo humano para la región de Tepanco de López entre 1995-2010 se presenta el Cuadro 33. De manera general se ha visto un aumento considerable de 0.14 puntos en estos años, ya que para 1995 el IDH era de 0.65, mientras que para el 2010 fue de 0.81, pasando de un estatus medio a alto. Es importante destacar que el año 2005 fue el que mayor puntajes tuvo con 0.89, sin embargo, para el 2010 el puntaje bajó 0.08 céntimas (COESPO, 2016; SNIM, 2016).

Cuadro 33. Índice y grado de desarrollo humano en Tepanco de López.

Año	Índice de desarrollo humano (I.D.H)	Grado de desarrollo humano
1995	0.67	Medio
2000	0.83	Alto
2005	0.89	Alto
2010	0.81	Alto

Fuente: COESPO, (2016).

8.2.7 Marginación.

Los datos presentados en el Cuadro 34, correspondientes al municipio de Tepanco de López, denotan un alto grado de marginación para los años 2000 y 2005, con un índice de marginación correspondiente a -0.02 y -0.03 respectivamente. Sin embargo, para el 2010 este índice se modificó a 0.13, lo cual revela un grado de marginación medio, es decir, hubo un aumento en la disponibilidad de servicios y oportunidades (COESPO, 2016; SNIM, 2016).

Cuadro 34. Índice y grado de marginación en Tepanco de López.

Año	Índice de marginación	Grado de marginación
2000	-0.02686	Alto
2005	-0.03121	Alto
2010	0.1371	Medio

Fuente: COESPO, (2016).

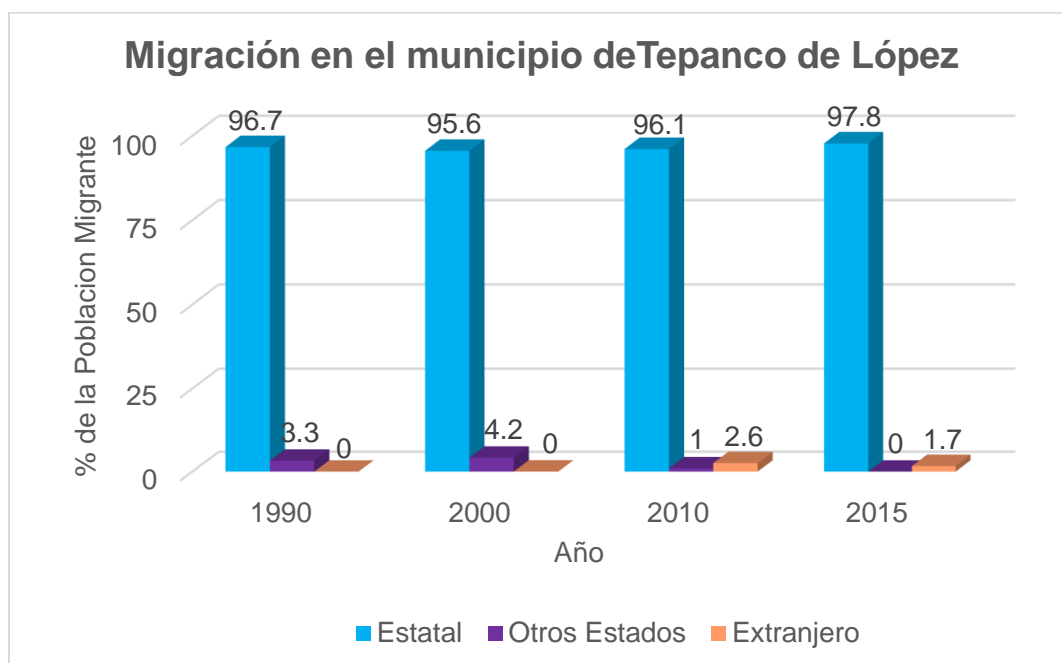
8.2.8 Migración.

A continuación, en el Cuadro 35 se observan las cifras migratorias del municipio de Tepanco de López, para el período que comprende desde el año 1990 al 2015. Nótese que es precisamente este último el que revela un mayor movimiento migratorio de la Población de 5 años y más, con un total de 18,497 individuos, lo cual representa el 89.9 % de la población total en 2015, por tanto el grado de intensidad migratoria es alto. Además se observa que la emigración se realiza principalmente al interior del Estado de Puebla (Gráfica 13), aunque en 1990 y 2000 una pequeña porción de la población migrante, 3.3% y 4.2% respectivamente, se desplazaba hacia otras Entidades federativas, mientras que en 2010 y 2015 el número de sujetos que partía hacia el extranjero fue de 435 y 311.

Cuadro 35. Población migrante de 5 años y más, en Tepanco de López.

Año	Población total migrante	Migrante dentro del Estado	Migrante fuera del Estado	Migrante a otro país
1990	11,028	10,662	362	0
2000	14,280	13,647	599	6
2005	14,908	14,731	103	47
2010	16,949	16,287	170	435
2015	18,497	18,088	0	311

Fuente: INEGI, 2015; SNIM, 2016.



Gráfica 13. Migración en Tepanco de López.

8.2.9 Programas de Apoyo.

Las políticas públicas son aquellas intervenciones del Estado que tienen como misión modificar problemas sociales o económicos de fondo y que se han establecido de manera fija en la sociedad. Por lo tanto, de las políticas públicas surgen estrategias como las políticas sociales, que a su vez se dividen en programas sociales, los cuales se relacionan con la distribución de recursos, que tienen que ver con aspectos de salud, vivienda, educación, ambiente, entre otros. Cabe decir que para que exista un programa social, es necesario un diseño previo vinculado de forma estricta con la población objetivo (Editorial, 2014).

En materia de desarrollo social, este tópico se ha convertido en uno de los más importantes por parte del gobierno en sus tres niveles, siendo la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, por sus siglas) la dependencia encargada de contribuir y garantizar el cumplimiento de los derechos sociales de toda persona, sin importar su condijio social, económica, étnica o física (Madrid-Paredones y Ladrón de Guevara-Cortés, 2013; SEDESOL, 2016). Dentro de sus programas de apoyo a la sociedad, atención a la pobreza y demás semejantes, se encuentran el programa de pensión para adultos mayores, atención a jornaleros agrícolas, comedores comunitarios, de

empleo temporal, entre otros (Madrid-Paredones y Ladrón de Guevara-Cortés, 2013; SEDESOL, 2016).

Por otra parte, los aspectos ambientales también han formado parte actual de la política social y económica. Donde la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales es la encargada de fomentar la protección y conservación de los ecosistemas y de los recursos, así como favorecer su aprovechamiento en términos del desarrollo sustentable (Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2006). Entre las temáticas más importantes que atiende dicha secretaría esta la conservación y manejo sustentable de la biodiversidad, el cambio climático, lo concerniente a la salud ambiental con el monitoreo de la calidad del aire así como la disponibilidad del agua y el manejo de residuos y finalmente la gobernanza ambiental (Madrid-Paredones y Ladrón de Guevara-Cortés, 2013).

Con base a lo anterior, el municipio de Tapanco de López ha contado con diversos programas sociales en el 2017, entre los que se destacan los Programas de infraestructura, el Programa de coinversión social, Programa 3x1 para migrantes, Comedores comunitarios, Programas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Programa de reforma educativa, Programa de atención a jornaleros y Programa de apoyo a la vivienda (SEDESOL, 2017). Asimismo, en cuestiones de producción agrícola los principales programas que han contribuido a su desarrollo, desde el 2000, son ProCampo y ProAgro que se caracterizan por apoyar a productores de los sistemas Maíz y Frijol, principalmente (SAGARPA, 2016); asimismo para el sector ganadero se encuentran los Programas de Fomento Ganadero PROGAN y PROPOR, este último enfocado a la producción de porcinos (SAGARPA, 2015).

Finalmente, el programa ambiental más destacado en 2008, 2009 y 2011 fue el de ProÁrbol de la CONAFOR, con un monto para municipio de \$838,444.⁰⁰, \$369,900.⁰⁰ y \$1, 082, 060.⁰⁰ pesos, respectivamente para cada año, y cuyos conceptos fueron la reforestación con planta de vivero y la protección de áreas reforestadas (CONAFOR, 2016). Además de que en 2012 dio inicio al programa de Pago por Servicios Ambientales que está a cargo de la dependencia antes mencionada, donde el beneficiario de \$2,986,053.⁶² pesos fueron los Bienes Comunales de Tepanco de López, representado por el C. Pedro Celestino Nájera Trujillo, presidente del Consejo de Vigilancia en aquel año (CONAFOR, 2012), cargo que actualmente ostenta el C. Alfredo Cruz Catarino. Dicho programa consistió en, una primera etapa, en la construcción de obras de conservación y protección del recurso suelo en una zona designada exclusivamente como Área

de Conservación cuya superficie abarco 120 ha, seguidamente el programa ha tenido como objetivo el impartimiento de Talleres de Capacitación en materia de cuidado ambiental para los miembros del Consejo de Comuneros el cual se divide en brigadas destacándose: el consejo de vigilancia, de vida silvestre, combate contra incendios forestales, entre otros.

8.3 Diagnóstico General de la Microcuenca Cacaloapan.

En el presente trabajo se ha realizado una profunda caracterización de los componentes biofísicos y socioeconómicos de la Microcuenca Cacaloapan, además de una evaluación tanto del uso, como el estado y condición actual de los bienes naturales. De esta forma se han podido detectar algunas las problemáticas que repercuten, directa o indirectamente, al aumento en el riesgo a la desertificación de la zona de estudio, así mismo, también queda exhibido la participación tanto del Gobierno como de los propios habitantes del Municipio de Tepanco de López para llevar a cabo acciones que reduzcan, en lo posible, el desarrollo de este proceso de degradación.

Entre los factores de riesgo detectados se encuentran los cambios que sufren las comunidades vegetales de la zona de estudio. Lo cual se traduce en pérdidas de cobertura y densidad vegetal y por tanto en producción de biomasa, lo que a su vez influye significativamente en las propiedades físicas y químicas del suelo, tal como densidad aparente, el pH, la materia orgánica y propiedades que tienen que ver con el agua (Muñoz Iniestra *et.al.*,2009; Muñoz Iniestra *et.al.*, 2017). Además de que la vegetación representa un factor determinante en el control de la erosión en la microcuenca, debido a los mecanismos de captura donde los arbustos arbóreos actúan como trampas colectoras de sedimentos y residuos orgánicos (Najera *et al.*, 2016; Muñoz Iniestra *et.al.*, 2017; Reyes-Reyna, 2000). Cabe decir que la influencia de las actividades humanas, como la extracción de recursos vegetales, el pastoreo de ganado caprino y el establecimiento de agricultura de temporal así como los fenómenos naturales (incendios forestales), han contribuido a esta pérdida de vegetación. No obstante, la implementación de programas gubernamentales, que si bien no son al ciento por ciento efectivos debido a que no se les da un seguimiento adecuado, ha permitido que este fenómeno de deforestación y transformación en las poblaciones vegetales se vea reducido.

Eventualmente la presencia de fenómenos naturales sobre los que no se tiene un control directo también tienen una peso importante dentro de la dinámica de la microcuenca, tal es el caso de las condiciones climáticas. El aumento gradual en la temperatura, las pocas precipitaciones y la gran pérdida de humedad por evapotranspiración determinan el tipo de clima de la región, el cual, en base al Índice de De Martonne (1926), se ha clasificado como una zona desértica. Por si fuera poco, dichos factores climáticos influyen en el ciclo hidrológico y la disponibilidad del recurso agua al contar con un solo mes de estabilidad hídrica (Agosto), acompañada de una larga estación de

sequía que va desde Noviembre hasta Marzo y con apenas dos meses que conforman el periodo humedad (Junio y Septiembre). Dicho balance depende de manera compleja de la naturaleza del suelo, la topografía, el clima particular de la zona de estudio y los antecedentes de las actividades humanas, de esta forma el agua se vuelve un factor limitante en la variabilidad climática y recarga del acuífero (Troyo *et al.*, 2012). Asimismo el clima es otro componente de peso en la degradación del suelo por erosión hídrica y eólica, pues tanto las precipitaciones como el viento contribuyen al desprendimiento, transporte y deposición de las partículas que conforman el suelo (Mazuela Águila, 2013; Gómez, Monterroso y Lechuga, 2014).

Aunado a lo anterior el relieve también juega un papel importante dentro de este flujo de interacciones, debido a que determina en gran medida el comportamiento de la hidrología superficial de la microcuenca, la distribución de la vegetación y los tipos de suelo, así como su efecto en de los procesos erosivos al zonificar las regiones con mayor vulnerabilidad a este tipo de degradación (Najera *et al.*, 2016; Reyes-Reyna, 2000).

Por tanto, el resultado de la interacción de los factores antes mencionados junto con el tipo de suelo tienen gran influencia en procesos erosivos (Najera *et al.*, 2016; Reyes-Reyna, 2000; Quirantes, 1988), lo que se ve reflejado en los distintos grados de erosión que presenta la Microcuenca Cacaloapan, siendo el moderado el predominante, con una pérdida anual entre 10 y 50 toneladas por hectárea. No obstante, es importante señalar que las zonas con pendientes pronunciadas deben considerarse como zonas de alto riesgo para la erosión hídrica, pues en ellas se degrada de 50 a 200 toneladas de suelo por hectárea al año, por lo que deben tomarse en cuenta medidas de protección.

Por otra parte cabe destacar la participación de los habitantes del municipio, que de manera comprometida han trabajado por la conservación de sus recursos, pues la adopción de simples medidas como evitar el pastoreo en zonas designadas como protegidas, la vigilancia de estas, el seguimiento, mantenimiento e implementación de obras físicas que evitan la degradación del suelo, o la iniciativa para capacitarse en temáticas de índole ambiental han marcado una puntual diferencia, como se refleja en la paulatina recuperación del recurso edáfico y sus las propiedades fisicoquímicas (pH, densidad aparente y porcentaje de materia orgánica para el presente estudio) (Muñoz Iniestra *et.al.*,2009).

Socialmente Tepanco de López ha presentado, a pesar del crecimiento demográfico, notables cambios como resultado del trabajo en conjunto entre el gobierno y los habitantes del municipio al acoger y desarrollar los diferentes programas de índole social y ambiental. Así pues, de presentar un índice de marginación alto en el 2000 (-0.026), paso a ser medio para el 2010 (0.13), de igual manera el grado de Desarrollo Humano fue de medio a alto en el periodo de tiempo comprendido entre 1995 y 2010, además de que el rezago educativo ha bajado de un 40.7 a 28.6%. Sin embargo, la marcada predisposición de la población para migrar hacia otras regiones, dentro o fuera del Estado, debido al desempleo y la pobreza del municipio, ha repercutido tanto en la economía de los pobladores, al bajar la producción agropecuaria, así como en la pérdida de la cosmovisión, historia y tradiciones de la población indígena que apenas representa el 10.5% de la población (CONABIO, 2013). Por tanto el aumento en la población, la presión y degradación de los bienes naturales, la contaminación y el cambio en los patrones del clima son factores de riesgo para la desertificación (Mazuela Águila, 2013).

8.3.1 Modelo de la Dinámica Ecosistémica.

La desertificación es un fenómeno complejo que se encuentra vinculado tanto al deterioro ambiental como a factores sociales, económicos y políticos (Garay-Romero y Cabero-Diéguez, 2013). En el caso de la Microcuenca Cacaloapan, dicha complejidad se explica a continuación de manera sistémica con las interrelaciones entre los elementos de los subsistemas ambiental y humano (Figura 32):

De manera general las actividades antropocéntricas que se realizan dentro del municipio de Tapanco de López ejercen, directa o indirectamente, un impacto sobre los componentes ambientales, los cuales a su vez tienen efectos sobre la propia población, volviéndose de esta forma un sistema cíclico y retroalimentativo cuyas consecuencias han derivado, en mayor o menor grado, en la degradación del ambiente.

En otras palabras, el progresivo crecimiento demográfico en el municipio durante los últimos 45 años ha incitado la constante demanda de servicios públicos que permitan satisfacer las necesidades básicas de alimentación, vivienda, salud, educación y empleo de los habitantes de la región. No obstante, y pese a la existencia de programas gubernamentales de apoyo social y económico, estos aspectos no son o han sido suficientes para atender por completo todas las necesidades de la población, lo cual ha propiciado el desplazamiento del lugar de origen hacia otras regiones del Estado, entidades federativas e inclusive el extranjero. A su vez, este fenómeno migratorio influye tanto en la pérdida de conocimiento ancestral como en la herencia laboral del sector agropecuario, aun cuando se sabe que la ganadería y agricultura son las principales actividades económicas dentro del municipio.

Por otra parte, la intensificación en la productividad ganadera y las inadecuadas prácticas agrícolas contribuyen a la degradación del suelo, contaminación del ambiente y cambio en el uso de suelo, lo cual afecta a otros componentes del sistema. Tal como se evidencian los hallazgos encontrados donde el cambio en uso de suelo en la microcuenca ha provocado la redistribución espacial de las comunidades vegetales, lo cual genera pérdidas de biodiversidad y alteraciones en las propiedades físicoquímicas y biológicas del suelo. Maximizándose así el impacto de los procesos erosivos, comprometiendo a su vez la regulación natural de los ciclos biogeoquímicos, lo cual favorece las condiciones de aridez con efectos sobre la vegetación y propiedades del suelo, al presentarse periodos prolongados de sequía y baja disponibilidad del recurso hídrico debido al aumento en la temperatura y la evapotranspiración. Fomentándose así el riesgo a la desertificación, cuyas consecuencias sobre la productividad del sistema se ven reflejadas en el empobrecimiento de la región y la incapacidad para satisfacer las necesidades básicas de la población. Aunque cabe resaltar que tanto las autoridades gubernamentales como la población que conforma los Bienes Comunales de Tapanco de López se han preocupado por frenar el proceso de desertificación al implementar programas y estrategias de conservación, que si bien aún no muestran resultados significativos sobre la recuperación del recurso edáfico, si ha impedido que el impacto de la erosión se agrave.

De esta forma quedan expuestos los factores que mayor relevancia e influencia tienen dentro de la dinámica ecosistémica de la microcuenca. No obstante, si bien los resultados antes presentados son muy importantes en materia de desertificación, encontrar una metodología que analice y sintetice todos estos procesos e interrelaciones se vuelve complicado debido a la gran complejidad de este fenómeno (Navone, Espoz-Alsina, Maggi e Introcaso, 2002; Pando-Moreno, Gutiérrez-Gutiérrez, Maldonado-Hernández y Jurado, 2002; Torres, Montaña, Abraham, Torres, Pastor y Urbina, 2005). Sin embargo, en el presente trabajo se hizo un esfuerzo para desarrollar un prototipo de modelaje matemático que permitiera, en lo posible, comprender dicha dinámica ambiental. Para lograr el objetivo, el análisis se basó en el teorema fundamental de la lógica proposicional que establece que las diferentes presentaciones, sintácticas y semánticas, son equivalentes. En particular, las tautologías calculadas por tablas de verdad corresponden con exactitud a las fórmulas que se pueden deducir de manera formal sin premisas. La utilidad de esta equivalencia es grandísima. Por ejemplo, la semántica provee un criterio sencillo para determinar si determinada fórmula no se puede deducir, y en particular permite probar con facilidad la consistencia del sistema deductivo (Castillo y Ostra, 2010).

En base a lo anterior, se expone el diagrama de interrelaciones con los factores utilizados durante la construcción del modelo, tomando en consideración que cada variable representa una función booleana y cuyos operadores lógicos son el **AND** y el **OR**, correspondientes a la multiplicación y a la suma, respectivamente (Figura 33).

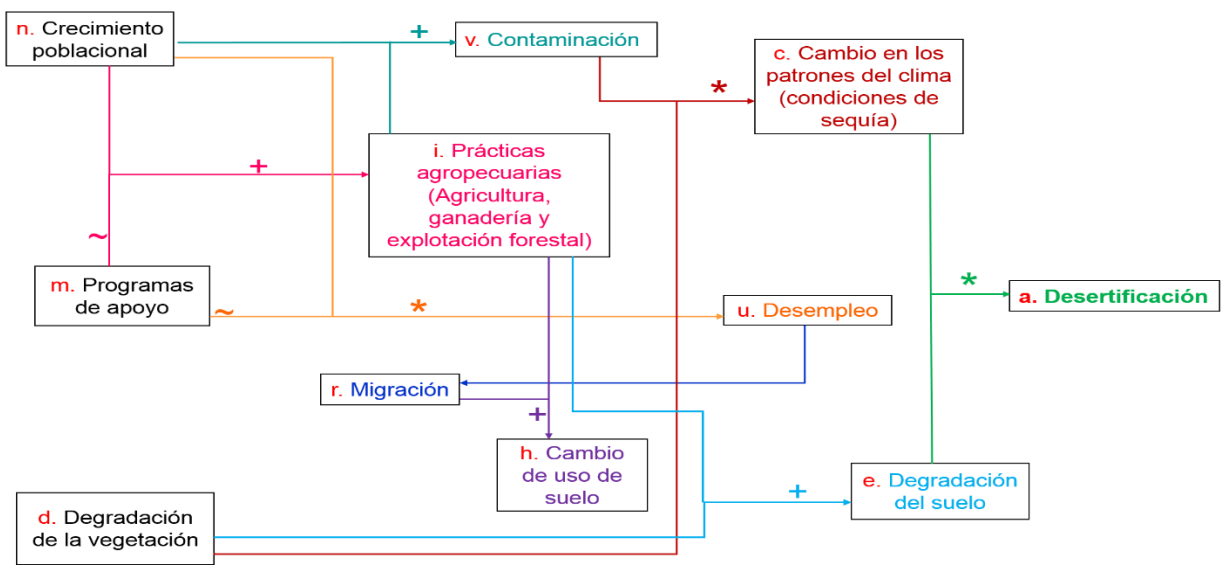


Figura 33. Diagrama de interrelaciones empleadas en el modelo de lógica difusa

Donde, y para este prototipo en particular, la desertificación (a) de la microcuenca está dada tanto por la degradación del suelo (e) como por los cambios en los patrones climáticos (c). A su vez, la degradación del suelo está influenciada la vegetación (d), el cambio de uso de suelo (h), o las prácticas inadecuadas en actividad agropecuaria (i). Mientras que para los cambios en los patrones de clima intervienen tanto por la contaminación del ambiente (v) como la pérdida de cobertura vegetal (d). Por su parte el cambio de uso de suelo está definido, ya sea por la migración (r) o por las prácticas agropecuarias (i). Asimismo la migración se encuentra definida por el desempleo (u). Las variables denominadas “prácticas agropecuarias” (i) y “desempleo” (u), están dadas por el crecimiento de la población (r) y la no existencia de programas integrales de apoyo que permitan su desarrollo (m). Finalmente la contaminación del ambiente está relacionada con el crecimiento demográfico y las inadecuadas prácticas agropecuarias (i).

Por lo que a manera de síntesis, la dinámica entre los factores seleccionados queda expresada a través de las siguientes funciones lógicas, cuya simplificación se realizó mediante la aplicación de las Leyes del Algebra de Boole (Cuadro 36) y el uso de tablas de verdad (Cuadro 37) para la generación de mapas de Karnaugh, los cuales se caracterizan por ser representaciones gráficas de funciones lógicas (Cuadros 38 y 39).

a = (c*e).....a = (dm'+dn)*(d+m'+n)	Función 1
c = (d*v).....c = d(m'+n).....<u>c = dm'+dn</u>	Función 2
e = (d+h+i).....e = d+[(m'+n)+(m'n)]+(m'+n).....<u>e = d+m'+n+(m'n)</u>	Función 3
h = (i+r).....h = (m'+n)+(m'n)	Función 4
i = (m'+n)	Función 5
r = u.....r = (m'n)	Función 6
u = (m'*n)	Función 7
v = (i+n).....v = (m'+n)+n.....v = (m'+n)	Función 8

Cuadro 36. Leyes del algebra de Boole

Postulado o Teorema	OR (+)	AND (*)
P.2: Identidad (existencia de neutros)	$x+0= x$	$x1= x$
P.3: Conmutatividad	$x+y= y+x$	$xy= yx$
P.4: Asociativo	$x+(y+z)= (x+y)+z= x+y+z$	$x(yz)= (xy)z= xyz$
P.5: Distributivo	$x+(yz)= (x+y) (x+z)$	$x(y+z)= (xy)+(xz)$
P.6: Existencia de complementos	$x+x'= 1$	$xx'= 0$
T.1: Identidad	$x+1= 1$	$x0= 0$
T.2: Absorción	$x+(xy)= x$	$x(x+y)= x$
T.5: Idempotencia	$x+x= x$	$xx= x$
T.7: De Morgan	$(x+y)'= x'y'$	$(xy)'= x'+y'$
T.8: Involución	$(x')'= x$	

Cuadro 37. Tabla de verdad generada a partir de las Funciones 2 y 3.

d	m	n	c (F2)	e (F3)
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1
0	1	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Cuadro 38. Mapa de Karnaugh de la Función 2.

dm \ n	00	01	11	10
0	0	0	0	1
1	0	0	1	1

Donde $c= dn+dm'$

Cuadro 39. Mapa de Karnaugh de la Función 3.

dm \ n	00	01	11	10
0	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Donde $e= d+m'+n$

Por tanto la función principal para este caso (Función 1) está representada por la interacción continua de tres posibles detonantes de la desertificación: 1) Programas de apoyo (m); 2) Crecimiento poblacional (n); y 3) Degradación de la vegetación (d). Dichos factores se emplearon para crear el modelo de lógica difusa en el Software matemático MATLAB R2015a, cuyo controlador difuso es el sistema Mamdani, el cual se basa en un conjunto de reglas heurísticas donde las variables lingüísticas de las entradas y salidas se representan por conjuntos difusos, en otras palabras, el modelado se obtiene a partir de reglas o enunciados condicionales difusos (Si A entonces B) (Ornelas-Téllez, s.f.).

De esta forma la *clusterización* de las variables de entrada y salida se realizó en intervalos de 0 a 1. Específicamente, la partición simétrica de los espacios en cada uno de los factores quedo de la siguiente manera:

- Entradas. 1) Programas de apoyo: “No se aplican” – “Se Aplican”.
 2) Crecimiento poblacional: “Crece”.
 3) Degradación de la vegetación: “Poca” – “Moderada” – “Severa”.
- Salida: 4) Desertificación: “Ligera” – “Moderada” – “Grave” – “Severa”.

Para *fuzificación* de las variables se asignaron las siguientes funciones de pertenencia: 1) Programas de apoyo: función triangular y trapezoidal; 2) Crecimiento poblacional: función sigma; 3) Degradación de la vegetación: función Gaussiana; y 4) Desertificación: función Gaussiana.

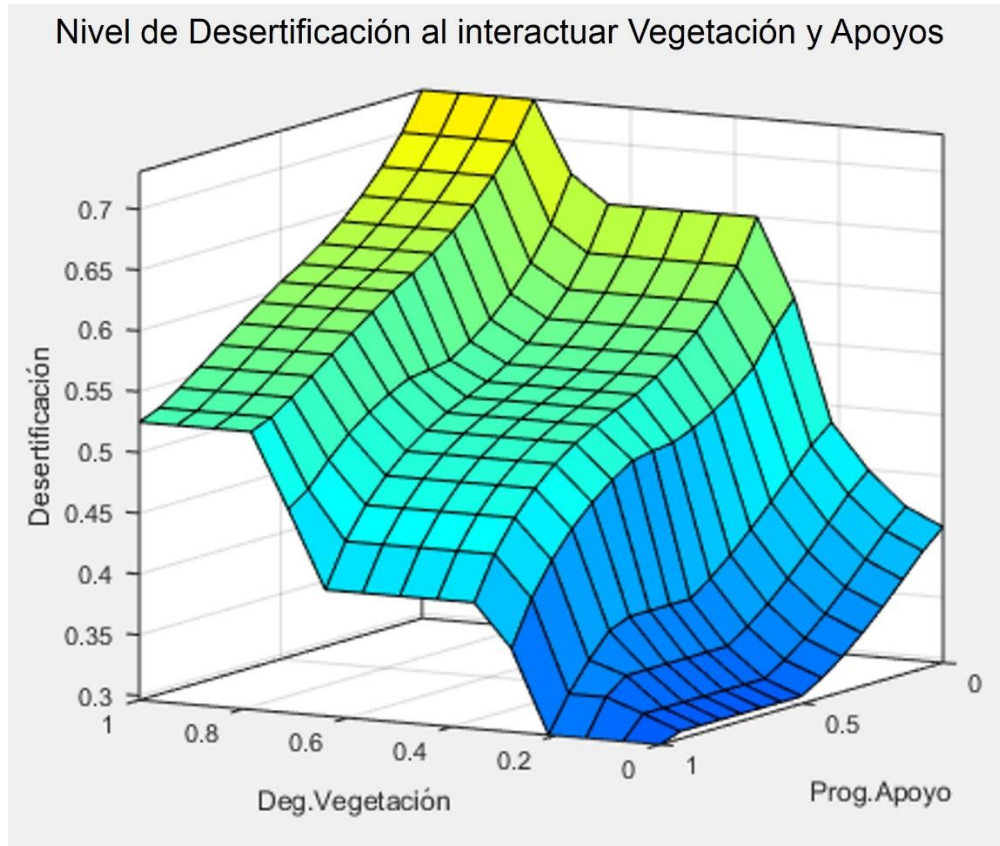
A su vez, la *base de conocimiento* consto de 10 reglas condicionales donde el operador lógico seleccionado fue AND, debido a que la desertificación, en este prototipo, es el producto de la interacción entre las variables analizadas (Función 1). Cabe decir que la clasificación que se propone para el grado de desertificación se basa en la partición equitativa del intervalo comprendido entre cero y 1, donde cero representa el menor grado de desertificación (Cuadro 40).

Cuadro 40. Clasificación de la desertificación.

Grado de desertificación	Rango
Ligera	0 - 0.25
Moderada	0.25 - 0.5
Grave	0.5 - 0.75
Severa	0.75 - 1

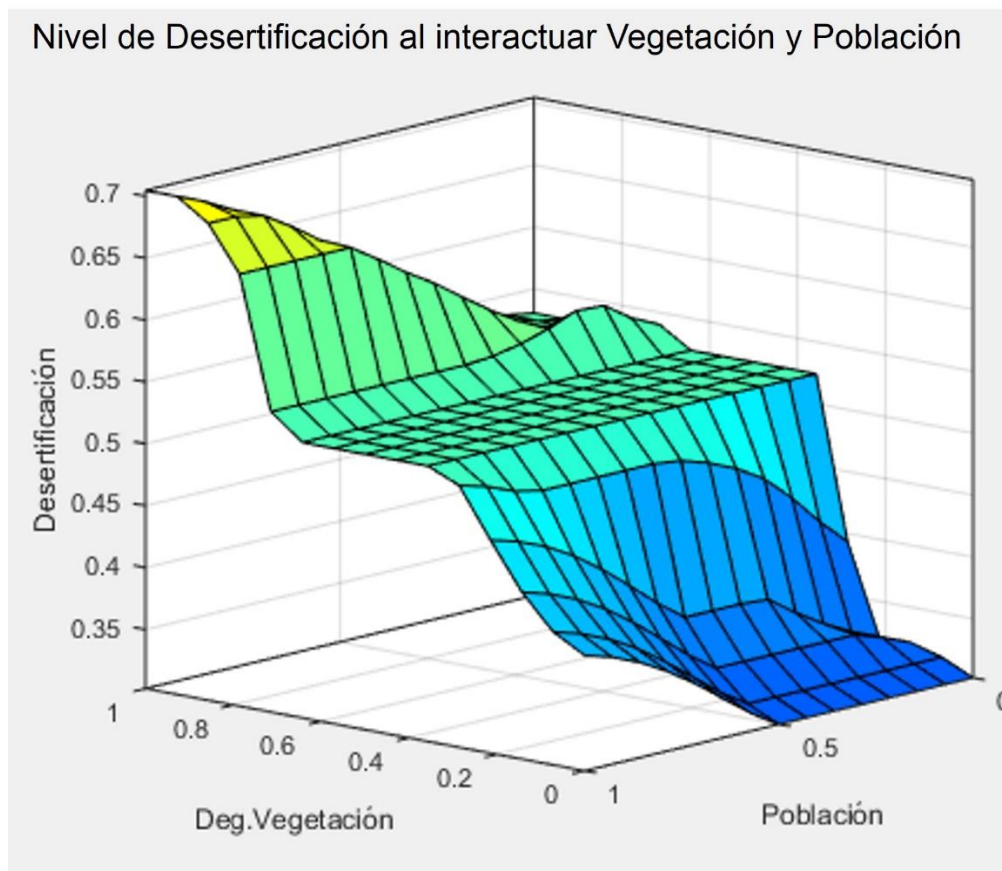
Los resultados obtenidos de la interrelación entre los programas de apoyo y la degradación vegetal y cómo su interacción determina el grado de desertificación se presenta en el Gráfico 14. De manera general se observa que el hecho de que existan programas que intervengan en la conservación de la vegetación si define en el nivel de desertificación, ya que la aplicación o no de estos impacta directamente sobre el grado de degradación de la vegetación y por tanto en la evolución de la desertificación, por ejemplo si la degradación de la vegetación es ligera pero no existe ningún programa gubernamental que ayude a combatirla, entonces el nivel de

desertificación alcanza un valor próximo a 0.45, que corresponde, de acuerdo a la clasificación propuesta, a un grado moderado de desertificación.



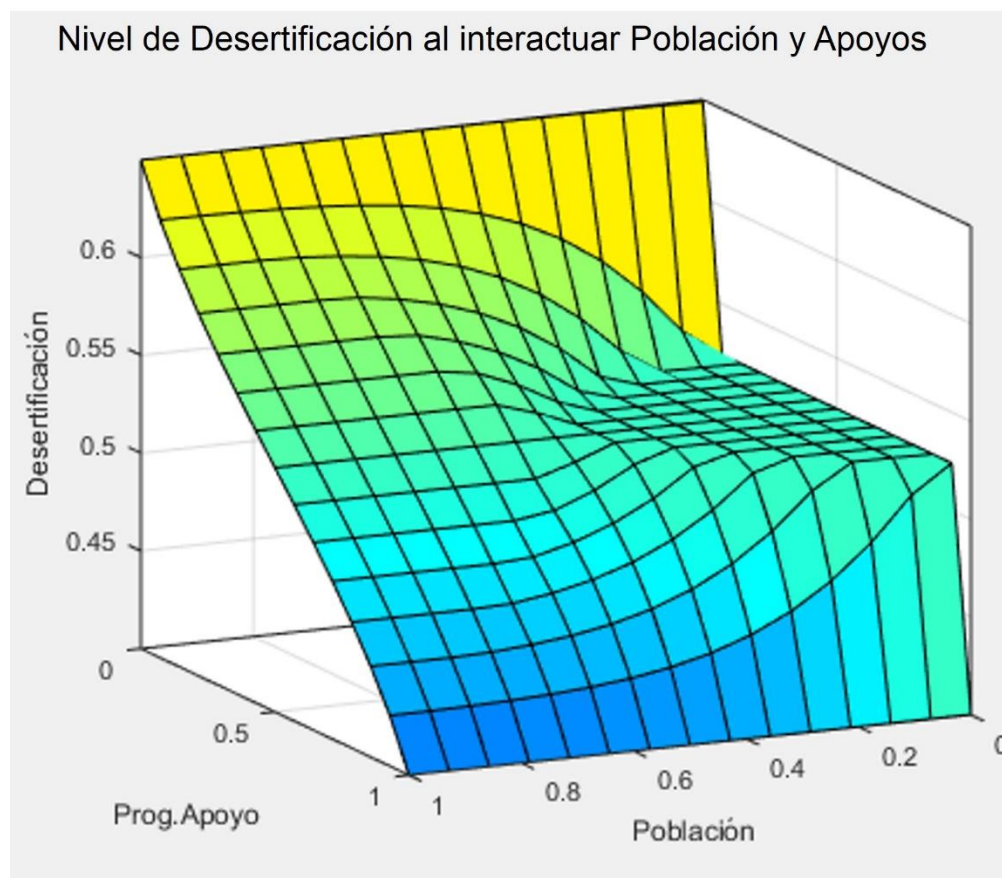
Gráfica 14. Modelación de los factores Programas de apoyo y Degradación vegetal como detonantes de la Desertificación.

Al evaluar la relación entre el crecimiento poblacional y el grado de degradación en la vegetación (Gráfica 15), se denota que el nivel de desertificación aumenta conforme la población crece y ejerce presión sobre el deterioro vegetal, es decir, si existe un continuo crecimiento demográfico y la degradación de la vegetación es severa, entonces la desertificación también es severa al tener un nivel de 0.7. Por el contrario, si la población no crece pero la degradación vegetal es severa, entonces el grado de desertificación se vuelve grave, puesto que alcanza niveles próximos a 0.55.



Gráfica 15. Modelación de los factores Población y Degradación vegetal como detonantes de la Desertificación.

Por otra parte, las variables programas de apoyo y población parecen no guardar relación alguna (Gráfica 16), lo cual indica que esta interacción no tiene un efecto directo por sí misma en la evolución del proceso de desertificación, más al interrelacionarse con factores ambientales se denota la presión que ejercen sobre la degradación recursos naturales, por lo que debe considerárseles como factores de riesgo.



Gráfica 16. Modelación de los factores Población y Programas de apoyo como detonantes de la Desertificación.

Cabe resaltar que los modelos para evaluar la desertificación que agrupen aspectos socioeconómicos son escasos, sin embargo el proyecto MEDALUS dentro de sus indicadores desarrolla el Indicador de Calidad de Gestión (MQI, por sus siglas en inglés) para evaluar el efecto de las actividades humanas y la planeación de las instituciones gubernamentales en colaboración con los residentes locales sobre la desertificación, el cual ocupa como factores la intensidad de uso de la tierra y el cumplimiento de las políticas. Este indicador en conjunto con los indicadores ambientales que maneja el dicho programa determina las zonas sensibles o que sufren desertificación, siendo así la parte de las políticas públicas un factor importante, ya que la adecuada planificación del uso del suelo y los programas apropiadas en el manejo de los recursos ayudan a combatir este proceso de degradación de las tierras secas (Manuchehr y Mahbobeh, 2007; Shahabeddin, Ardalan y Bahareh, 2016), lo cual coincide con el resultado obtenido en el presente prototipo al evaluar la influencia de los programas de apoyo con la degradación vegetal.

Finalmente es importante aclarar que el presente prototipo de modelación aún presenta sesgos en su metodología, ya que requiere se precisen las funciones de correspondencia para cada una de las variables ya que sensibilizan el comportamiento e influencia dentro del modelo.

IX. CONCLUSIONES

Basados en la información generada en el presente trabajo y en función de la hipótesis planteada, se demuestra que existe un estado de degradación de los recursos naturales de la Microcuenca Cacaloapan, esto debido a las características climáticas y topográficas propias de la zona de estudio, la transformación en las comunidades vegetales, los eventos catastróficos naturales como incendios forestales, así como la presión ejercida sobre los recursos naturales por parte de los habitantes del municipio al llevar a cabo actividades agrícolas y pecuarias, de las cuales dependen para subsistir. No obstante, también es importante recalcar que el municipio, y en especial la zona de estudio, ha contado con el apoyo económico, social y político tanto de las autoridades gubernamentales como comunales, lo cual ha permitido frenar el proceso de desertificación, que en base al estado actual de degradación del suelo, se cataloga como Moderado. Este resultado se respalda en las siguientes conclusiones:

- De acuerdo al análisis morfométrico, la zona de estudio corresponde a una microcuenca, cuya superficie total es de 14.80 Km²., presenta además un estado transitorio en la evolución de su relieve con procesos de arrastre y sedimentación balanceados.
- La clasificación del clima en base al Índice de Aridez de De Martonne (1926) sitúa a la Microcuenca Cacaloapan como una región desértica, con poca disponibilidad del recurso hídrico a lo largo del año debido a la tendencia en el aumento de la temperatura, las pocas precipitaciones y la gran pérdida de humedad por evapotranspiración.
- A pesar de que las obras de conservación aún no tienen el tiempo suficiente para mostrar una recuperación paulatina de todas las propiedades fisicoquímicas de los suelos, si contribuyen a frenar el constante arrastre del suelo y los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal por efecto de la erosión.
- El grado de erosión predominante en la microcuenca de estudio es el moderado, con una pérdida anual entre 10 y 50 toneladas por hectárea.
- La vegetación, el relieve y las condiciones climáticas juegan un papel determinante en el control de los procesos erosivos, que aunado al crecimiento poblacional, la migración, la pobreza y los programas de apoyo, se convierten en factores de riesgo para la desertificación.

- Tanto las autoridades gubernamentales como la población que conforma los Bienes Comunes de Tepanco de López, han tenido una participación activa y comprometida en la lucha contra la degradación de los suelos de la región, al acoger y desarrollar programas de índole ambiental.
- La modelación matemática es una herramienta capaz de exponer aquellos procesos y factores que representan un riesgo, directo o indirecto, en la evolución de la desertificación de la zona de estudio.

X. LITERATURA CITADA

- Abraham, E., Montaña, E. y Torres, L. (2006). *Desertificación e indicadores: posibilidades de medición integrada de fenómenos complejos*. Scripta Nova, 10 (214). Visto en: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-214.htm>
- Alam, M., Dupras, J. y Messier, C. (2016). A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services. *Ecological Indicators*, 60, 38–44.
- Alcaraz, S., Daniel, O., Tadeu-Vitorino, A.C. y Sannier, C. (2011). Relaciones entre atributos hidrogeomorfológicos de la cuenca del río Dourados y su importancia ambiental. *Agrociencia*, 45 (3), 267-279.
- Alfaro, C.W. (2005). Conceptos básicos para el análisis social, económico, ambiental e institucional de la desertificación. Morales, C. y Prada, S. (2005). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL. Santiago de Chile, Chile.
- Ali, J. y Mirza, M.I. (1993). Space technology in the mapping of desertification in Pakistan. *Advances in Space Research*, 13, 103-106.
- Andrade-Limas, E.C., Espinoza-Ramírez, M. y Romero-Díaz, A. (2009). Acciones de lucha contra la desertificación en ambientes semiáridos en el noreste de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, (49-50), 15-26.
- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas. *Cinta moebio* 3, 40-49.
- Becerra-Soriano, R.A. (2007). Estudio del régimen pluviométrico de una cuenca empleando funciones ortogonales. *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería*.
- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C.A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C. y Khalidou, M.B. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4-13.
- Bakr, N., Weindorf, D., Bahnassy, M.H. y El-Badawi M.M. (2012). Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: Environmental indicators. *Ecological Indicators*, 15, 271–280.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O.R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, UNAM, (44), 18-38.
- Bolaños-González, M.A., Paz-Pellat, F., Cruz-Gaistardo, C.O., Argumedo-Espinoza, J.A., Romero-Benítez, V.M. y De la Cruz-Cabrera, J.C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34 (3), 271-288.

- Boluda, R., Gil de Carrasco, C. y Pinto Vidal de Oliveira, V. (2005). La hidroclimatología e impactos ambientales: degradación ambiental y desertificación. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, 4 (7), 111-120.
- Bosch, P., Büchele, M. y Gee, D. (1999). Environmental indicators: Typology and overview. Technical report No 25. *European Environment Agency*.
- Brañes, R. (2000). Manual de derecho ambiental mexicano. 2ª ed. México. FCE, Fundación Mexicana para la Educación Ambiental.
- Brunet-Cortina, I. y Robaina, D.A. (2010). Lógica difusa aplicada a la toma de decisiones. *Ingeniería Industrial*, 31 (1), 1-5.
- Bustos, X., Bermúdez, M. A., Toro, G.M., Bernet, M., Rojas, O. y Marín, M.I. (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia. *Terra Nueva Etapa*, 24 (46), 43-67.
- Campos-Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. Capítulo 2: Geomorfología de la cuenca. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Visto en: <http://ninive.uaslp.mx/jspui/bitstream/i/3331/1/EDBPCH99801.pdf>
- Canepa-Pérez, I.M. y Cú-Quijano, F. (2010). Indicadores socioeconómicos de desarrollo humano y desarrollo relativo al género en la sección municipal de Sabancuy, Carmen, Campeche. *Revista de Economía*, 27 (75), 73-102.
- Castelán-Vega, R., Ruiz-Careaga, J., Linares-Fleites, G., Pérez-Avilés, R y Tamariz-Flores, V. (2007). Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, UNAM*, (64), 75-89.
- Castillo, M. y Oostra, A. (2010). Álgebras para la lógica implicativa con conjunción Matemáticas. *Enseñanza Universitaria*, 18 (2), 31-50
- Celaya-Michel, H. y Castellanos-Villegas, A.E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29 (3), 343-356.
- Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. (2006). Medio Ambiente: Políticas públicas y gestión gubernamental de la administración 2000-2006. Visto en: http://archivos.diputados.gob.mx/Centros_Estudio/Cesop/Eje_tematico/3_mambiente.htm
- Cerda, T. y Vera, X. (2008). Indicadores Sociales y Marcos Conceptuales para la Medición Social. *Estudios. Instituto Nacional de Estadística*. Chile
- Chang, I., Kharis-Prasidhi, A., Im, J., Shin, H.D. y Cho, G.C. (2015). Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. *Geoderma*, 253-254, 39-47.
- Chen, J., Chen, J.Z., Tan, M.Z. y Gong Z.T. (2002). Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12 (2), 243-252.
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla. CEIGEP. (2016). Ficha municipal: Información básica del municipio de Tepanco de López: Visto en: <http://www.coteigep.puebla.gob.mx/est231.php?muni=21161#TABLA!A11>

- Centro Nacional de Prevención de Desastres. CENAPRED. (2004). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Archivo obtenido de: <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieEspecial/metodologiasAtlas.pdf>
- Centro de Información de las Naciones Unidas. CINU. (2016). Derecho del Medio Ambiente. Visto en: <http://www.cinu.mx/temas/derecho-internacional/derecho-del-medio-ambiente/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO. (2013). Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del Estado de Puebla. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de Puebla. México.
- Comisión Nacional Forestal. CONAFOR. (2012). Solicitantes Aprobados como Compensadores, para la realización de proyecto de compensación ambiental de la segunda convocatoria 2012. Archivo obtenido de: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/tramites-y-servicios/apoyos/compensacion-ambiental/resultados>
- Comisión Nacional Forestal. CONAFOR. (2016). Apoyos CONAFOR. Visto en: <https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/apoyos-conafor>
- Comisión Nacional del Agua. CONAGUA. (2013). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Tehuacán (2105), Estado de Puebla. México.
- Comisión Nacional del Agua. CONAGUA. (2016). Servicio Meteorológico Nacional. Visto en: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=178:puebla&catid=14:normales-por-estacion
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. CONANP. (2016). Convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África. Visto en: <http://www.conanp.gob.mx/contenido/pdf/Convencion%20de%20las%20Naciones%20Unidas%20de%20Lucha%20contra%20la%20Deserti.pdf>
- Consejo Nacional de Población. CONAPO. (2010). Índice de marginación por entidad federativa y municipio: 2010. Visto en: http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/mf2010/CapitulosPDF/1_4.pdf
- Consejo Nacional de Población. CONAPO. (2016). Indicadores. Visto en: <http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indicadores>
- Consejo Estatal de Población del Estado de Puebla. COESPO. (2016). Puebla en cifras. Visto en: <http://coespo.puebla.gob.mx/puebla-en-cifras>
- Cotler, H. (2007). El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Cruz-Romero, B., Gaspari, F.J., Rodríguez-Vagaría, A.M., Carrillo-González, F.M. y Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23 (64), 26-34.

- D'Negri, C.E. y De Vito, E.L. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, 6 (3), 126-136.
- Darkoh M. B. K. (1998). The nature, causes and consequences of desertification in the drylands of Africa. *Land Degradation & Development*, 9, 1–20. Visto en: [http://www.readcube.com/articles/10.1002%2F\(SICI\)1099-145X\(199801%2F02\)9%3A1%3C1%3A%3AAID-LDR263%3E3.0.CO%3B2-8?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=onlinelibrary.wiley.com&purchase_site_license=LICENSE_DENIED](http://www.readcube.com/articles/10.1002%2F(SICI)1099-145X(199801%2F02)9%3A1%3C1%3A%3AAID-LDR263%3E3.0.CO%3B2-8?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=onlinelibrary.wiley.com&purchase_site_license=LICENSE_DENIED)
- De Berríos, O.G. y Briceño de Gómez, M.Y. (2009). Enfoques epistemológicos que orientan la investigación de 4to. Nivel. *Visión gerencial*. 47-54.
- De Pina-Tavares, J., Baptista, I., Ferreira, A.J.D., Amiotte-Suchet, P., Coelho, C., Gomes, S., Amoros, R., Amarildo Dos Reis, E., Furtado-Mendes, A., Costa, L., Bentub, J. y Varela, L. (2015). Assessment and mapping the sensitive areas to desertification in an insular Sahelian mountain region Case study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde. *Catena*, 128, 214–223.
- Diario Oficial de la Federación. DOF. (2015). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Segunda sección.
- Diario Oficial de la Federación. DOF (2016). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Visto en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf
- Domínguez, M.A. (2004). Hidrología de cuencas y diagnóstico físico. Primer diplomado Internacional en Desarrollo Integral de Microcuencas.
- Dregne, H.E. (1995). Desertification control: a framework for action. *Environmental Monitoring and Assessment*, 37, 111-122.
- Dregne, H.E. y Chou, N.T. (1992). Dimensiones globales de la desertificación y los costos. *Degradación y restauración de las tierras áridas*. Visto en: <http://www.ciesin.columbia.edu/docs/002-186/002-186.html>
- Etchevers-Barra, J.D., Gómez-Díaz, J.D., Monterroso-Rivas, A.I. y Tinoco-Rueda, J.A. (2009). Formulación de indicadores para evaluar y monitorear la desertificación en México. Visto en: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/indicadores_evaluar_desertificacion.pdf
- Editorial. (2014). Programas sociales: recuento de sus principales aspectos. Cámara, (33), 3-8. Archivo obtenido de: <http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/download/326569/1150885/file/Revista%252033%2520jul-4.pdf>
- Eltaiif, N.I. y Gharaibeh, M.A. (2011). Aplicación de un modelo matemático para predecir y reducción de la erosión eólica en tierras áridas no protegidas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 195-206.
- Escalante-Semerena, R.I. y Catalán, H. (2008). Situación actual del sector agropecuario en México. *Economía Informa*, 350, 7-25.

- FAO. (2007). Tierras Áridas del mundo. Archivo obtenido de: <http://www.fao.org/3/a-y5738s.pdf>
- FAO. (2017a). Propiedades físicas del suelo. Visto en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO. (2017b). Propiedades químicas del suelo. Visto en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>
- FAO. (2017c). Textura del suelo. Visto en: ftp://ftp.fao.org/fi/cdrom/fao_training/fao_training/general/x6706s/x6706s06.htm
- Flores-López, H.E., De la Mora-Orozco, C., Ruíz-Corral, J.A. y Chávez-Durán, A.A. (2013). Efecto de la cobertura de suelo de tres cultivos sobre la erosión hídrica. *Revista Chapingo*. Serie zonas áridas, 12 (1), 19-25.
- Garay-Romero, I.C. y Cabero-Diéguez, V. (2013). El aspecto social de la desertificación: Análisis de la percepción de la administración pública en Centro América. *Gestión y Ambiente*, 16 (2), 37-48.
- García-Licon, J.B., Maldonado-Torres, R., Moreno-Calles, A.I., Álvarez-Sánchez, M.E., García-Chávez, J. y Casas, A. (2017). Ethnoagroforestry management and soil fertility in the semiarid Tehuacán Valley, México. *Ethnobiology and Conservation*, 6 (5), 1-16.
- García-Orozco, J.A., Cedillo-Gutiérrez, J.C., Juan-Pérez, J.I. y Balderas-Plata, M.A. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, 55, 63-73.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *ReLMCS*, 1 (1), 66-101. Archivo obtenido de: http://contenidosabiertos.academica.mx/jspui/bitstream/987654321/504/1/interdisciplinariedad_y_sistemas_complejos.pdf
- García, R. (2006). Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. *Ed. Gedisa*. Barcelona, España.
- Geraldi, A.M., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas*, (52), 215-225.
- Gobierno de España. (2016). Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación. Visto en: http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/legislacion/legislacion-y-convenios/convenios-internacionales/convencion_desertificacion.aspx
- Gobierno de la República (s.f.). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT). Archivo obtenido de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/5403PROGRAMA%20SECTORIAL%20DE%20MEDIO%20AMBIENTE%20Y%20RECURSOS%20NATURALES%202013-2018.pdf>
- Gobierno del Estado de Puebla. (s.f.). Región Tehuacán y Sierra Negra. Actualización del Programa Regional de Desarrollo 2011- 2017.
- Gobierno del Estado de Puebla. (2014). Programa municipal de desarrollo urbano sustentable de Tehuacán.

- Gómez, D.J.D., Monterroso, R.A.I. y Lechuga, G.L.M. (2014). Erosión eólica a nivel regional en México y sus factores determinantes. XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo.
- Gómez-Luna, B.E., Vázquez-Marrufo, G., Ruiz-Aguilar, G.M.L. y Olalde-Portugal, V. (2010). Cambios en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo generados por la producción de carbón vegetal en el bosque templado de (*Quercus Spp.*) en Santa Rosa, Gto. México. *Ra Ximhai*, 6 (2), 187-197.
- González-Cueto, O., Iglesias-Coronel, C.E. y Herrera-Suárez, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18 (2), 57-63.
- Gonzales de Matuco, A.I. (2004). Análisis Morfométrico de la cuenca y de la red de drenajes del Río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecida. *Boletín de la A.G.E.N.*, (38), 311-329.
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M.Á., Vázquez-Alarcón, A. y Ruíz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19 (1), 45-66.
- Guerra-Bustillo, C.W., Herrera-Villafranca, M., Vázquez-Alfonso, Y. y Quintero-Bueno, A.B. (2014). Contribución de la Estadística al análisis de variables categóricas: Aplicación del Análisis de Regresión Categórica en las Ciencias Agropecuarias. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23 (1), 68-73.
- Guerrero-Mantilla, R., Capó-Pérez, J.R. y López-Padrón, A. (2016). Modelación estadístico-matemática aplicada al seguimiento de egresados de carreras de perfil técnico agropecuario. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25 (4), 55-63.
- Gutiérrez-Ruacho, O.G., Brito-Castillo, L., Villarruel-Sahagún, L. y Troyo-Diéguez, E. (2012). Distribución espacial de la temperatura y precipitación y su relación con la vegetación del Estado de Sonora. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 11 (2), 106-111.
- Heath, J. (2012). Lo que indican los indicadores: cómo utilizar la información estadística para entender la realidad económica de México. *INEGI*. México.
- Hernández- Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, M.P. (2010). Metodología de la investigación. Quinta edición. *McGRAW-HILL*. México.
- Honorato-Pinto, R. (2000). Manual de Edafología. Ed. Ediciones Universidad Católica de Chile. 4° edición
- Huerta-Fernández, P. y Loli-Figueroa, O. (2014). Erosión hídrica en la cuenca alta del Río Moche. *Ecología Aplicada*, 13 (1), 15-22.
- Instituto Nacional de Ecología. INE. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Visto en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- INEGI (1970). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>

- INEGI (1980). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI (1990). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI (1995). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI, (1999). Síntesis geográfica del Estado de Puebla. Anexo cartográfico.
- INEGI (2000). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI (2005). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tepanco de López, Puebla. Clave geoestadística 21161. Archivo obtenido de: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/21/21161.pdf>
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda. Visto en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx>
- INEGI (2010b). Marco conceptual del Censo de Población y Vivienda 2010. Archivo obtenido de: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/metodologias/censos/marco_conceptual_cpv2010.pdf
- INEGI. (2013). Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II. Obtenida de: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>
- INEGI (2015a). Información por entidad. Clima. Visto en: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/territorio/clima.aspx?tema=me&e=21>
- INEGI (2015b). Información nacional, por entidad federativa y municipios. Tepanco de López, Puebla. Visto en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/default.aspx>
- INEGI (2015c). Información por entidad. Visto en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/default.aspx>
- INEGI. (2015d). Carta topográfica de Santiago Miahuatlan, Puebla. Archivo obtenido de: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825267896>
- INEGI. (2015f). Encuesta intercensal. Visto en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=33725&s=est>
- INEGI (2016). Metodología de indicadores de la serie histórica censal.
- INEGI (2016b). Anuarios Estadísticos y geográficos de Puebla. Archivos obtenidos de: <http://www.coteigep.puebla.gob.mx/anuarios.php>
- Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín.

- Jiang, Z., Lian, Y. y Qin, X. (2014). Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 132, May, 1–12.
- Jones, C.A., Griggs, R.H., Williams, J.R. y Srinivasan, R. (1992). Predicción de la erosión de hídrica y eólica del suelo. *FAO*. Visto en: <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S03.htm>
- Kassas, M. (1995). Desertification: a general review. *Journal of Arid Environments*, 30, 115-128.
- Laza-Vásquez, C. (2006). La causalidad en epidemiología. *Investigaciones Andina*, 8 (12).
- López-Reyes, M. (2006). Elementos para el diseño de una política de uso sustentable de las tierras ganaderas de Sonora. *Estudios sociales*, 14(27), 140-157.
- López-Vázquez, V.H., Balderas-Plata, M.A., Chávez-Mejía, M.C., Juan Pérez, J.I. y Gutiérrez Cedillo, J.G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia Ergo Sum*, 22 (2), 136-144.
- Manuchehr, F. y Mahbobeh, N.E. (2007). Evaluation of MEDALUS for desertification hazard zonation using GIS; Study area; Iyzad Khast Plain, Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10 (16), 2622-2630.
- Madrid-Paredones, R.M. y Ladrón de Guevara-Cortés, R. (2013). Análisis de los programas de desarrollo social en México y su impacto en el Presupuesto de Egresos de la Federación. *Ciencia Administrativa*, (2), 26-36.
- Manzano-Camarillo, M.G.F (1997). Procesos de desertificación asociados a sobrepastoreo por caprinos en el matorral espinoso de Linares, Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Nuevo León, México.
- Manzuela-Águila, P.C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *IDESIA*, 31 (2), 3-4.
- Martín-Clemente, C.R., Sosa-Ramírez, J., Maass-Moreno, M., Luna-Ruíz, J.J., Meráz-Jiménez, A.J. y Flores Ancira, E. (2015). Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. *Terra Latinoamericana*, 33 (1), 17-26.
- Martínez-Duarte, J.A. (2008). Enfoque sistémico en la investigación de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de Misiones*, pp.1-12.
- Matoš, B., Pérez-Peña, J.V. y Tomljenović, B. (2016). Landscape response to recent tectonic deformation in the SW Pannonian Basin: Evidence from DEM-based morphometric analysis of the Bilogora Mt. area, NE Croatia. *Geomorphology*, 263, 132–155.
- Maya, Y. (2011). Diagnóstico ambiental de suelos erosionados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13 (2), 169-179.
- Medina-Hurtado, S. y Paniagua-Gómez, G. (2007). Modelo de inferencia difuso para estudio de crédito. *Dyna*, (154), 215-229.
- Meneses-Tovar, C.L. (2011). El índice normalizado diferencial de vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva* 238, 62, 39-46.
- Mercado-Mancera, G., Troyo-Diéguez, E., Aguirre-Gómez, A., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, L.F. y García-Hernández, J.L. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 26 (1), 51-64.

- Middleton, N.J y Sternberg, T. (2013). Climate hazards in drylands: A review. *Earth-Science Reviews*, 126, 48–57.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A., González-Tagle, M.A., Pompa-García, M. y Aguirre-Salado, C.A. (2013). Tasa de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19 (2), 201-215.
- Montes-León, M.A.L., Uribe-Alcántara, E.M. y García-Celis, E. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2 (1), 5-17.
- Morales, E. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de tierras. Morales, C. y Prada, S. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL*. Santiago de Chile, Chile.
- Morin, E. (2009). Introducción al pensamiento complejo. Ed. Gedisa. España.
- Muñoz-Iniestra, D.J., López, G.F., Hernández, M.M., Soler, A.A. y López, G.J. (2009). Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*, 27, 237-246.
- Muñoz-Iniestra, D.J., Ferreira-Ramírez, M.- Escalante-Arriaga, I.B. y López-García, J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 31 (3), 201-210.
- Muñoz-Iniestra, D.J., Chávez-Mosqueda, M., Godínez Álvarez, H.O. y Cuéllar-Arellano, N.A. (2017). Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35 (2), 123-133.
- Nájera-González, O., Bojórquez-Serrano, J.I., Flores-Vilchez, F., Murray-Núñez, R.M. y González-García-Sancho, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37 (2), 45-55.
- Návar, J. y Treviño, E. (1997). Estimación del tonelaje de partículas de suelo que potencialmente contribuyen a la contaminación del aire en el área metropolitana de Monterrey, México. *Terra Latinoamericana*, 16 (1), 21-31.
- Navone, S.M., Espoz-Alsina, C., Maggi A.E. e Introcaso, R.M. (2002). Monitoreo de la desertificación en los valles semiáridos del noroeste Argentino: desarrollo de un Sistema de Información Geográfica empleando indicadores biofísicos y socioeconómicos. *Revista de Teledetección*, 18, 5-19.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Archivo obtenido de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/021.pdf>
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. y Sombroek, W.G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. An Explanatory Note. *Global Assessment of Soil Degradation, GLASOD*. Visto en: http://www.isric.org/sites/default/files/ExplanNote_1.pdf
- ONU (2014). Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación, en Particular en África. Visto en: http://legal.un.org/avl/pdf/ha/unccd/unccd_ph_s.pdf

- ONU (2016a). Programa 21: Capítulo 12. Ordenación de los ecosistemas frágiles: lucha contra la desertificación y la sequía. Visto en: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter12.htm>
- ONU (2016b). UNCCD – Convención de las Naciones Unidas para la lucha contra la Desertificación. Visto en: <http://www.onu.cl/onu/unccd/>
- Ornelas-Téllez, F. (s.f.). Control con lógica difusa: Control difuso. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería Eléctrica. Morelia, Michoacan. Archivo obtenido de: http://dep.fie.umich.mx/~fornelas/data/uploads/pres_controldifuso_parte_2.pdf
- Osuna-Osuna, A.K., De Jesús Díaz-Torres, J., De Anda-Sánchez, J., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J. y Davil -Vázquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994 – 2010. *Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10 (2), 350-362.
- Pando-Moreno, M., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Maldonado-Hernández, A. y Jurado, E. (2002). Evaluación de los procesos de desertificación en una cuenca hidrológica del NE de México. *CIENCIA UANL*, 5 (4), 519-524.
- Pando-Moreno, M., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Maldonado-Hernández, A., Palacio-Prieto, J. y Estrada-Castillón, E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*, (51), 23-36.
- Parada, S. y Faúndez, J.E. (s.f.). Sistemas de indicadores socio económicos sobre los impactos de la desertificación para el combate contra la desertificación Bolivia, Ecuador y Perú. *CEPAL*. Visto en: http://www.iicadesertification.org.br/attachments/category/8/IndicadoresSocio_Economicos.pdf
- Pastrana-Ortiz, O. (2014). Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los sistemas de información geográfica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de riego y drenaje. Coahuila, México.
- Paz-González, A., Toba-Castro, M.T. y Gómez-Suárez, M.J. (1997). Relación entre textura, pH, materia orgánica y complejo de cambio en el horizonte superior de un suelo sobre serpentinas. *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña*, 22, 5-14.
- Pérez López, E. (2013). Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *Revista de las Sedes Regionales*, 14 (29), 6-18.
- Peñalva-Rosales, L.P. (2000). Propuestas de lógica difusa para la toma de decisiones. *Política y Cultura*, (13), 97-112.
- Pineda-Jaimes, N.B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M. y Plata-Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, UNAM*, (69), 33-52.
- PNUMA (2016). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Visto en: <http://www.pnuma.org/AcercaPNUMA.php>

- Quezada, J., Cerda, J.L. y Jensen, A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*, 37 (1), 78-109.
- Quirantes, J. (1988). Ensayo metodológico para valorar la erosión eólica. *Cuaternario y Geomorfología*, 2 (1-4), 85-90.
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. IICA*. San José, Costa Rica. Archivo obtenido de: <http://orton.catie.ac.cr/reprodoc/A9786e/A9786e.pdf>
- Reyes-Reyna, G. (2000). Evaluación de la desertificación en la subcuenca "Rio Limón" en el Estado de Nuevo León mediante sistema de información geográfica. Universidad Autónoma de León. Facultad de Ciencias forestales Linares, Nuevo León.
- Romero-Díaz, M.A y López-Bermúdez, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. *Papeles de geografía (física)*, 12, 47-62.
- Rubio, J. L. y Bochet, E. (1998). Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe. *Journal of Arid Environments*, 39, 113–120.
- Ruiz, J., Tamariz, V., Calderón, E., Ticante, J.E. y Cruz, A. (1998). La desertificación en el estado de Puebla. *Elementos*, 32, 51-55.
- Ruiz-Careaga, J., Calderón-Fabián, E. y Tamariz, V. (1999). Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno. *Textos BUAP*. Puebla, México.
- Salamanca-Jiménez, A. y Sadeghian-Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56 (4), 381-397.
- Salett-Biembengut, M. y Hein, N. (2004). Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática. *Educación Matemática*, 16 (2), 105-125.
- Salvati, L., Ferrara, C. y Corona, P. (2015). Indirect validation of the Environmental Sensitive Area Index using soil degradation indicators: A country-scale approach *Ecological Indicators*, 57, 360-365.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. (2012). México: el sector agropecuario ante el desafío del cambio climático. Visto en: <http://www.sagarpa.gob.mx/programas2/evaluacionesExternas/Lists/Otros%20Estudios/Attachments/37/Cambio%20Climatico.pdf>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA, (2015). Programa de fomento ganadero. Archivo obtenido de: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/puebla/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fDelegaciones%2fpuebla%2fDocuments%2fSolicitudes&FolderCTID=0x0120002526C88273A2B64ABE3B3500A08B22FB>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. (2016). Lista de beneficiarios. Visto en: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/puebla/Paginas/Listado.aspx>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. (s.f.). Estimación de la erosión del suelo. Archivo obtenido de:

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/23/01.pdf>

Secretaría de Desarrollo Social. SEDESOL (2015). Tepanco de López. Visto en: <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=pdzp&ent=21&mun=161>

Secretaría de Desarrollo Social. SEDESOL. (2016). Guía de programas sociales. Archivo obtenido de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/119689/GPS_2016.pdf

Secretaría de Desarrollo Social. SEDESOL. (2017). Información anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2017. Tepanco de López (21161). Archivo obtenido de: http://diariooficial.gob.mx/SEDESOL/2017/Puebla_161.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2012a). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y desempeño ambiental. Archivo obtenido de: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2012b). Programa de Gestión de Calidad del Aire 2012-2020 del Estado de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. Archivo obtenido de: <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/ProAire%20Puebla2.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT (2015). Programa Nacional Manejo Sustentable de Tierras. Visto en: <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/manejo-sustentable-de-tierras-y-recursos-naturales>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT y CONANP. (2013). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Archivo obtenido de: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/tehuacan_2013.pdf

Senisterra, G.E., Rodríguez-Vagaría, A.M., Gaspari, F.J. y Mazzucchelli, M.G. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55 (2), 287-303.

Shahabeddin, T.J., Ardalán, F. y Bahareh, K. (2016). A case study of desertification hazard mapping using the MEDALUS (ESAs) methodology in southwest Iran. *Journal of Natural Resources and Development*, 06, 01- 08.

Silva Arroyave, S.M. y Correa Restrepo, F.J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de la regulación económica. *Semestre Económico*, 12 (23), pp. 13-34.

Sistema Nacional de Información Municipal. SNIM (2016). Sistema Nacional de Información Municipal. Visto en: <http://www.snim.rami.gob.mx/>

Sosa, D., Boucourt, R. y Dustet, J.C. (2012). Uso de la modelación matemática en los procesos de fermentación en estado sólido de sustratos fibrosos destinados a la alimentación animal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 46 (2), 119-126.

- Torres-Benites, E., Cortes-Becerra, J., Mejía-Sáenz, E., Exebio-García, A., Santos-Hernández, A.L. y Delgadillo-Piñón, M.A. (2003). Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Josefino", Jesús María, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 21 (1), 117-126.
- Torres, L.M., Montaña, E., Abraham, E.M., Torres, E., Pastor, G. y Urbina, S. (2005). La utilización de indicadores socioeconómicos en el estudio y la lucha contra la desertificación: acuerdos, discrepancias y problemas conceptuales subyacentes. *E.I.A.L.*, 16 (2), 111-133.
- Troyo-Diéguez, E., Mercado-Mancera, G., Cruz-Falcón, A., Nieto-Garibay, A., Valdez-Cepeda, R.D., García-Hernández, J.L. y Murillo-Amador, B. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones Geográficas, UNAM*, (85), 66-81.
- UNAM (s.f.). Edafología. La desertificación en la reserva de la biosfera del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: una evaluación con indicadores biofísicos y socioeconómicos. Visto en: <http://posgrado.iztacala.unam.mx/wp-content/uploads/2013/10/Edafolog%C3%ADa.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2017). Science for changing world. GloVis. Visto en: <https://glovis.usgs.gov/>
- Vargas-Hernández, J.M. (2016). Desarrollo de la legislación ambiental en México. *INECC*. Visto en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/395/vargas.html>
- Vázquez-Alonso, A., Acevedo-Díaz, J., Manassero-Mas M.A. y Acevedo-Romero, P. (2001). Cuatro paradigmas básicos sobre la naturaleza de la ciencia 1. *Argumentos de Razón Técnica*, 4, 135-176.
- Vega-Carreño, M.B y Febles-González, J.M. (2005). La investigación de suelos erosionados: métodos e índices de diagnóstica. *Minería y Geología*, 21 (2), 1-18.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. L. (2002) Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21-37.
- Villa-Ochoa, J.A. y Ruiz-Vahos, H.M. (2009). Modelación en educación matemática: una mirada desde los lineamientos y estándares curriculares colombianos. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (27), 1-21.
- Villarruel, S.L. (2015). Indicadores para el manejo integral de cuencas en zonas áridas: Estudio de caso con enfoque holístico en la Subcuenca La Hacienda, Sonora. *Centro de investigaciones biológicas del Noreste, S.C.*
- World Reference Base. WRB. (2014). Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *FAO*, Italia.
- Zhao, H.L., He, Y.H., Zhou R.L., Su, Y.Z., Li, Y.Q. y Drake, S. (2009). Effects of desertification on soil organic C and N content in Sandy farmland and grassland of Inner Mongolia. *Catena*, 77, 187–191.
- Zika, M. y Erb, K.H. (2009). The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands. *Ecological Economics*, 69, 310–318.

10.1 Anexos

[1] Formatos de entrevista

ENTREVISTA 1

ENTREVISTA PARA REGISTRAR/DOCUMENTAR LA HISTORIA DE LA DEFORESTACIÓN
Campesinos Viejos y conocedores:

1. ¿Desde qué año empezó la deforestación en el municipio?
2. ¿Por qué causas se empezó a deforestar?
3. ¿Cuántas hectáreas se tumbaron de bosque entre 1976-1993, 1993-2000, 2000-2010?
4. ¿Quién se benefició con la tala del bosque?, ¿Por qué?, ¿En dónde quedó la madera?
5. ¿Quiénes cree usted que son los responsables de la deforestación?
6. ¿Han disminuido los rendimientos por la tala del bosque?
7. ¿Esta tala ha hecho daño al suelo?
8. ¿Qué otros impactos cree usted que ha habido por la falta de bosque?
9. ¿Ha dejado de llover?
10. ¿Qué han hecho ustedes para impedir esto?
11. ¿Han reforestado?, ¿Cuándo y cuánto?
12. ¿Usted qué opina de la deforestación?

ENTREVISTA 2

ENTREVISTA APLICADA A CAMPESINOS DE LA MICROCUENCA

DIAGNÓSTICO ECONÓMICO

1. ¿Qué tipo de tenencia de tierra tiene?
___Ejidal ___Propia ___Comunal. Ahora está parcelado y ellos trabajan como jornaleros.
¿Cuál es la extensión total de su tierra?
2. ¿Cuál es la extensión cultivable?
3. ¿Por qué nada más cultiva esa extensión? -----
4. ¿Tiene otro ingreso a parte de la parcela?
5. ¿De qué tipo?, ¿Desde cuándo? -----
6. ¿Por qué es usted campesino?
7. ¿Hace cuánto tiempo práctica la agricultura?
8. ¿El ingreso obtenido de su parcela es suficiente para satisfacer sus necesidades familiares?

Tiene algún apoyo gubernamental?

DIAGNÓSTICO SOCIAL

1. ¿Qué edad tiene?
2. ¿Cuántos hijos tiene y qué edad tienen?
3. ¿Hasta qué año estudió?
4. ¿Hasta qué año han estudiado su esposa y sus hijos?
5. ¿Por qué dejó la escuela?
6. ¿Tiene algún familiar en el extranjero?
7. ¿Quién y desde cuándo?, ¿Por qué se fue? -----
8. ¿Usted ha pensado en irse al extranjero?
9. ¿Tiene energía eléctrica?
10. ¿Cuenta con agua entubada y con drenaje?
11. ¿De qué material es su vivienda?

[2]Ruiz Careaga, J., Calderón Fabián, E. y Tamaríz, V. (1999). Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno. *Textos BUAP*. Puebla, México.

Guía para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno (parte A)

GUIA PARA LA DESCRIPCION DE PERFILES DE SUELOS Y EVALUACION DEL ENTORNO

PROYECTO: _____

PERFIL No. _____ FECHA: _____ DESCRITO POR: _____ ESCALA: _____ EXPOSICION: _____ ALTITUD: _____

HOJA DE CARTOGRAFIA: _____ LOCALIDAD: _____ MUNICIPIO: _____

COORDENADAS: N _____ W _____ ESTADO DEL TIEMPO: CLARO: _____ NUBLADO: _____ LLUVOSO: _____

CLASIFICACION

SOIL TAXONOMY: _____ FAO/UNESCO: _____

HORIZ. DIAGNOSTICO: _____ PROC. DIAGNOSTICAS: _____ PROC. FORMACION: _____

CONDICIONES DEL ENTORNO

EDAD DEL SUELO	TIPO DE FORMACION	EROSION	GRADO	RELIEVE	PENDIENTE	INFLUENCIA HUMANA
JOVEN <input type="checkbox"/>	ALUVIAL <input type="checkbox"/>	LAMINAR <input type="checkbox"/>	NULLA <input type="checkbox"/>	LLANO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULLA <input type="checkbox"/>
MADURO <input type="checkbox"/>	COLUMAL <input type="checkbox"/>	EN SURCOS <input type="checkbox"/>	LEVE <input type="checkbox"/>	CASI LLANO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MODERADA <input type="checkbox"/>
SEÑIL <input type="checkbox"/>	LACUSTRE <input type="checkbox"/>	EN CARCAVAS <input type="checkbox"/>	MODERADA <input type="checkbox"/>	LLANO DEPRES. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	FUERTE <input type="checkbox"/>
REJUVENECIDO <input type="checkbox"/>	EOLICA <input type="checkbox"/>	EOLICA <input type="checkbox"/>	FUERTE <input type="checkbox"/>	LIG. ONDULADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MUY FUERTE <input type="checkbox"/>
FOSIL <input type="checkbox"/>	IN-SITU <input type="checkbox"/>		MUY FUERTE <input type="checkbox"/>	ONDULADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
				FUERT. ONDULADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
				ALOMADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
				MONTAÑOSO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

DRENAJE	AFLORAMIENTOS	% EN SUPERFICIE	FACTORES LIMITANTES
INTERNO	EXTERNO		
IMPEDIDO <input type="checkbox"/>	IMPEDIDO <input type="checkbox"/>	GRAVAS (<7.5 CM) _____	PENDIENTE <input type="checkbox"/>
ESCAS. DRENADO <input type="checkbox"/>	ESCAS. DRENADO <input type="checkbox"/>	PIEDRAS (7.5-25 CM) _____	PROFUNDIDAD <input type="checkbox"/>
MODER. DRENADO <input type="checkbox"/>	MODER. DRENADO <input type="checkbox"/>	ROCAS (>25 CM) _____	CONTENIDO EN _____
DRENADO <input type="checkbox"/>	DRENADO <input type="checkbox"/>	GUIJARRO (<7.5 CM) _____	GRAVAS <input type="checkbox"/>
MUY DRENADO <input type="checkbox"/>	MUY DRENADO <input type="checkbox"/>	GUIJARRO (7.5-25 CM) _____	PIEDRAS <input type="checkbox"/>
EXCES. DRENADO <input type="checkbox"/>	EXCES. DRENADO <input type="checkbox"/>	GUIJARRO (>25 CM) _____	ROCAS <input type="checkbox"/>
			GUIJARROS <input type="checkbox"/>
			SALES <input type="checkbox"/>

ROCA MADRE: _____ ROCA SUBYACENTE: _____ PROF. MANTO FREATICO _____

VEGETACION: _____ CULTIVO: _____

INVENTARIO DE RECURSOS NATURALES

VEGETACION NATURAL	USO DEL SUELO	Agricultura	Ganadería	RECURSOS HIDRICOS
ESPECIES _____	ESTADO _____	Intensiva <input type="checkbox"/>	ganado mayor <input type="checkbox"/>	rio <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Agropecuario <input type="checkbox"/>	Extensiva <input type="checkbox"/>	ganado menor <input type="checkbox"/>	arroyo <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Agroforestal <input type="checkbox"/>	Subsistencia <input type="checkbox"/>	Avicultura <input type="checkbox"/>	presa <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Silvopastoril <input type="checkbox"/>	Temporal <input type="checkbox"/>		laguna <input type="checkbox"/>
	Forestal <input type="checkbox"/>	Riego <input type="checkbox"/>		pasó <input type="checkbox"/>
				no se observa <input type="checkbox"/>

TOMADO MICROMONOLITO: SI: _____ NO: _____

OBSERVACIONES: _____

Guía para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno (parte B)

Perfil No.	HORIZONTES					OBSERVACIONES
IV. CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DEL SUELO						
PROFUNDIDAD						
SEPARACION CONTRASTE/FORMA						
COLORES						
SECO						
HUMEDO						
CONT MAT ORGANICA						
SISTEMA RADICULAR <small>gruesor desarrollo</small>						
REACCION						
AL HCl						
AL NaF						
HUMEDAD (tacto)						
ESTRUCTURA						
POROSIDAD						
FASES BRILLOSAS						
PELICULAS						
CONSISTENCIA						
ADHESIVIDAD						
PLASTICIDAD						
TEXTURA (tacto)						
CONTENIDO EN:						
GRAVAS						
PIEDRAS						
ROCAS						
GUIJARROS						
GRIETAS ANCHO mm/ LARGO mm						
FISURAS ANCHO mm/ LARGO cm						
CONCRECIONES						
NODULOS						
MANCHAS						
CUBIERTA VEGETAL						
	PORCIENTO DE LA CUBIERTA VEGETAL					
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	
CULTIVOS PERENNES						
BOSQUES SIN SOTOBOSQUE						
BOSQUES CON SOTOBOSQUE						
PASTIZALES Y ZACATONALES						
	TIERRAS EN CULTIVO					
	TODO EL AÑO (2 COSECHAS)					<input type="checkbox"/>
	PARTE DEL AÑO (1 COSECHA)					<input type="checkbox"/>

[3]CONAPO. Indicadores. Visto en: <http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indicadores>

[4]INEGI. Metodología de Indicadores de la Serie Histórica Censal. Visto en: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpvsh/doc/metodologia_indicadores.pdf

[5]SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis. Visto en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>