



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**TENDENCIA DE CAMBIO DE USO DE
SUELO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

ADRIANA PAREDES GONZÁLEZ

Bajo la supervisión de: **ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO
RIVAS, DOCTOR**



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



Chapingo, Estado de México 2017

TENDENCIA DE CAMBIO DE USO DE SUELO DE LA MICROCUENCA
ZOQUIAPAN

Tesis realizada por ADRIANA PAREDES GONZALEZ bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:  
Dr. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR: _____
Dr. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ

ASESOR: Luz Judith R.E.
Dra. LUZ JUDITH RODRÍGUEZ ESPARZA

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme la beca para poder estudiar la maestría en ciencias Forestales.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por darme la oportunidad de entrar a la maestría.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la División de Ciencias Forestales, por el apoyo monetario otorgado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas, por su tiempo, apoyo, dedicación y conocimientos transferidos para realizar este trabajo de investigación

Al Dr. Francisco José Zamudio Sánchez por brindarme sus conocimientos, por dedicarme parte de su tiempo para poder concluir este trabajo.

A la Dra. Luz Judith Rodríguez Esparza por sus conocimientos transmitidos, por su tiempo y dedicación al revisar este trabajo.

A Isidro Villegas Romero por proporcionarme información acerca de la EFEZ.

A la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa por permitirme regresar a la maestría después de tener problemas de salud.

Por su apoyo en trabajo de campo y gabinete a Ríos Olvera Fabián René, Cruz Calderón Renata, Jacobo Segura Dulce Liliana, Macías Corral Ángel Fabián, Ortiz Torres César, Martínez Villa Juan Leyver, Madrigal Reyes Susana y Virgen Cobos Gabriel Humberto.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Adriana Paredes Gonzalez

Fecha de nacimiento: 28 de marzo de 1987

Lugar de nacimiento: Texcoco, Estado de México

CURP: PAGA870328MMCRND05

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cédula profesional: 7501136

Desarrollo académico

Preparatoria Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN GENERAL DE CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN	1
1.2.- OBJETIVO.....	2
1.3.- OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.4.- ANTECEDENTES	2
1.5.-DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.6.- JUSTIFICACIÓN	3
2.- REVISION DE LITERATURA DE CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN	4
2.1.- VARIABLES AMBIENTALES DE ACUERDO CON GÓMEZ & RIESCO, (2011).....	5
2.1.1.- <i>Climatología</i>	5
2.1.2.- <i>Hidrología</i>	5
2.1.3.- <i>Geología</i>	5
2.1.4.- <i>Geomorfología y topografía</i>	5
2.1.5.- <i>Modelo de elevación Digital y Porcentaje de pendiente</i>	5
2.1.6.- <i>Suelos</i>	6
2.1.7.- <i>Vegetación</i>	6
2.1.8.- <i>Usos del suelo</i>	6
2.2.- MORFOMETRÍA DE LA CUENCA	6
2.2.1.- <i>Perímetro</i>	7
2.2.2.- <i>Longitud de la corriente principal</i>	7
2.2.3.- <i>Factor de forma</i>	7
2.2.4.- <i>Coefficiente de compacidad</i>	8
2.2.5.- <i>Proporción de elongación</i>	8
2.2.6.- <i>Morfometría de la red de drenaje</i>	9
2.2.6.1.- Orden de corrientes.....	9
2.2.6.2.- La Relación de bifurcación	10
2.2.6.3.- Densidad de drenaje	11
2.2.6.4.- Densidad hidrográfica.....	12

2.2.7.- <i>Pendiente media del cauce principal</i>	12
2.2.8.- <i>Perfil longitudinal</i>	13
2.2.9.- <i>Curva Hipsométrica</i>	14
2.2.10.- <i>Tiempo de concentración</i>	15
2.3.- BIBLIOGRAFÍA	16
3.- ARTICULO CIENTÍFICO CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN	19
3.1.- RESUMEN Y ABSTRACT	20
3.2.- INTRODUCCIÓN	22
3.3.- MATERIALES Y MÉTODO	22
3.3.1.- <i>Materiales y Método Caracterización del medio físico</i>	22
3.3.2.- <i>Materiales y método análisis morfométrico</i>	23
3.4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.4.1.- <i>Resultados y discusión de caracterización del medio físico</i>	24
3.4.1.1.- Ubicación hidrográfica	24
3.4.1.2.- Delimitación en Secciones	25
3.4.1.3.- Modelo de elevación digital y Porcentaje de pendiente	26
3.4.1.4.- Porcentaje de pendiente	26
3.4.1.5.- Geología de la cuenca	27
Roca ígnea extrusiva	27
3.4.1.6.- Suelos.....	27
Andosol húmico	28
Cambisol	28
Regosol	29
Litosol	29
3.4.1.7.- Clima	29
Precipitación	30
Isotermas medias anuales	30
Temperatura mínima	31
Temperatura máxima promedio.....	31
Régimen de humedad.....	31
3.4.1.8.- Uso de suelo y vegetación	34

3.4.2.- Descripción de las características morfométricas de las secciones de la microcuenca	
Zoquiapan	35
3.4.2.1.- Perímetro	36
3.4.2.2.- Longitud de la corriente principal	36
3.4.2.3.- Factor de forma	37
3.4.2.4.- Coeficiente de compacidad	37
3.4.2.5.- Proporción de elongación	37
3.4.2.6.- Morfometría de la red de drenaje	37
Orden de corrientes.....	37
La relación de bifurcación.....	38
Densidad de drenaje.....	39
Densidad hidrográfica.....	39
3.4.2.7.- Pendiente media del cauce principal	39
3.4.2.8.- Perfil longitudinal.....	40
3.4.2.9.- Curva Hipsométrica	40
3.4.2.10.- Tiempo de concentración	41
3.5.- CONCLUSIONES	41
3.6.- BIBLIOGRAFÍA	42
4.- INTRODUCCIÓN GENERAL DE TENDENCIA DE CAMBIO DE USO DE SUELO DE LA MICROCUENCA	
ZOQUIAPAN	46
4.1 OBJETIVO GENERAL	47
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
4.3 ANTECEDENTES	47
4.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	49
4.5 JUSTIFICACIÓN	49
5.- REVISION DE LITERATURA DE TENDENCIA DE CAMBIO DE USOS DE SUELO DE LA MICROCUENCA	
ZOQUIAPAN	51
5.1.- TENDENCIA DE CAMBIO DE USO DE SUELO.....	52
5.2.- CADENA DE MARKOV	52
5.2.1 Cadena de Markov a tiempo discreto.....	53
5.2.2.- Probabilidades de transición	53
5.2.3.- Distribución inicial	54

5.2.4.- Distribución estacionaria de la cadena de Markov.....	55
5.2.5.-Determinación de las condiciones del estado estable	56
5.2.6.- El Proceso cadenas de Markov en IDRISI	56
5.3.- BIBLIOGRAFÍA	58
6.- ARTICULO CIENTÍFICO PROYECCIÓN Y CAMBIO DE USO DE SUELO EN ZOQUIAPAN, MÉXICO:	
CONSIDERACIONES PARA SU MANEJO FORESTAL	60
6.2.- INTRODUCCIÓN	63
6.3.- MATERIALES Y MÉTODOS	64
6.3.1.- Zona de estudio	66
6.4.- RESULTADOS	67
6.4.1.- Clasificación de las imágenes de satélite.....	67
6.4.1.1.- Uso de suelo y vegetación de la microcuenca Zoquiapan 2009 y 1989	68
6.4.2.- Tendencia de uso de suelo para el año 2020.....	69
6.4.3.- Cadena de Markov en el programa R	70
6.4.4.- El estado estable de la cadena de Markov	71
6.5.- CONCLUSIONES	72
6.6.-BIBLIOGRAFÍA	73
7.- ANEXOS.....	74
7.1. ANEXO CARTOGRÁFICO.....	75
7.2.- CALCULO DE PERFIL LONGITUDINAL	81
7.2.1. <i>Calculo de perfil longitudinal Sección Norte</i>	81
7.2.2. <i>Calculo de perfil longitudinal Sección Sur</i>	82
7.3.- CALCULO DE CURVA HIPSOMÉTRICA.....	83
7.3.1. <i>Calculo de curva hipsométrica Sección Norte</i>	83
7.3.2. <i>Calculo de curva hipsométrica Sección Sur</i>	83
7.3.-CÓDIGO EN R PARA 10,000 ITERACIONES DE UNA CADENA DE MARKOV A TIEMPO DISCRETO Y SU MEDIA ERGÓDICA	84

Indice de Figuras

Figura 1. Determinación de la orden de corrientes en una cuenca.....	10
Figura 2. Perfil longitudinal y en planta de un cauce, con la secuencia de rápidos y remansos (Dunne y Leopold, 1978)	14
Figura 3.-Curvas hipsométricas según Strahler citado por Guerra & González, (2002)	15
Figura 4. Ubicación hidrográfica de la microcuenca Zoquiapan	24
Figura 5. Secciones MZ Norte y MZ Sur de la microcuenca Zoquiapan	25
Figura 6. Orden de corrientes de las Secciones de la microcuenca	38
Figura 7. Perfil longitudinal de las secciones de la microcuenca Zoquiapan	40
Figura 8. Curva hipsométrica de las secciones	41
Figura 9. Ubicación de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan	48
Figura 10. Matriz de transición	54
Figura 11. Ubicación hidrográfica de la microcuenca Zoquiapan	66
Figura 12. Imagen 1989 con tres coberturas de uso de suelo forestal (1), pastizal (2) y agrícola (3) 67	
Figura 13. Imagen 2009 con tres coberturas de uso de suelo forestal (1), pastizal (2) y agrícola (3) 68	
Figura 14. Mapas de uso de suelo y vegetación de (a) 1989 y (b) 2009	69
Figura 15. Cadena de Markov para 10000 iteraciones	71
Figura 16. Media ergódica de 10000 iteraciones de una cadena de Markov a tiempo discreto	72

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Uso de suelo y vegetación serie III de INEGI	34
Cuadro 2. Calculo de parámetros morfométricos	35
Cuadro 3. Calculo de la relación de bifurcación media de las secciones de la microcuenca Zoquiapan	39
Cuadro 4. Los Ejidos colindantes con la Estación Forestal Experimental Zoquiapan	48
Cuadro 5. Descripción de categorías de uso de suelo	65
Cuadro 6. Matriz de transición para el año 2010	66
Cuadro 7.-Uso de suelo y vegetación de 2009 y 1989	68
Cuadro 8. Matriz de transición para el año 2020	69

Índice de Mapas

Mapa 1. Municipios dentro de la Microcuenca Zoquiapan	75
Mapa 2. Modelo de Elevación Digital de las Microcuencas Zoquiapan.....	75
Mapa 3. Porcentaje de pendiente de la Microcuenca Zoquiapan	76
Mapa 4. Suelos de la Microcuenca Zoquiapan	76
Mapa 5. Clima de la Microcuenca Zoquiapan.....	77
Mapa 6. Precipitación total anual de la Microcuenca Zoquiapan	77
Mapa 7. Isotermas medias anuales de la Microcuenca Zoquiapan	78
Mapa 8. Temperatura mínima de la Microcuenca Zoquiapan	78
Mapa 9. Temperatura máxima promedio de la Microcuenca Zoquiapan	79
Mapa 10. Régimen de humedad de la Microcuenca Zoquiapan	79
Mapa 11. Mapa uso de suelo y vegetación serie III de INEGI de la Microcuenca Zoquiapan.....	80

**1. INTRODUCCIÓN GENERAL DE CARACTERIZACIÓN DEL
MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA
MICROCUCENCA ZOQUIAPAN**

1.2.- Objetivo

Caracterizar el medio físico de la microcuenca Zoquiapan a través de trazas de los procesos naturales para conocer el estado actual de éstos.

1.3.- Objetivos particulares

Identificar y cuantificar los recursos naturales de la microcuenca Zoquiapan por medio de la construcción de un atlas.

Hacer la descripción morfométrica de las secciones de la microcuenca Zoquiapan.

1.4.- Antecedentes

La microcuenca Zoquiapan encierra el polígono de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan el cual forma parte del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas que de acuerdo con Lomas-Barrié et al. (2005) tiene graves problemas de desequilibrio ecológico, degradación ambiental.

De acuerdo con Álvarez et al., (2004) una forma directa de conocer la diversidad de un lugar es entender la estructura y funcionamiento de los elementos ambientales, por medio de un inventario de diversidad; cuyos datos pueden conceptualizarse a través de una caracterización con aplicación en sistemas ecológicos y de manejo de recursos naturales. Una caracterización reúne los factores bióticos y abióticos en una cierta área de la superficie terrestre donde se busca asegurar que los recursos y elementos ambientales se describan y evalúen. Determinando así su situación actual.

Por otra parte, con el abundante aumento de la población, se observa que el agua y los recursos del suelo necesitan ser manejados de manera efectiva. El agua, uno de los recursos naturales vitales para la agricultura, se está volviendo deficiente debido a la sobreexplotación, la mala recarga del acuífero subterráneo, el uso inmoderado, etcétera. Varios parámetros hidrológicos pueden correlacionarse con el tamaño, la forma, la pendiente, la densidad de drenaje, etc., por lo tanto, los análisis morfométricos proporcionan información relacionada

con la formación de varios procesos que ocurren en la superficie de la tierra (Sahu et al., 2016). Recientemente, muchos autores han intentado generar datos más precisos sobre parámetros morfométricos utilizando datos satelitales y herramientas SIG (Babu, Sreekumar, & Aslam, 2016).

1.5.-Definición del problema

La presente investigación pretende desarrollar una caracterización del medio físico de la microcuenca Zoquiapan, identificando y cuantificando los recursos naturales, también pretende estudiar diversos parámetros morfométricos como el patrón de drenaje, el orden de corrientes, la relación de bifurcación, la densidad de drenaje y otras características morfométricas de las secciones de la microcuenca, utilizando Sistemas de Información Geográfica. Es un primer estudio de esta área y sirve para determinar qué recursos naturales están presentes, así como su situación actual.

1.6.- Justificación

En un contexto de degradación de los recursos naturales del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas, la microcuenca Zoquiapan encierra los recursos hídricos de una porción del Parque al igual que los límites de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan de la Universidad Autónoma Chapingo la cual tiene por objetivos desarrollar investigación e innovaciones tecnológicas que permitan el manejo sostenible de los bosques de clima templado y semifrío. La Caracterización del medio físico y análisis morfométrico de la microcuenca Zoquiapan, pretende identificar y cuantificar los recursos naturales presentes para determinar así su situación actual, siendo un instrumento de planeación y manejo de sus recursos naturales.

En el capítulo 2 se presenta la revisión de literatura, que contiene la descripción de las variables ambientales, así como la descripción de los parámetros morfométricos de la cuenca. En el capítulo 3 se presenta el artículo científico, también presenta un anexo cartográfico.

**2.- REVISION DE LITERATURA DE CARACTERIZACIÓN DEL
MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA
MICROCUENCA ZOQUIAPAN**

2.1.- Variables ambientales de acuerdo con Gómez & Riesco, (2011)

2.1.1.- Climatología

El clima y la geología determinan la hidrología, estableciendo condiciones y fronteras para la fauna y flora. Los valores medios y extremos son un indicador de adaptación a la fenología de las especies.

2.1.2.- Hidrología

Las aguas superficiales forman rutas de dispersión de organismos, determinan la presencia de la agricultura, la erosión, la sedimentación, los flujos subterráneos, y los patrones vegetales.

2.1.3.- Geología

La geología es de suma importancia en la formación de suelos, establece patrones hidrográficos, los usos potenciales del suelo, determinan la capacidad de almacenamiento de acuíferos, los flujos subterráneos, o la estabilidad del terreno, sus características químicas exponen la riqueza en minerales, o el pH de los suelos.

2.1.4.- Geomorfología y topografía

La geomorfología y topografía reúnen la morfoestructural y la geometría del relieve. La topografía (altura, exposición, pendientes) tiene una influencia directa sobre las condiciones de creación y preservación de suelos, la erosión y la sedimentación, así como sobre el clima.

2.1.5.- Modelo de elevación Digital y Porcentaje de pendiente

La elevación media de la cuenca es una característica fisiográfica que resulta del promedio entre el valor de elevaciones de cierto número de puntos dentro de la cuenca; tiene especial interés en zonas montañosas pues nos puede dar una idea de la climatología de la región.

2.1.6.- Suelos

La caracterización del suelo muestra una compleja dependencia de factores abióticos y bióticos, por lo que los suelos surgen en una entrefase de procesos como la lixiviación y descomposición.

2.1.7.- Vegetación

Las características de la vegetación ofrecen información acerca de la biodiversidad potencial, así como la calidad y estructura de los biotopos presentes. Desde el punto de vista paisajístico, la cubierta vegetal modifica la percepción de un mismo relieve. Un paisaje rico en vegetación tiene una capacidad mayor de absorber alteraciones.

2.1.8.- Usos del suelo

La vegetación natural se combina con la actividad humana para determinar distintos estados, con una tipología que va desde lo natural a lo plenamente artificial.

2.2.- Morfometría de la cuenca

El concepto de cuenca hidrográfica se expresa como un área delimitada por la dirección de sus cursos de agua y su superficie se define por el parteaguas a partir del cual la precipitación drena por esa sección (Cloter, 2007), es la unidad básica es la red de ríos que revela la configuración estructural y geológica (Soni, 2016).

Los estudios pioneros de Horton (1932, 1945) demostraron la importancia del análisis morfométrico cuantitativo para comprender mejor las propiedades hidrológicas y geomorfológicas de las cuencas hidrográficas.

El análisis morfométrico representa un enfoque relativamente simple para describir el comportamiento hidrogeológico, los procesos de la forma de la tierra, las propiedades físicas del suelo y las características de la erosión (Fenta, Yasuda, Shimizu, & Haregeweyn, 2017).

Las características morfométricas de la cuenca controlan todo el escurrimiento superficial, y debido a esta condición, la cuenca hidrográfica se considera una unidad territorial ideal; también proporcionan la geometría de la cuenca, la naturaleza de permeabilidad de las rocas y su capacidad de almacenamiento (Soni, 2016).

A continuación, se describen algunos de los parámetros morfométricos:

2.2.1.- Perímetro

El perímetro de una cuenca de drenaje se define como la proyección horizontal. Delimita el área de la cuenca de drenaje. El parte aguas es la línea que une los puntos de mayor altura entre dos cuencas de drenaje, y separando sus escorrentías superficiales (Zavoianu, 1985). Se mide a lo largo de la división entre las cuencas hidrográficas y puede usarse como indicador del tamaño y forma de la cuenca (Umrikar, 2016).

2.2.2.- Longitud de la corriente principal

Longitud de la corriente principal es la distancia medida a lo largo del canal de la corriente desde la fuente hasta un punto dado o hacia la salida, una distancia que puede medirse en un mapa o en fotografías aéreas (Zavoianu, 1985).

2.2.3.- Factor de forma

Factor de forma (Ff) Horton (1932) definió el factor de forma (Ff) como la relación entre el área de la cuenca y la raíz cuadrada de la longitud de la cuenca. Las cuencas de largo-estrecho tienen longitudes más grandes y por lo tanto factores de forma más pequeños. Las cuencas circulares tienen factores de forma intermedia, que están cerca de uno. Para una cuenca perfectamente circular, el valor del factor de forma será mayor que 0,78 (Magesh, Jitheshlal, Chandrasekar, & Jini, 2013) aquellas cuencas con formas alargadas, tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas.

La fórmula para calcular el factor de forma es:

$$Rf = \frac{A}{Lb^2}$$

Rf es el factor adimensional de forma de Horton.

A es el área de la cuenca expresada en km².

Lb es la longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta (km²).

2.2.4.- Coeficiente de compacidad

El Coeficiente de compacidad se definió como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica, fue introducida por Magette en 1976, de acuerdo con Jardí, (1985).

El coeficiente de compacidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$Ck = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$$

donde Ck es el Coeficiente de compacidad (adimensional), A es el área de la cuenca expresada en km² y P es el perímetro de la cuenca expresado en km.

Clase Ck1: Rango entre 1 y 1.25. Corresponde a forma redonda a oval redonda.

Clase Ck2: Rango entre 1.25 y 1.5 Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga.

Clase Ck3: Rango entre 1.5 y 1.75 Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

2.2.5.- Proporción de elongación

La proporción de elongación es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, su tendencia a ser de forma alargada, en relación a su longitud axial, y al ancho máximo de la cuenca. Aquellas cuencas que presentan valores mayores o cercanos a uno, presentan un área más ancha que larga,

obedeciendo a una forma menos alargada. Proporciona una idea de la dinámica rápida o lenta del agua en los drenajes y su potencial erosivo o de arrastre.

Se determina mediante la siguiente expresión:

$$Pe = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{Lb}$$

Donde Pe es la proporción de elongación (adimensional), A es el área de la cuenca expresada en km² y Lb es la Longitud del cauce principal (km).

2.2.6.- Morfometría de la red de drenaje

Las características de los drenes superficiales de una cuenca dan a conocer la dinámica de la regulación hídrica en una unidad hidrográfica particular. Las características de la red de drenaje permiten deducir la interacción entre el sistema fluvial y demás características ambientales de la cuenca.

2.2.6.1.- Orden de corrientes

La jerarquización permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal.

El concepto de orden de corrientes fue introducido por Horton en 1932. El ordenamiento de corrientes es un método ampliamente aplicado para clasificar las corrientes en una cuenca fluvial. El ordenamiento de corrientes se define como una medida de la posición de una corriente en la jerarquía de afluentes (Magesh et al., 2013). La ordenación de secuencia se refiere a la determinación de la posición jerárquica de una corriente dentro de la cuenca de drenaje. La corriente del tronco es el segmento de la corriente del orden más alto. (Umrikar, 2016).

El método propuesto por Horton (1945) define escurrimiento de primer orden a aquel que carece de tributarios y uno de segundo orden que recibe al menos uno o varios tributarios del primer orden. El tercer orden lo confluyen uno o varios

afluentes de segundo orden, pero puede recibir directamente afluentes de primer orden; así sucesivamente se llega al orden más elevado, que debe corresponder al cauce principal de la cuenca; como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Determinación de la orden de corrientes en una cuenca.

2.2.6.2.- La Relación de bifurcación

Rb La relación de bifurcación (Rb) fue introducida por Horton en 1932. Rb está relacionada con el patrón de ramificación de una red de drenaje y se define como la relación entre el número de arroyos de cualquier orden dado y el número de arroyos en el orden superior próximo en una cuenca de drenaje. Es una propiedad adimensional y muestra el grado de integración que existe entre las corrientes de varios órdenes en una cuenca de drenaje (Magesh et al., 2013). Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{N_U}{N_{U+1}}$$

donde N_U son las corrientes del orden de interés y N_{U+1} las corrientes del orden siguiente.

La relación de bifurcación, determina la mayor o menor rapidez de las ondas de crecida, lo que define, de alguna manera, el grado de peligrosidad de la cuenca. Los índices bajos suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, lo que repercute directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas (Guerra & González, 2002). Permite comprender algunas variaciones geoecológicas que se producen en el territorio de la cuenca, fundamentalmente cambios importantes en el sustrato rocoso y de los grupos de suelos dominantes. Las cuencas cuya relación de bifurcación permanece constante, indican homogeneidad en las características geoecológicas anteriores. La relación de bifurcación generalmente es entre 3 y 5 son cuencas con variaciones considerables en sus características geoecológicas.

2.2.6.3.- Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la relación entre la longitud total de la corriente de todos los órdenes por unidad de área de la cuenca (Horton 1945). Es una medida numérica de la disección del paisaje y del potencial de escorrentía. Muestra la capacidad de infiltración de la tierra y cubierta vegetal de la cuenca. Influye en la producción de agua y sedimentos de la zona de captación y en la susceptibilidad a la erosión. Si bien la alta densidad de drenaje es la resultante de material subterráneo impermeable, vegetación escasa y relieve montañoso. La baja densidad de drenaje conduce a una textura de drenaje gruesa, mientras que la alta densidad de drenaje conduce a una textura de drenaje fina (Soni, 2016).

Se calcula con apoyo de la siguiente expresión:

$$Dd = \frac{Lc}{A}$$

donde Lc es la longitud de corrientes de diferentes órdenes y A es el área de la cuenca en (km²).

Debido a la interacción continua entre la escorrentía superficial y los factores responsables de la resistencia de una zona de drenaje (roca, suelo, cubierta vegetal), la densidad de drenaje es una característica importante de los sistemas de drenaje tanto desde el punto de vista geomorfológico como hidrológico. Para los hidrólogos, la densidad de drenaje es significativa porque desempeña un papel importante en los procesos de escorrentía de superficie, influyendo en la intensidad de las inundaciones torrenciales, la concentración, la carga de sedimentos e incluso el balance hídrico en la cuenca del drenaje (Zavoianu, 1985).

La densidad de drenaje afecta el patrón de escorrentía en que una alta densidad de drenaje drena rápidamente el agua de escorrentía, disminuye el tiempo de retraso y aumenta el pico del hidrograma. La densidad de drenaje controla la velocidad de la escorrentía después de un período de fuertes lluvias. Cuanto mayor sea la densidad de drenaje, mayor será la escorrentía (Umrikar, 2016).

2.2.6.4.- Densidad hidrográfica

La densidad hidrográfica es la relación que existe entre el número de corrientes y el área de drenaje. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{N_c}{A}$$

donde N_c es el número de corrientes de diferentes órdenes y A es el área de la cuenca en (km^2).

2.2.7.- Pendiente media del cauce principal

La pendiente puede definirse como la tangente del ángulo de inclinación de una línea o plano definido por una superficie terrestre. Es el resultado de una interacción compleja y continua entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre la superficie de la Tierra (Zavoianu, 1985).

La pendiente media del cauce principal de la cuenca se puede estimar mediante la fórmula siguiente:

$$\%P_n = \left[\frac{H}{L} \right] * 100$$

$\%P_n$ es la pendiente media del cauce principal.

H = Desnivel entre la zona de emisión y el sitio más alejado de la cuenca (m).

L = longitud a lo largo del cauce entre la zona de emisión y el sitio más alejado (m).

También juega un papel importante en los procesos fluviales. No se puede abordar la formación de escorrentía, el movimiento de las inundaciones, el potencial energético de los cursos fluviales, el modelado y evolución de los canales fluviales, ni los procesos de erosión y transporte que se producen en estos últimos sin conocer las pendientes de la superficie terrestre y del río (Zavoianu, 1985).

2.2.8.- Perfil longitudinal

El perfil longitudinal de una corriente, es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del río principal, dependerá de numerosos factores determinantes entre los cuales están el relieve inicial, tipo de roca, la etapa de evolución paleogeográfica y por movimientos tectónicos positivos o negativos. Generalmente, la forma de un perfil, y especialmente su grado de concavidad, es el resultado de varios factores, entre los que se puede mencionar: descarga que se recoge por una red de drenaje en canales individuales, lo que determina la capacidad de transporte de la corriente principal, el desgaste de los sedimentos en un canal dado a través de la acción del agua, lo que da lugar a una disminución del tamaño de las partículas de sedimento (Zavoianu, 1985).

Se pueden inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión de la hidrógrafa, la variación del caudal con el tiempo. También los perfiles se usan para estudios de prefactibilidad de proyectos hidroeléctricos, producción de sedimentos, ubicación de posibles sitios susceptibles de avalanchas, etc.

Generalmente, cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrógrafas más picudas y más cortas que cuencas con pendientes menores (Villegas Yepes, 2015), por efecto de la inclinación de la pendiente presentan caudales más altos como se observa en la Figura 2.

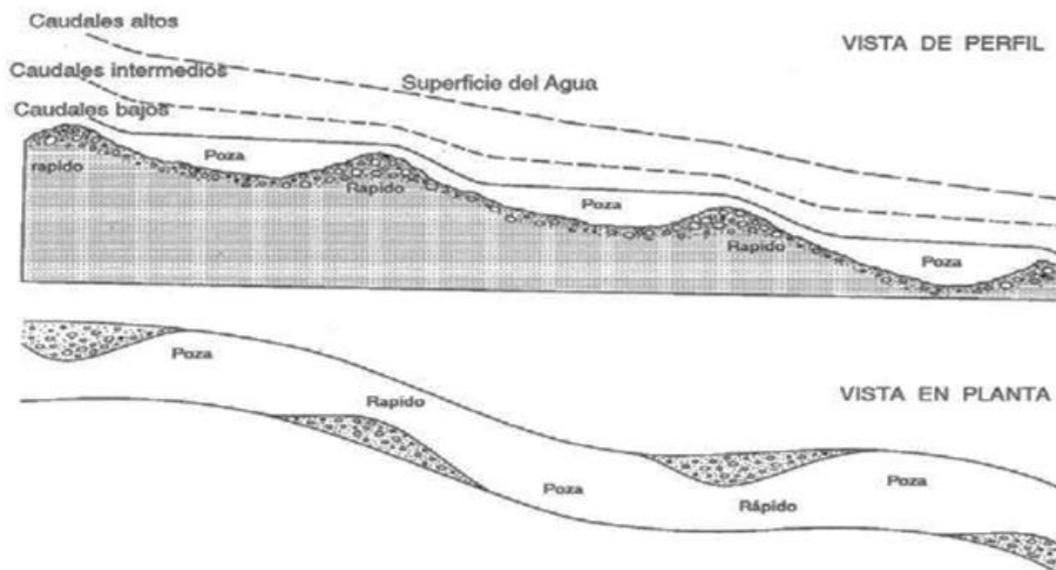


Figura 2. Perfil longitudinal y en planta de un cauce, con la secuencia de rápidos y remansos (Dunne y Leopold, 1978)

2.2.9.- Curva Hipsométrica

Una curva hipsométrica es una representación gráfica que muestra en abscisas las áreas de la cuenca situadas por encima de varias altitudes. Si es necesario, las áreas de la cuenca pueden ser dadas como porcentajes del total. La curva hipsométrica también se ha denominado gráfico de relieve de la cuenca de drenaje (Zavoianu, 1985).

Esta curva representa el área drenada variando con la altura superficial de la cuenca; interpretándose como la variación media del relieve de la cuenca. Strahler (1952) mostró tales curvas puede proporcionar indicaciones valiosas de la etapa de evolución de una región particular o cuenca de drenaje. La Figura 3

presenta de manera gráfica las curvas hipsométricas características de una cuenca joven, madura y en etapa senil.

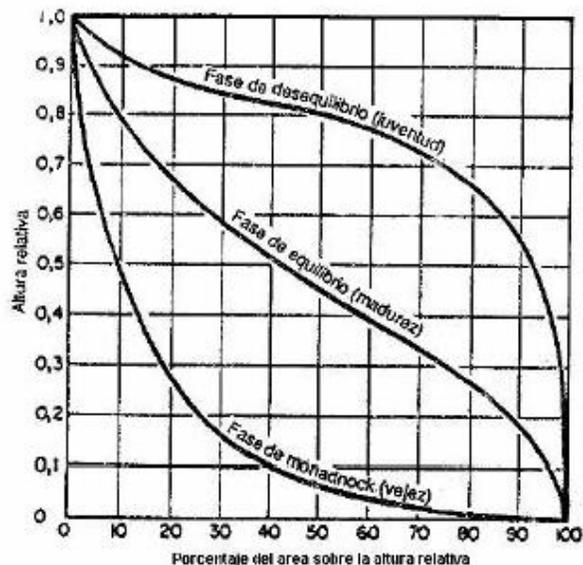


Figura 3.-Curvas hipsométricas según Strahler (1952) citado por Guerra & González, (2002)

2.2.10.- Tiempo de concentración

Tiempo de concentración (T_c) (h), corresponde al tiempo mínimo necesario para que todos los puntos hidrológicos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía al punto de salida y está determinado por el tiempo que tarda una partícula hidrológicamente más lejana en viajar hasta el punto emisor de la cuenca (López Cadenas de Llano, (1998) citado por Cruz Romero et al., (2015)). El cálculo correspondió a la utilización de variables de tipo topográfico, en donde destacan la importancia de la inclinación y la longitud del cauce principal, utilizando la ecuación:

$$T_c = 0.3 * (L/J^{1/4})^{0.76}$$

en donde T_c = tiempo de concentración (hr), L = longitud del cauce (m), J = pendiente media del cauce (%).

2.3.- Bibliografía

- Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., ... Villarreal, H. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Retrieved from https://www.zin.ru/animalia/coleoptera/pdf/villareal_et_al_2004.pdf
- Babu, K. J., Sreekumar, S., & Aslam, A. (2016). Implication of drainage basin parameters of a tropical river basin of South India. *Applied Water Science*, 6, 67–75. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0212-8>
- Cloter, H. (2007). *El manejo integral de cuencas en México* (Secretaría). México, D. F.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23, núm. 6, 26–34. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>
- Dunne, T., Leopold L. B., 1978. *Water in Environmental Planning*. Illustrated. pp.818
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., & Haregeweyn, N. (2017). Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0534-4>
- Gómez Zotano, J., & Riesco Chueca, P. (2010). *Marco conceptual y metodológico para los paisajes españoles: aplicación a tres escalas espaciales*. (Junta de Andalucía, Ed.), Junta de Andalucía. Retrieved from <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0643729.pdf>

- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7, Num. 2, 88–108. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070208%0A>
- Horton RE (1932) Drainage basin characteristics. *Trans Am Geophys Union*. 13, pp 350–361
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41–68.
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11, num1, 57–71.
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V. (2013). Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Applied Water Science*, 3, 467–477. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0095-0>
- Sahu, N., Reddy, G. P. O., Kumar, N., Nagaraju, M. S. S., Rajeev, S., & Singh, S. K. (2016). Morphometric analysis in basaltic Terrain of Central India using GIS techniques: a case study. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0442-z>
- Soni, S. (2016). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>

Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (área/altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Amer., Bull.*, 63: 1117-1142.

Umrikar, B. N. (2016). Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. *Applied Water Science*.
<https://doi.org/10.1007/s13201-016-0390-7>

Villegas Yepes, P. P. (2015). Análisis Morfométrico de una cuenca. Retrieved from <http://documentslide.com/documents/analisis-morfometrico-de-una-cuenca.html>

Zavoianu, I. (1985). *Developments in water science Morphometry of drainage basins*. (B. Editura Academiei Republicii Socialiste Romhnia, Ed.) (Elsevier). Romania.

**3.- ARTICULO CIENTÍFICO CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO
FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA MICROCUENCA
ZOQUIAPAN**

3.1.- Resumen y abstract

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN

RESUMEN

Una caracterización reúne los factores bióticos y abióticos de una cierta área donde se busca asegurar que los recursos y elementos ambientales se describan y evalúen. La presente investigación caracteriza el medio físico de la microcuenca Zoquiapan, identificando y cuantificando los recursos naturales. También se evaluaron diversos parámetros morfométricos como el patrón de drenaje, el orden de corrientes, la relación de bifurcación, la densidad de drenaje y otras características morfométricas de las secciones de la microcuenca, utilizando sistemas de información geográfica. Se hizo una revisión de capas de información de variables ambientales de la microcuenca Zoquiapan como geología, suelos, clima, uso de suelo y vegetación, las cuales fueron reunidas en un sistema de información geográfica. Como resultados se obtuvo que de acuerdo al factor de forma ambas secciones de la microcuenca son de forma alargada, lo que indica que ambas tienen una alta velocidad de flujo. El perfil longitudinal de las microcuencas también muestra un flujo alto. Ambas microcuencas concentran más del 75% de su superficie con pendiente de moderada a fuerte, este factor se relaciona con la susceptibilidad de los suelos a ser arrastrados. Los suelos dominantes son Andosol Húmico, con textura media, que son suelos oscuros con fertilidad considerable y Regosol Districo, con textura media que se caracterizan por no tener estructura y ser pobres o muy pobres en nutrientes. El bosque de pino es predominante. El clima predominante en ambas cuencas es: C(E)(w₂)(w): semifrío subhúmedo. En conclusión, el sistema de información geográfica permitió hacer la caracterización de los recursos naturales de la microcuenca, al igual que el análisis morfométrico. El área estudiada es montañosa con pendientes muy escarpadas, la información generada puede ser utilizada en estudios posteriores.

Palabras clave: análisis morfométrico, caracterización del medio físico, Zoquiapan

Tesis de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Adriana Paredes Gonzalez
Director de tesis: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

CHARACTERIZATION OF THE PHYSICAL ENVIRONMENT AND MORPHOMETRIC ANALYSIS OF MICRO-BASIN ZOQUIAPAN

ABSTRACT

A characterization brings together the biotic and abiotic factors of a certain area where it is sought to ensure that resources and environmental elements are described and evaluated. This research characterizes the physical environment of the Zoquiapan micro-basin, identifying and quantifying the natural resources, also evaluating several morphometric parameters such as drainage pattern, stream order, bifurcation ratio, drainage density and other morphometric characteristics of the sections of the micro-basin, using geographic information systems. A review was made of layers of information on environmental variables of the Zoquiapan micro-basin, such as geology, soils, climate, land use and vegetation, which were collected in a geographic information system. As results it was obtained that according to the form factor, both sections of the micro-watershed are of long form, indicating that both have a high flow rate. The longitudinal profile of the micro-basins also shows a high flow. Both micro-basins concentrate more than 75% of their surface with moderate to strong slope, this factor is related to the susceptibility of the soils to be washed away. The dominant soils are Andosol Humic with medium texture that are dark soils with considerable fertility and Regosol Districo, with medium texture that are characterized by not having structure and being poor or very poor in nutrients. The pine forest is predominant. The predominant climate in both basins is: C (E) (w2) (w): subhumid semifer. In conclusion, the geographic information system made it possible to characterize the natural resources of the micro basin as well as the morphometric analysis. The studied area is mountainous with very steep slopes, the generated information can be used in later studies.

Key words: morphometric analysis, characterization of the physical environment, Zoquiapan

3.2.- Introducción

La microcuenca Zoquiapan encierra el polígono de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan el cual forma parte del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas que de acuerdo con Lomas-Barrié et al. (2005) tiene graves problemas de desequilibrio ecológico, degradación ambiental. Este documento presenta un primer estudio de la microcuenca Zoquiapan desde su delimitación hasta la caracterización del medio físico, que se realizó identificando y cuantificando los recursos naturales, también estudia diversos parámetros morfométricos como el patrón de drenaje, el orden de corrientes, la relación de bifurcación, la densidad de drenaje y otras características morfométricas de las secciones de la microcuenca, utilizando Sistemas de Información Geográfica.

Los estudios pioneros en análisis morfométrico son de Horton (1932, 1945). Los análisis morfométricos proporcionan información relacionada con la formación de varios procesos que ocurren en la superficie de la tierra (Sahu et al., 2016). Y representa un enfoque que describe el comportamiento hidrogeológico, las propiedades físicas del suelo y las características de la erosión (Fenta et al., 2017).

Por otro lado, con el estudio del medio físico se determina su capacidad para soportar los distintos usos del suelo, así como la situación actual del recurso, algunas variables que se analizan son: relieve, pendientes, geología, edafología, vegetación, clima e hidrología.

3.3.- Materiales y Método

3.3.1.- Materiales y Método Caracterización del medio físico

Se hizo una revisión de capas de información de variables ambientales de la microcuenca Zoquiapan como geología, suelos, clima, uso de suelo y vegetación, las cuales fueron reunidas en un sistema de información geográfica, además de describir y cuantificar las variables de cada cobertura.

El modelo de elevación digital con pixel de 13m se interpola a partir de las curvas de nivel equidistantes cada 20 metros en el programa ArcGis 10.3. A partir de este se calculó el modelo de pendientes.

3.3.2.- Materiales y método análisis morfométrico

Utilizando curvas de nivel, el modelo de elevación digital y las corrientes se obtuvieron los límites topográficos de la microcuenca Zoquiapan, así como su división en dos secciones debido a que algunos procesos asociados al recurso agua como el escurrimiento, la calidad del agua, la erosión hídrica y la producción de sedimentos, se analizan por medio de estas unidades hidrográficas. Se obtuvieron parámetros como, área, longitud del cauce principal, perímetro, longitud de la cuenca, orden de corrientes, longitud de corrientes de diferentes órdenes, número de corrientes de diferentes órdenes; para aplicar el método morfométrico de cuencas.

Para estimar el perfil longitudinal del cauce principal de las microcuencas se convirtió de formato de línea a punto con la extensión EDtools de ArcView 3.2 después se agregaron sus coordenadas x, y, z, utilizando el modelo de elevación y la extensión Grid analyst (versión 1.1) para posteriormente calcular la distancia entre dos puntos con la siguiente ecuación, finalmente se graficó distancia contra altitud, los cálculos de perfil longitudinal están en el apartado de anexos.

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Para calcular las curvas hipsométricas se interceptaron las curvas de nivel cada 100 metros con el polígono de las secciones de la microcuenca Zoquiapan, para posteriormente convertir a polígonos las superficies encerradas, se utilizó el programa CartaLinx, los cálculos de curva hipsométrica se presentan en anexos.

3.4.- Resultados y Discusión

3.4.1.- Resultados y discusión de caracterización del medio físico

3.4.1.1.- Ubicación hidrográfica

La Microcuenca Estación Forestal Experimental Zoquiapan se ubica en la Región hidrográfica XVIII Balsas, sobre la Cuenca del Río Atoyac en las subcuenca RH18Ad San Martín Texmelucan como se muestra en la Figura 4. Sus coordenadas extremas bajo la proyección UTM Zona14, Datum North American 1983 y esferoide GRS 1980 son 2137115.965 N, 2122190.173 S. 544888.067 E y 532075.201 O.

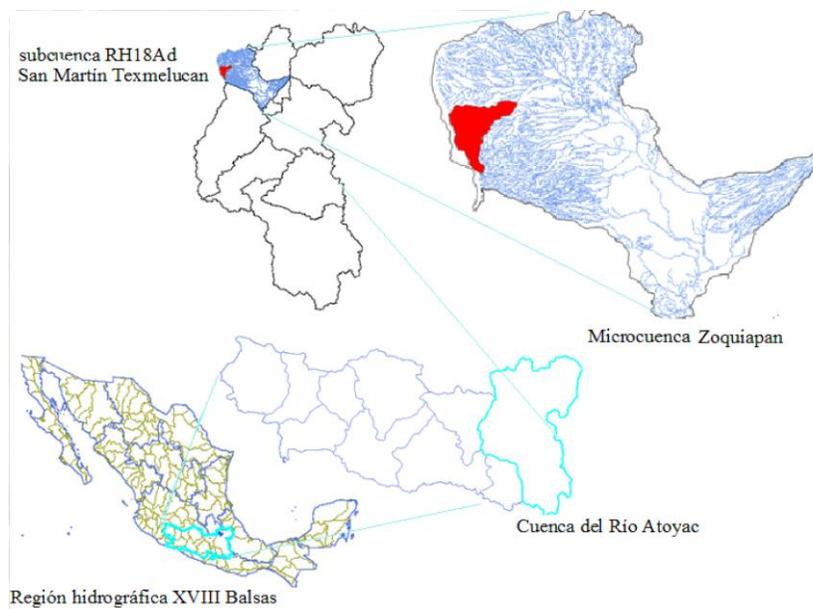


Figura 4. Ubicación hidrográfica de la microcuenca Zoquiapan

La Microcuenca tiene una superficie de 8,087.16 ha se localiza en los límites estatales de México y Puebla, en los municipios de Ixtapaluca, Chalco y Tlalmanalco en el estado de México, así como en Tlahuapan y San Salvador el verde en Puebla. La superficie ocupada en cada municipio se menciona continuación: Tlalmanalco Estado de México con 1696.55 hectáreas que corresponden al 20.98% de la superficie de la microcuenca; Ixtapaluca, Estado de México con 3333.28 ha (41.22% de la superficie de la microcuenca); Chalco, Estado de México con 81.80 ha (1.01% de la superficie de la microcuenca); San Salvador el Verde, Puebla con 201.42 ha (2.49% de la superficie de la

microcuenca) y Tlahuapan, Puebla con 2774.12 ha (34.30% de la superficie de la microcuenca).

3.4.1.2.- Delimitación en Secciones

Dentro de la microcuenca Zoquiapan se encuentra la Estación Forestal Experimental Zoquiapan de la Universidad Autónoma Chapingo, cuya superficie es de 1,624.23 ha y 25.91 Km de perímetro. Sin embargo, al dividir la microcuenca dicha unidad experimental se ubica dentro de MZ_Norte la cual tiene 4,444.01 ha que corresponde a el 54.95% del área de la Sección Norte como se muestra en la Figura 5.

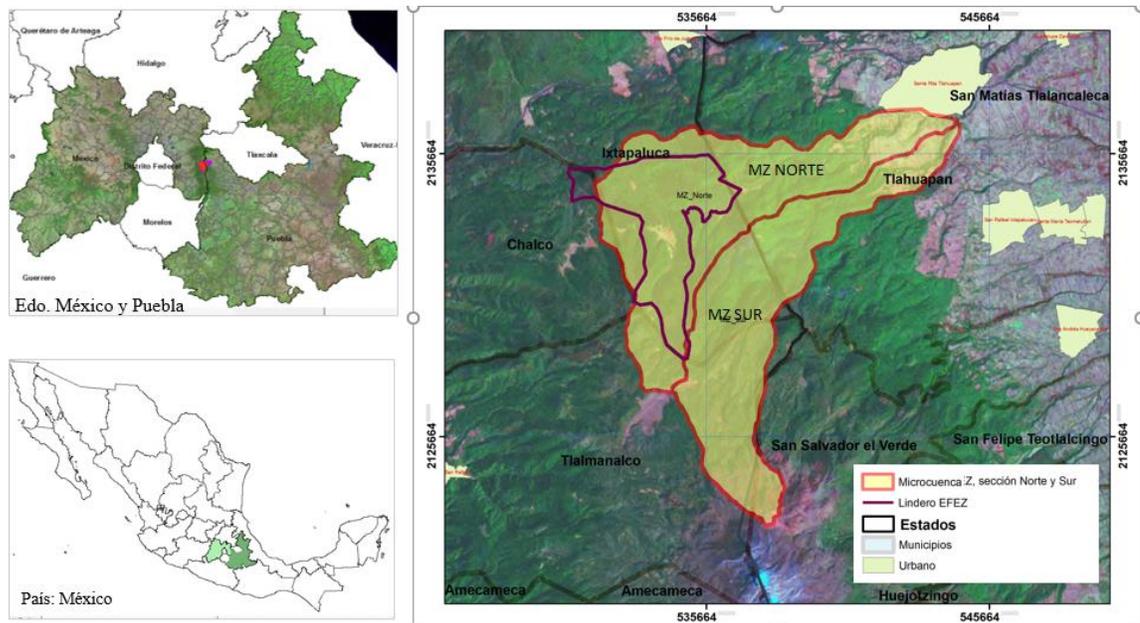


Figura 5. Secciones MZ Norte y MZ Sur de la microcuenca Zoquiapan

El 89% de la MZ_Norte está en los municipios de Ixtapaluca, Estado de México. y Tlahuapan, Puebla. Mientras que el 94.47% de la MZ_Sur corresponden a los municipios de Tlamanalco, Tlahuapan e Ixtapaluca.

La MZ_Norte se ubica en 4 municipios Chalco con 81.80 ha; Ixtapaluca con 2436.90 ha; Tlahuapan con 1558.89 ha y Tlamanalco con 366.42 ha.

La segunda sección corresponde a la MZ_Sur que cubre 3643.16has y se ubica en los municipios de Ixtapaluca con 896.38 ha, San Salvador el Verde con 201.42 ha; Tlahuapan con 1215.23 y Tlalmanalco con 1330.12 ha.

3.4.1.3.- Modelo de elevación digital y Porcentaje de pendiente

La Sección MZ-Norte tiene una altitud máxima de 3715, una mínima de 2450 y un promedio de 3100m, el 26.23% de su superficie se encuentra entre los 2300 y los 3000msnm, el 68.5% de su superficie se encuentra entre los 3000 y 3500msnm y el 4.94 de su superficie se encuentra de los 3500 a los 3700msnm

La sección MZ-Sur tiene una altitud mínima de 2575, una máxima de 4642; su altitud promedio es de 3300m. El 34% de su superficie se encuentra entre los 2500 y 3000 msnm, el 43.43% de su superficie entre los 3000 y 3500msnm, el 16.98% de su superficie se encuentra entre los 3500 y 4000msnm y el 5.6% de su superficie se encuentra entre los 4000 a los 4500msnm.

3.4.1.4.- Porcentaje de pendiente

Se considera pendiente plana de 0° a 1° que corresponde a pendientes menores de 1.74%, pendiente suave en el rango de 1° a 3° (1.74%-5.24%), moderada de 5° a 15° (8.74%-26.74%) Pendiente fuerte mayor de 15° (26.74%). El porcentaje de pendiente se obtuvo a partir del modelo de elevación en la sección MZ-Sur concentra el 47% de su superficie con pendiente fuerte, mientras que en la sección MZ-Norte 35.97%. Ambas microcuencas concentran más del 75% de su superficie de moderada a Fuerte, este factor se relaciona con la susceptibilidad de los suelos a ser arrastrados.

En la MZ_Norte el 2.42% de su superficie tiene pendiente plana de 0 a 1.74%, el 10.44% de su superficie es de pendiente suave (1.74-5.24% de pendiente), el 10.55 % de la superficie es de suave a moderada con 5.24 a 8.74% de pendiente, el 40.66% de su superficie es de pendiente moderada (con 8.74% - 26.74% de pendiente) y el 35.93% de su superficie es de pendiente fuerte con 26.74% - 100%

En la MZ_Sur 0.88% de su superficie es plana, 5.86% de su superficie es suave, 7.96% de su superficie es de suave a moderada 38.05% de su superficie es moderada y el 47.26% de su superficie es fuerte.

3.4.1.5.- Geología de la cuenca

Ts(Igei) Unidad Cronoestratigráfica, clase ígnea extrusiva, tipo ígnea extrusiva básica, era cenozoico.

Las unidades cronoestratigráficas son las divisiones de cuerpos de roca utilizadas en geología histórica que sirven de base material para formar la escala temporal geológica y pretenden representar el total de los cuerpos de roca de la Tierra según su tiempo relativo de formación, sin solapamientos ni lagunas. Actualmente las unidades cronoestratigráficas cubren todo el Fanerozoico y el Ediacárico del Precámbrico (el resto del Precámbrico, desde la formación de la Tierra, está dividido por convenios internacionales en unidades geocronométricas, basadas en fechas absolutas en millones de años).

Roca ígnea extrusiva

Las rocas volcánicas típicas son formadas por el rápido enfriamiento de la lava y de fragmentos piroclásticos. Este proceso ocurre cuando el magma es expulsado por los aparatos volcánicos; ya en la superficie y al contacto con la temperatura ambiental, se enfría rápidamente desarrollando pequeños cristales que forman rocas de grano fino (no apreciables a simple vista) y rocas piroclásticas. Los piroclásticos (del griego pyro, fuego, y klastos, quebrado), son producto de las erupciones volcánicas explosivas y contienen fragmentos de roca de diferentes orígenes, pueden ser de muchas formas y tamaños.

3.4.1.6.- Suelos

De acuerdo con Ortiz Solorio y Pajaro (1988), las microcuencas tienen cuatro unidades de suelo Andosol húmico con textura media (th/2), Cambisol húmico con textura media (Bh/2), Regosol districo con textura media (Rd/2) y Litosol con textura gruesa (l/1). En la microcuenca Norte predominan el Andosol húmico y el Regosol districo con 47.68 y 36.35% de la superficie respectivamente. El restante

15.97% es de Cambisol húmico. En la microcuenca Sur el 65.46% de su superficie es de Regosol Districo, seguido por el 21.09% de su área de Andosol húmico, 10.93% de su superficie es de Cambisol húmico y 2.51% de su superficie es Litosol.

Andosol húmico

Los Andosoles son los suelos volcánicos por antonomasia. Se forman sobre cenizas y vidrios volcánicos, así como a partir de otros materiales piroclásticos. Cuando son jóvenes atesoran colores oscuros, siendo altamente porosos, ligeros, permeables, de buena estructura y fáciles de trabajar. Su fertilidad es considerable. Se trata de suelos muy aptos para la agricultura si las condiciones del relieve lo permiten, su ubicación se circunscribe generalmente a las regiones con volcanismo (Ibáñez J. J. y Manríquez C. J. F. 2011).

Cambisol

El término Cambisol deriva del vocablo latino "cambiare" que significa cambiar, haciendo alusión al principio de diferenciación de horizontes manifestado por cambios en el color, la estructura o el lavado de carbonatos, entre otros. Los Cambisoles se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Aparecen sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación.

El perfil es de tipo ABC. El horizonte B se caracteriza por una débil a moderada alteración del material original, por la usencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro y aluminio, de origen iluvial.

Permiten un amplio rango de posibles usos agrícolas. Sus principales limitaciones están asociadas a la topografía, bajo espesor, pedregosidad o bajo contenido en bases. En zonas de elevada pendiente su uso queda reducido al forestal o pascícola.

Cambisol Húmico: Símbolo Bh, Cambisol con una capa superficial oscura, a veces gruesa, de regular a buen contenido de materia orgánica pero pobre en nutrientes.

Regosol

Los Regosoles se desarrollan sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Aparecen en cualquier zona climática sin permafrost y a cualquier altitud. Son muy comunes en zonas áridas, en los trópicos secos y en las regiones montañosas. Su uso y manejo varían muy ampliamente. Bajo regadío soportan una amplia variedad de usos, si bien los pastos extensivos de baja carga son su principal utilización. En zonas montañosas es preferible mantenerlos bajo bosque.

Regosol dístico. Una saturación en bases menor del 50 % en alguna parte situada entre 20 y 100 cm.

Litosol

Suelo con menos de 10 cm. de espesor Suelos someros, sin desarrollo del perfil Están constituidos por gravas, piedras y materiales rocosos de diferentes tamaños.

3.4.1.7.- Clima

Según Casa (1997) en ambas microcuencas el clima dominante es el semifrío subhúmedo (C(E)(w₂)(w)) con 4179 has en la microcuenca Norte (94.05% de su superficie) y en 3161 has en la microcuenca Sur (86.83% de su superficie). El clima frío (E(T)H) solo está presente en la microcuenca Sur con 269 has (7.41% de su superficie); mientras que el clima templado subhúmedo (C(E)(w₂)(w)) abarca 266 has en la microcuenca Norte (5.99% de su superficie) y 209 ha en la microcuenca Sur que equivale al 5.76% de su superficie.

Cabe mencionar que de acuerdo a (Virgen Cobos, Gómez Díaz, Monterroso Rivas, & Borja de la Rosa, 2016) dentro de la microcuenca norte donde se encuentra la Estación Forestal Experimental Zoquiapan identificaron los siguientes climas:

Cb' (w₂)(w) ig semifrío del grupo de los templados con verano fresco largo; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5; isothermal; con marcha de temperatura tipo ganges.

Cc (w₂) ig semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 anual; isothermal; con marcha de temperatura tipo Ganges.

Cc (w₂)(w) ig semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5; isothermal; con marcha de temperatura tipo Ganges.

Precipitación

De acuerdo a la capa de precipitación de Vidal- Zepeda.1990, disponible en CONABIO, para la sección MZ-Norte el 94.81% de su superficie tiene una precipitación total anual que oscila entre 1000 a 1200mm, para la sección MZ-Sur el 52.52% de su superficie se encuentra en este mismo rango, la sección Sur también presenta un alto porcentaje de su superficie (46%) con un rango de precipitación que varía entre 1200 a 1500mm.

Isotermas medias anuales

De acuerdo a la cobertura de García E. (1998) disponible en CONABIO el 82% de la superficie de la sección MZ- Norte es considerado semifrío por tener una temperatura media anual de 10°C a 12° C. La Sección MZ-Sur también es semifrío con temperaturas de 5°C a 12°C, en ambas microcuencas menos del 7% de su área tienen temperaturas que oscilan entre los 12°C a 14°C y es considerado templado esta superficie se ubica en la salida de la cuenca al nor-este.

10.44% de la superficie de la sección Norte es Semifrío con temperatura media anual de 8 a 10, el 82.46% de la superficie de la sección Norte es Semifrío con

temperatura media anual de 10 a 12 y el 7.10% de la superficie de la sección Norte es templado con temperatura media anual de 12 a 14.

En la MZ_Sur el 0.19% de su superficie es Frio con temperatura media anual de -2 a 5, el 5.19% de su superficie es Semifrío con temperatura media anual de 5 a 6, el 10.49% de su superficie es Semifrío con temperatura media anual de 6 a 8, el 36.45% de su superficie es Semifrío con temperatura media anual de 8 a 10, el 41.49% de su superficie es Semifrío con temperatura media anual de 10 a 12 y el 6.19% de su superficie es Templado con temperatura media anual de 12 a 14.

Temperatura mínima

La temperatura mínima se decrece con la altitud, la Sección Sur presenta temperatura mínima de -10°C a -8°C en el 16% de su superficie; en el rango de -8°C a -6°C, la microcuenca Norte presenta el 35% de su superficie, mientras que en la microcuenca Sur abarca el 53.55%; otro rango significativo es de -6°C a -4°C que cubre el 53.34 % de la superficie de la microcuenca Norte y 19.48% de la sección Sur de acuerdo a la cobertura de Garcia (1998) disponible en CONABIO.

Temperatura máxima promedio

De acuerdo con García E. disponible en CONABIO (1998) en la microcuenca Norte el 5% es semifrío con una temperatura máxima de 8 a 10 °C, el 60% de la superficie tiene temperatura máxima que oscila de 12 a 18 °C templado, el 6.67 es semicálido con 20 a 22°C y el 7% es semicalido con temperatura que varía de 22 a 26°C. En la microcuenca Sur el 2.79% es semifrío con temperatura máxima promedio de 5 a 8°C, 53.83 del área de la microcuenca es templado, el 17.00% es semicalido, y el 6.40% es cálido.

Régimen de humedad

De acuerdo con Mapa de Maples -Verrneersch. (1992) disponible en CONABIO. El régimen de humedad ácuico solo se encuentra en la microcuenca Sur con el 8.72 % de su superficie que equivale a 317.8 has. Ambas microcuencas concentran más del 70% de su superficie en el régimen de humedad Údico, que

representa 3771.17 hectáreas en la microcuenca Norte y 2899.22 en la microcuenca Sur. El régimen de humedad Ústico tiene 672.84 hectáreas en la microcuenca Norte y 426.13 hectáreas en la microcuenca Sur.

Régimen de humedad ácuico: Es un régimen de reducción en un suelo que está virtualmente libre de oxígeno disuelto porque está saturado con agua. Algunos suelos están saturados con agua pero hay oxígeno disuelto debido a que el agua está en movimiento o porque el medio cuando no es favorable para los microorganismos (por ejemplo: si la temperatura es menor de 1 °C); tal régimen no se considera ácuico.

No se conoce qué duración de la saturación de un suelo es la necesaria para tener un régimen de humedad ácuico, pero la duración deberá ser al menos de unos pocos días, porque está implícito en el concepto que el oxígeno está virtualmente ausente. Debido a que el oxígeno disuelto es removido del nivel freático por la respiración de los microorganismos, raíces y fauna del suelo, también está implícito en el concepto que la temperatura del suelo está arriba del cero biológico por algún tiempo mientras el suelo esté saturado. El cero biológico en esta taxonomía se define como 5° C. En algunas regiones del mundo más frías, ocurre actividad biológica aún a temperaturas más bajas de 5° C.

Ejemplos son los pantanos y depresiones cerradas alimentadas por corrientes perennes. El régimen de humedad de esos suelos se denomina perácuico.

El régimen de humedad údico (L. udus, húmedo) es uno en el cual la sección de control de humedad no está seca en alguna parte por un período tan largo como 90 días acumulativos en años normales. Si la temperatura media anual del suelo es menor que 22°C y si la temperatura media de invierno y la media de verano del suelo a una profundidad a 50 cm difieren por 6°C o más, la sección de control de humedad está seca en todas partes por menos de 45 días consecutivos en los 4 meses que siguen al solsticio de verano. Además, el régimen de humedad údico requiere, excepto en períodos cortos, un sistema de tres fases, sólido-

líquido-gaseoso, en parte o en toda la sección de control de humedad del suelo cuando la temperatura del suelo es superior de 5°C.

El régimen de humedad údico es común en los suelos de climas húmedos que tienen una precipitación bien distribuida; tienen suficiente lluvia en verano, para que la cantidad de agua almacenada más la lluvia sea aproximadamente igual o exceda a la cantidad de evapotranspiración o tenga suficiente agua en invierno para recargar a los suelos y enfriarlos, y veranos nublados, como en las áreas costeras. El agua se mueve hacia abajo a través del suelo en algún tiempo en los años normales. En climas en donde la precipitación excede a la evapotranspiración en todos los meses, en años normales, la tensión de humedad rara vez es mayor de 100 kPa en la sección de control de humedad, aunque hay períodos breves en los cuales se usa algo de la humedad almacenada. El agua se mueve a través del suelo en todos los meses en los que no está congelado. Este régimen cuando es extremadamente húmedo se le llama perúdic.

Régimen de humedad ústico: Es intermedio entre el régimen arídico y el údico. Este concepto implica un régimen de humedad que está limitado, pero esa humedad está presente cuando existen condiciones favorables para el crecimiento de las plantas.

Si la temperatura media anual del suelo es de 22°C o mayor o si la temperatura media del suelo de invierno y de verano difieren por menos de 6°C a la profundidad de 50 cm, la sección de control en áreas del régimen ústico está seca, en alguna o en todas partes por 90 días o más acumulativos en años normales. Sin embargo, está húmeda en alguna parte por más de 180 días acumulativos por año o por 90 días o más consecutivos.

Si la temperatura media anual del suelo es menor de 22°C y si la temperatura media del suelo del verano y del invierno difieren en 6°C o más a la profundidad de 50 cm, la sección de control de la humedad del suelo en áreas del régimen ústico está seca en alguna o en todas partes por 90 días o más acumulativos en

años normales, pero no está seca en todas partes por más de la mitad de los días acumulativos cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es mayor de 5°C. Si la sección de control, en años normales, está húmeda en todas partes por 45 días o más consecutivos en los 4 meses siguientes al solsticio de invierno, la sección de control de la humedad está seca en todas partes por menos de 45 días consecutivos en los 4 meses que siguen al solsticio de verano.

En regiones tropicales y subtropicales que tienen un clima monzónico con una o dos estaciones secas, el verano y el invierno son poco significativos. En esas regiones el régimen de humedad es ústico, si tiene al menos una estación lluviosa de 3 meses o más. En regiones templadas de climas subhúmedos o semiáridos, las estaciones lluviosas son usualmente en primavera y en verano o en primavera y en otoño pero nunca en invierno.

3.4.1.8.- Uso de suelo y vegetación

En las microcuencas hay 6 categorías de uso de suelo de acuerdo con la serie III de INEGI: Bosque de Oyamel, Bosque de pino, Bosque de pino-encino, pastizal inducido, Bosque de oyamel con vegetación secundaria y Pradera de montaña, su superficie y porcentaje se desglosa en el Cuadro 1. La categoría de uso dominante para ambas microcuencas es el bosque de pino con 2368.77 hectáreas en la microcuenca Norte y 1473.59 hectáreas en la microcuenca Sur. Otra categoría de uso de importancia es el bosque de pino encino con 967.81 hectáreas en la microcuenca Norte y 943.93 hectáreas en la microcuenca Sur.

El bosque de oyamel ocupa 258.78 hectáreas en la microcuenca Norte y 462.33 en la microcuenca Sur y el pastizal inducido 134.91 hectáreas en la microcuenca Norte y 49.71 en la microcuenca Sur. La pradera de montaña solo se encuentra en 172.30 hectáreas de la microcuenca Sur.

Cuadro 1. Uso de suelo y vegetación serie III de INEGI

Clave	Uso de suelo	MZ-Norte		MZ-Sur	
		Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje

BA	BA: Bosque de Oyamel	258.78	5.82	462.33	12.70
BP	BP: Bosque de pino	2368.77	53.28	1473.59	40.47
BPQ	BPQ: Bosque de pino-encino	967.81	21.77	943.93	25.92
PI	PI: pastizal inducido	134.91	3.03	49.71	1.37
VSa/BA	BA/VSa: Bosque de oyamel con vegetación secundaria	240.21	5.40	9.84	0.27
VW	VW: Pradera de montaña	0.00		172.30	4.73
DV	DV: Sin vegetación aparente	0.00	0.00	182.88	5.02
IAPF	IAPF: no aplicable	475.52	10.70	346.87	9.53
		4446.00	100.00	3641.44	100.00

De acuerdo con (Virgen Cobos et al., 2016) algunas especies que se encuentran en la sección norte en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan son *Abies religiosa*, *Alnus jorullensis ssp. Jorullensis*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y también existe pastizal en un llano que se inunda parcialmente durante la época de lluvias. El pastizal sólo presenta estrato herbáceo, predominando las siguientes especies gramíneas: *Calamagrostis toluensis*, *Festuca toluensis*, *Muhlenbergia qadriidentata*, *M. montaba*, *M. macroura* y *Piptochaetium fimbriatum*

3.4.2.- Descripción de las características morfométricas de las secciones de la microcuenca Zoquiapan

El Cuadro 2 presenta los parámetros morfométricos analizados para las dos secciones de la microcuenca Zoquiapan

Cuadro 2. Calculo de parámetros morfométricos

	Formula	Sección Norte	Sección Sur
Area (Km ²)	A (km ²)	44.44	36.43
longitud del cauce principal (km ²).	Lb (km)	20.77	21.41
Perímetro (km ²)	P(km)	40.27	41.46
Factor de forma	$Rf = \frac{A}{Lb^2}$	0.21	0.14

	Lb longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta (km ²).		
Coeficiente de compacidad (Kc)	$Ck = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$	1.69	1.92
Proporción de elongación	$Pe = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{Lb}$	0.36	0.32
Morfometría de la red de drenaje			
	Lc: Longitud de corrientes de diferentes órdenes km	61.32	68.84
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{Lc}{A}$	1.38	1.89
	Nc es el número de corrientes de diferentes órdenes	24.00	34.00
Densidad hidrográfica (cauces por km ²)	$Dh = \frac{Nc}{A}$	0.54	0.93
Orden de corrientes		2°	3°
Pendiente media del cauce principal	$\%Pn = \left[\frac{H}{L}\right] * 100$ %Pn = Pendiente media H = Desnivel entre la zona de emisión y el sitio más alejado de la cuenca (m) L = longitud a lo largo del cauce entre la zona de emisión y el sitio más alejado (m)	$=((3698.19 - 2556.71) / 20773) * 100 = 5.49$	$=((4597.74 - 2552) / 21406) * 100 = 9.55$
Tiempo de concentración	$Tc = 0.3 * (L/J)^{0.76}$ Tc en hr, L= longitud del cauce (m), J= pendiente media del cauce (%)	1.43	1.29

3.4.2.1.- Perímetro

Se mide a lo largo de la división entre las cuencas hidrográficas y puede usarse como indicador del tamaño y forma de la cuenca (Umrikar, 2016). La sección Sur tiene mayor perímetro que la sección Norte.

3.4.2.2.- Longitud de la corriente principal

Longitud de la corriente principal es la distancia medida a lo largo del canal de la corriente (Zavoianu, 1985). También la sección Sur tiene mayor longitud del cauce principal.

3.4.2.3.- Factor de forma

Factor de forma (Ff) Horton (1932) definió el factor de forma (Ff) como la relación entre el área de la cuenca y la raíz cuadrada de la longitud de la cuenca. De acuerdo al factor de forma muestra que la MZ_Sur es más alargada que la Sección Norte, lo que indica que ambas tienen una alta velocidad de flujo.

3.4.2.4.- Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica, fue introducida por Magette en 1976, de acuerdo con Jardí, (1985). En ambas secciones el índice de compacidad evidencia nula forma redonda y una forma oblonga a rectangular oblonga.

3.4.2.5.- Proporción de elongación

La proporción de elongación es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, su tendencia a ser de forma alargada, en relación a su longitud axial, y al ancho máximo de la cuenca. De acuerdo a la proporción de elongación ambas secciones son de forma alargada.

3.4.2.6.- Morfometría de la red de drenaje

Las características de los drenes superficiales de una cuenca dan a conocer la dinámica de la regulación hídrica en una unidad hidrográfica particular.

Orden de corrientes

La jerarquización permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. El concepto de orden de corrientes fue introducido por Horton en 1932. De acuerdo a la clasificación de corrientes antes mencionada la MZ_Norte es de segundo orden. Indica que el grado de estructura de la red de drenaje no es muy desarrollado por lo tanto el grado de erosión no sea tan alto. Mientras que la clasificación de corrientes La MZ_Sur es de tercer orden, muestra que el grado de estructura de la red de drenaje no es muy

desarrollado tampoco, el orden de corrientes de las secciones de la microcuenca se observa en la Figura 6.

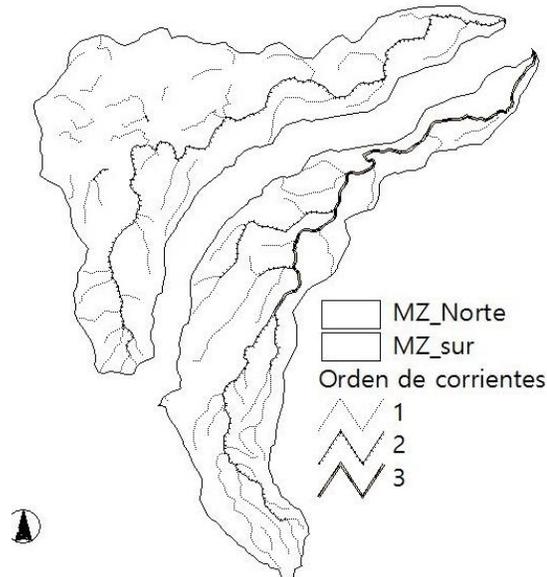


Figura 6. Orden de corrientes de las Secciones de la microcuenca

La relación de bifurcación

Rb La relación de bifurcación (Rb) fue introducida por Horton en 1932. Rb está relacionada con el patrón de ramificación de una red de drenaje y se define como la relación entre el número de arroyos de cualquier orden dado y el número de arroyos en el orden superior próximo en una cuenca de drenaje. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{N_U}{N_{U+1}}$$

Donde Rb es la relación de bifurcación, N_U son las corrientes del orden de interés, N_{U+1} son las corrientes del orden siguiente.

El Cuadro 3 presenta el cálculo de la relación de bifurcación de las secciones norte y sur de la microcuenca Zoquiapan.

Cuadro 3. Calculo de la relación de bifurcación media de las secciones de la microcuenca Zoquiapan

Sección	Numero de corrientes de acuerdo a su orden			Estimación de la relación de bifurcación		Numero de orden de la cuenca	Relación de bifurcación media
	1°	2°	3°	1°/2°	2°/3°		
MZ_Norte	23	1	0	23.00		2.00	23.00
MZ_Sur	29	4	1	7.25	4.00	3.00	5.63

Considerando los datos de la bifurcación media, muestra una alta variación del material parental para ambas secciones.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la relación entre la longitud total de la corriente de todos los órdenes por unidad de área de la cuenca (Horton 1945). Es una medida numérica de la disección del paisaje y del potencial de escorrentía. Los valores de densidad de drenaje indican que MZ_Sur tiene mayor eficiencia y mayor velocidad de transporte que MZ_Norte.

Densidad hidrográfica

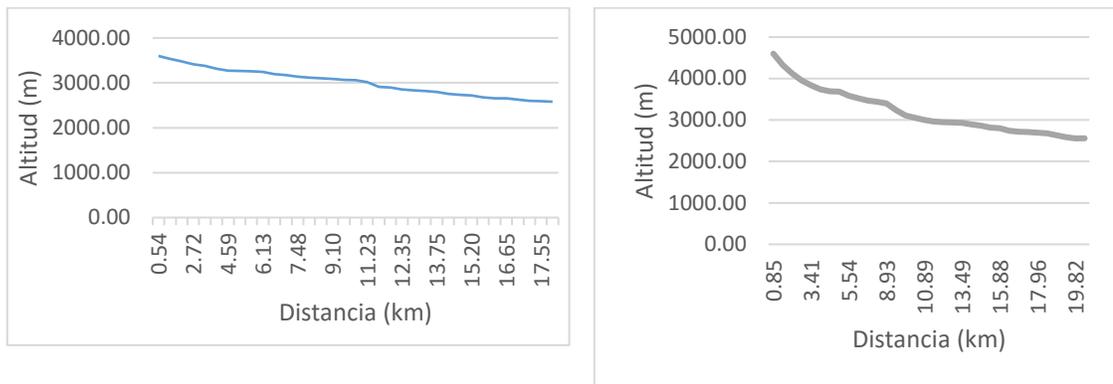
La densidad hidrográfica es la relación que existe entre el número de corrientes y el área de drenaje. La MZ_Sur presenta más cauces por kilómetro cuadrado que la MZ_Norte sin embargo ambas presentan menos de un cauce por kilómetro cuadrado.

3.4.2.7.- Pendiente media del cauce principal

La pendiente puede definirse como la tangente del ángulo de inclinación de una línea o plano definido por una superficie terrestre (Zavoianu, 1985). La pendiente media del cauce principal de la sección Norte es de 5.49% y de la sección Sur es de 9.55 %

3.4.2.8.- Perfil longitudinal

El perfil longitudinal de una corriente, es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del río principal, dependerá de numerosos factores determinantes entre los cuales están el relieve inicial, tipo de roca, la etapa de evolución paleogeográfica y por movimientos tectónicos positivos o negativos (Zavoianu, 1985). De acuerdo al perfil longitudinal de las microcuencas (Figura 7) ambas tienen un flujo alto, sin embargo, la microcuenca Sur tiene mayor velocidad de flujo que la microcuenca Norte.



a) Sección Norte

b) Sección Sur

Figura 7. Perfil longitudinal de las secciones de la microcuenca Zoquiapan

3.4.2.9.- Curva Hipsométrica

Una curva hipsométrica es una representación gráfica que muestra en abscisas las áreas de la cuenca situadas por encima de varias altitudes; también se ha denominado gráfico de relieve de la cuenca de drenaje (Zavoianu, 1985).

La curva hipsométrica de las secciones de la microcuenca se presenta en la Figura 8 donde la sección Norte presenta una etapa madura. Mientras que la curva hipsométrica de la sección Sur representa una etapa senil considerando el gráfico de etapa de la curva hipsométrica propuesto por Strahler (1952).

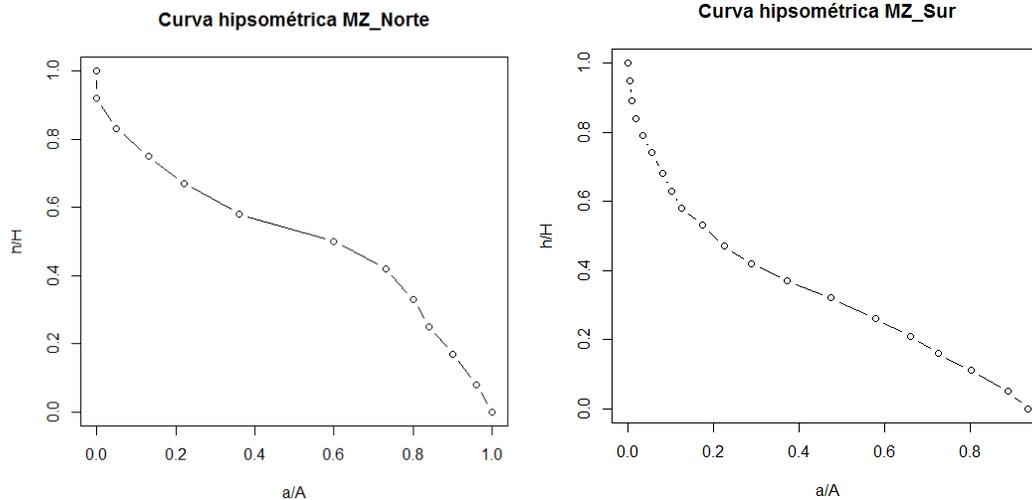


Figura 8. Curva hipsométrica de las secciones

3.4.2.10.- Tiempo de concentración

Tiempo de concentración (T_c), corresponde al tiempo mínimo necesario para que todos los puntos hidrológicos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía al punto de salida y está determinado por el tiempo que tarda una partícula hidrológicamente más lejana en viajar hasta el punto emisor de la cuenca (López Cadenas de Llano,(1998) citado por Cruz Romero et al., (2015)). El tiempo de concentración de la sección Sur (1.29 h) es más rápido que la sección Norte (1.43 h).

3.5.- Conclusiones

De acuerdo al factor de forma ambas Secciones de la microcuenca son de forma alargada, considerando la forma ambas tienen una alta velocidad de flujo. El perfil longitudinal de las microcuencas también muestra un flujo alto. Considerando los datos de la bifurcación media, indican una alta variación del material parental. Ambas microcuencas concentran más del 75% de su superficie con pendiente de moderada a Fuerte, este factor se relaciona con la susceptibilidad de los suelos a ser arrastrados, por lo que es recomendable que la mayor parte del tiempo cuenten con una cobertura vegetal para reducir los efectos de la erosión.

La MZ_Sur es de tercer orden mientras que la MZ_Norte es de segundo orden. Indica que el grado de estructura de la red de drenaje no es muy desarrollado por lo tanto el grado de erosión no sea tan alto. La MZ_Sur presenta más cauces por kilómetro cuadrado que la MZ_Norte sin embargo ambas presentan menos de un cauce por kilómetro cuadrado.

Los suelos dominantes son Andosol Humico con textura media que son suelos oscuros con fertilidad considerable y Regosol Distrito con textura media que se caracterizan por no tener estructura, muy parecidos a la roca madre con subsuelo y ser pobre o muy pobre en nutrientes. El bosque de pino es predominante.

C(E)(w2)(w): Semifrío subhúmedo es el clima dominante en ambas microcuencas con una precipitación de 1000 mm 1200mm, temperatura media anual de 10 a 12 °C la temperatura mínima oscila entre -8 y -4 °C.

El sistema de información geográfica permitió hacer la caracterización de los recursos naturales de la microcuenca al igual que el análisis morfométrico. El área estudiada es montañosa con pendientes muy escarpadas, la información generada puede ser utilizada en estudios posteriores de manejo de recursos naturales.

3.6.- Bibliografía

Casa A., Gustavo. 1997. Climas del Estado de México. extraído del proyecto *H103 Sistema de información Geográfica sobre la herpetofauna, del Estado de México*. Escala 1:500000. Departamento de zoología. Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.

Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23, núm. 6, 26–34. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>

Esri. (1999). ArcView 3.2

Esri. (214). Arcgis 10.3. Arcmap

Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., & Haregeweyn, N. (2017). Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0534-4>

García E. CONABIO.1998. Isotermas medias anuales. Escala 1:1000000. México

García, E,-CONABIO (1998).” Temperatura máxima promedio” Escala 1:1000000. México.

García, E,-CONABIO (1998).” Temperatura mínima promedio” Escala 1:1000000. México.

Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7, núm. 2, 88–108. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070208%0A>

Horton RE (1932) Drainage basin characteristics. *Trans Am Geophys Union*. 13, pp 350–361

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)

Ibáñez J. J., Manríquez C. J. F., 2011.Andosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos. [disponible en línea] <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258> (consultado 6 de julio 2013)

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación (continuo

- nacional), serie 3, 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Aguascalientes.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41–68.
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11, num1, 57–71.
- Maple-Verneersch M. (1992) “Regímenes de humedad del suelo” en hidrogeografía IV.6.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Ortiz Solorio Carlos A. Pajaro H. D. 1988. Mapa mundial de suelos FAO-UNESCO. Centro de Edafología Colegio de Postgraduados. México.
- Sahu, N., Reddy, G. P. O., Kumar, N., Nagaraju, M. S. S., Rajeev, S., & Singh, S. K. (2016). Morphometric analysis in basaltic Terrain of Central India using GIS techniques: a case study. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0442-z>
- Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (área/altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Amer., Bull.*, 63: 1117-1142.
- Umrikar, B. N. (2016). Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0390-7>
- Virgen Cobos, G. V., Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., & Borja de la Rosa, A. M. (2016). *Establecimiento de una red de monitoreo meteorológico en la Estacion Foerstal Experimental Zoquiapan*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Zavoianu, I. (1985). *Developments in water science Morphometry of drainage basins*. (B. Editura Academiei Republicii Socialiste Romhnia, Ed.) (Elsevier). Romania.

4.- INTRODUCCIÓN GENERAL DE TENDENCIA DE CAMBIO DE USO DE SUELO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN

4.1 Objetivo general

Analizar el cambio de uso de suelo de dos momentos por medio del proceso estocástico cadenas de Markov para estimar la tendencia de cambio de uso de suelo en la microcuenca Zoquiapan.

4.2. Objetivos específicos

Obtener la matriz de transición de cambio de uso de suelo producto de la cadena de Markov para conocer la tendencia de cambio de uso de suelo.

Obtener la matriz de transición del estado estable de la cadena de Markov para conocer los estados dominantes.

4.3 Antecedentes

La Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) fue creada en 1972, representa una parte integral de la estructura de la UACH, en el área forestal. Sus objetivos fundamentales son: enseñanza, investigación, conservación y manejo sustentable de los recursos naturales, difusión de la cultura forestal y recreación. Para lograr lo anterior la Universidad ha generado infraestructura, así como la asignación de recursos para la operación de esta estación experimental (DICIFO, 2016).

Es un área de importancia para la formación de profesionales involucrados en el manejo de los recursos naturales en instituciones como el Colegio de Postgraduados, la Universidad Autónoma Metropolitana y la Universidad Nacional Autónoma de México.

La Estación Forestal Experimental Zoquiapan se localiza en los límites estatales de México y Puebla, dentro de la zona de la cordillera Neovolcanica al noroeste del volcán Iztaccíhuatl entre los paralelos $19^{\circ} 12' 30''$ y $10^{\circ}20' 00''$ de latitud Norte y los meridianos $98^{\circ} 42' 30''$ y $98^{\circ} 30'00''$ de longitud oeste (Sánchez-Ortiz, 2007 y Virgen Cobos et al., (2016)). La Figura 9 muestra la ubicación de la Estación Forestal Experimental, La EFEZ se encuentra dentro de la microcuenca Zoquiapan.

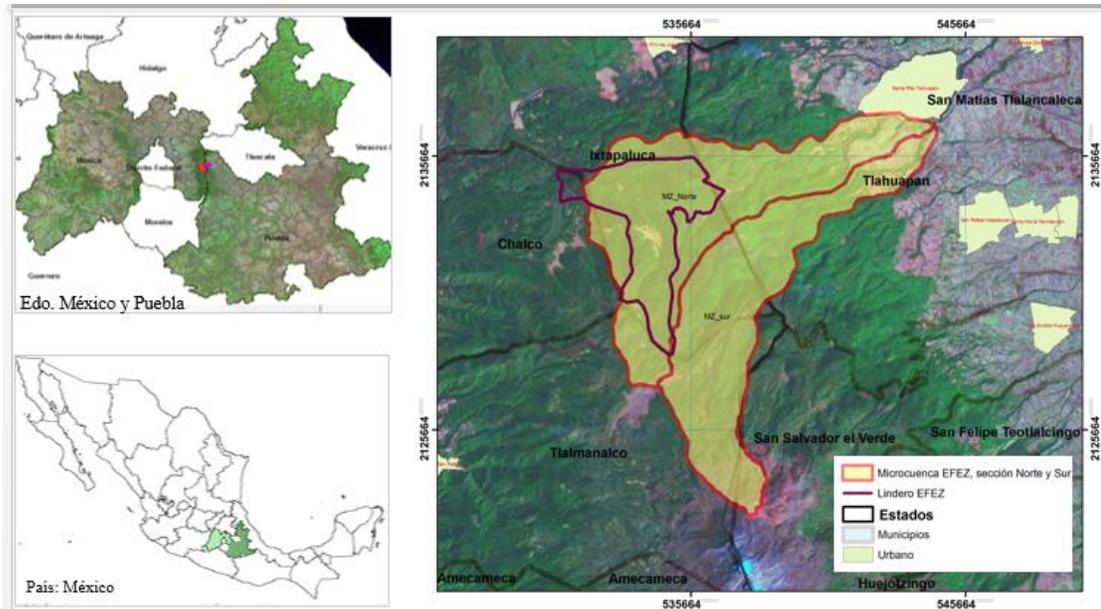


Figura 9. Ubicación de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan

Los ejidos con los cuales limita la EFEZ se presentan en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Los Ejidos colindantes con la Estación Forestal Experimental Zoquiapan

Ejidos	Dirección
Ejido Rio Frio	Norte
Ejido Tlalmanalco	Sur
Ejido Apapasco	Este
Ejido San Martin Cuautlalpan	
Ejido Nuevo centro de población San Gabriel	Oeste.
Ejido Rio Frio y el predio San Miguel Molino	

Fuente: Sánchez-Ortiz, 2007

Dicha estación se encuentra dentro de Parque Nacional Zoquiapan y Anexas, el cual fue decretado como ANP en el Diario Oficial de la Federación el 31 de marzo de 1937; se localiza al oriente de la Ciudad de México cuenta con una superficie de 19,400 ha; forma parte de la Región Terrestre Prioritaria “Sierra Nevada”, que protege una porción del bosque templado, un ecosistema amenazado con remanentes que se distribuyen en el Eje Neo volcánico Transversal (Ugalde-Lezama et al., 2012).

El parque Nacional Zoquiapan y Anexas tiene graves problemas de desequilibrio ecológico, degradación ambiental, así como una baja sustentabilidad del medio ambiente; de acuerdo con la Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas elaborada por Lomas-Barrié et al. (2005).

4.4 Definición del problema

En México hay importantes procesos de cambio de la cobertura vegetal del suelo, especialmente deforestación con una tendencia de remplazo por tierras agrícolas y urbanas (Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011). Por lo que este trabajo pretende identificar los cambios que se han dado en la cobertura vegetal y las tendencias de uso de la microcuenca Zoquiapan a través del proceso estocástico Cadenas de Markov.

4.5 Justificación

La tendencia de cambio de uso de suelo atiende la distribución de la cobertura vegetal. La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos (Cuenca del canal de Panamá, 2016).

Las coberturas vegetales son un elemento esencial en el sistema que llamamos tierra, las plantas absorben y reciclan nutrientes, dióxido de carbono, nitrógeno, azufres y fósforos que están en la atmósfera, absorben agua y transpiran. En el caso específico de los bosques juegan un papel importante en la conservación del ambiente, ya que regulan las corrientes de agua, tienen un efecto moderador en el clima a nivel mundial y local, y favorecen la conservación de los suelos previniendo la erosión y en la disminución de la pérdida de suelos; además son el hogar de numerosas especies de plantas y animales. (Cuenca del canal de Panamá, 2016).

El análisis de la cadena de Markov es una herramienta conveniente para modelar el cambio de uso del suelo cuando los cambios y procesos en el paisaje que son difíciles de describir (Eastman, 2006).

El capítulo 5 contiene la revisión bibliográfica acerca de tendencia de cambio de uso de suelo y las cadenas de Markov; el capítulo 6 presenta el artículo científico producto de esta investigación.

5.- REVISION DE LITERATURA DE TENDENCIA DE CAMBIO DE USOS DE SUELO DE LA MICROCUENCA ZOQUIAPAN

5.1.- Tendencia de cambio de uso de suelo

Las actividades humanas modifican el paisaje natural alterando el funcionamiento de los ecosistemas (Zepeda Gómez *et al.*, 2012).

Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas como agricultura, pastoreo y manejo forestal tienen una profunda influencia en los procesos hidrológicos; pueden afectar negativamente las tasas de infiltración, aumentar la tasa de escorrentía superficial, acelerando los procesos de erosión. Las tasas de infiltración de los bosques con suelos no alterados predominan flujos subsuperficiales donde el sistema radicular profundo, la cubierta de vegetación desarrollada, la materia orgánica, alta porosidad favorecen este tipo de flujos de agua (Oyarzún, Carlos E, *et al.*, 2011).

Por lo anterior el uso de suelo tiene gran influencia en el proceso de infiltración, distribución del agua en el suelo y evaporación, el análisis del uso de suelo permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad (Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011).

5.2.- Cadena de Markov

Cadena de Markov es un proceso estocástico, las cuales llevan este nombre en honor al matemático ruso Andrei Andreevich Markov quien las definió en (1906) (Angulo, Alirio, & Mesa, 2008).

Las cadenas de Markov son unos procesos donde la transición a un estado siguiente depende del estado presente en que se encuentre el sistema y no importa el recorrido que ha hecho para llegar al estado presente. En este tipo de procesos la variable aleatoria de estados y el parámetro t (tiempo) se consideran variables discretas. Son una herramienta que permite, determinar la probabilidad con la cual el proceso puede entrar en algún estado (Bedoya & Barrera, 2006).

Una cadena de Markov finita es una sucesión de variables aleatorias $\{X_t\}$ con $t = 1, \dots, N$ tal que se cumple la siguiente propiedad:

$$P(X_t = x_t \mid X_k = x_k \forall k < t) = P(X_t = x_t \mid X_{t-1} = x_{t-1})$$

donde x_t es el valor que toma la variable X_t , la cual pertenece a un conjunto discreto finito. Lo que quiere decir, que la probabilidad condicional sobre todos los valores anteriores depende sólo del valor de la variable anterior más reciente (Soriano, 2014).

5.2.1 Cadena de Markov a tiempo discreto

De acuerdo con Prada-Alonso (2013), una cadena de Markov es una sucesión de variables aleatorias $\{X_n, n \in \mathbb{N}\}$ que cumple:

1. Cada variable X_n toma valores en un conjunto finito o numerable E , que se denomina espacio de estados.
2. La sucesión de variables verifica la condición o propiedad de Markov o markoviana.

5.2.2.- Probabilidades de transición

Según Prada-Alonso (2013), sean i y j dos estados de una cadena de Markov. A la probabilidad

$$P(X_{n+1} = j \mid X_n = i)$$

donde se le denota por $p_{ij}(n, n+1)$, y representa la probabilidad de transición del estado i en el tiempo n , al estado j en el tiempo $n+1$. Estas probabilidades se conocen como las probabilidades de transición en un paso. Cuando las probabilidades $p_{ij}(n, n+1)$ no dependen de n se dice que la cadena es estacionaria u homogénea en el tiempo. Por simplicidad se asume tal situación de modo que las probabilidades de transición en un paso se escriben como p_{ij} . Variando los índices i y j , por ejemplo, sobre el conjunto de estados $\{0, 1, 2\}$ se obtiene la matriz de probabilidades de transición en un paso que aparece en la Figura 10.

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

Figura 10. Matriz de transición

La entrada (i, j) de esta matriz es la probabilidad de transición (ij) , es decir, la probabilidad de pasar del estado i al estado j en una unidad de tiempo. En general, al escribir estas matrices omitiremos escribir la identificación de los estados en los renglones y columnas, tal identificación será evidente a partir de conocer el espacio de estados del proceso. El índice i se refiere al renglón de la matriz, y el índice j a la columna.

Sea P una matriz cuadrada $k \times k$. Llamaremos a P matriz estocástica si

1. Todas sus entradas son positivas, $p_{ij} \geq 0$, para todo i, j .
2. La suma de sus coeficientes en cada fila vale 1, es decir

$$\sum_{j=1}^k p_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, k$$

y doblemente estocástica si además la suma de sus coeficientes en cada columna también vale 1, o sea

$$\sum_{i=1}^k p_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, k$$

5.2.3.- Distribución inicial

De acuerdo con Prada-Alonso (2013), una cadena de Markov está completamente determinada por la distribución de probabilidad del estado inicial X_0 y por las probabilidades de transición p_{ij} . La distribución inicial de la cadena se expresa en forma de vector, en el que cada componente indica la probabilidad

de que la cadena se encuentre en el estado i en el instante inicial. De esta forma, se conoce el punto de partida del proceso. Se expresa como

$$P^{(0)} = (p_1^{(0)}, \dots, p_i^{(0)}, \dots, p_k^{(0)})$$

donde $p_i^{(0)} = P(X_0 = i), i \in E$.

Además, la distribución inicial cumple:

$$p_i^{(0)} \geq 0 \text{ y } \sum_{i \in E} p_i^{(0)} = 1.$$

5.2.4.- Distribución estacionaria de la cadena de Markov

De acuerdo con (Bedoya & Barrera, 2006) después de ocurridas varias transiciones, las probabilidades convergen a valores particulares.

Una distribución límite (estacionaria) de una Cadena de Markov en tiempo discreto consiste en una distribución de estado estable para los estados de una cadena que es independiente de la distribución inicial.

En distintas aplicaciones de esta categoría de procesos estocásticos resulta de interés identificar la probabilidad de que la variable aleatoria " X_n " adopte un valor " j " (entre M estados posibles) al cabo de un número de etapas o transiciones " n " que tiende a infinito. Lo anterior equivale a:

$$\pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} IP(X_n = j) = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}^{(n)}.$$

En este contexto existen ecuaciones que permiten encontrar estas probabilidades de largo plazo en la medida que el proceso Markoviano en tiempo discreto sea una cadena irreducible con estados recurrentes positivos aperiódicos.

En forma compacta las ecuaciones que permiten encontrar las probabilidades estacionarias son:

$$\pi = P^T \pi$$

$$\sum_j \pi_j = 1$$

$$\pi_j \geq 0$$

Un estado es estable cuando ya no hay cambios en el sistema, es decir que se alcanza el equilibrio. Una manera posible de obtener las condiciones del sistema para el estado estable es repetir iterativamente los cálculos para cada periodo con el fin de hallar el periodo con aquellas probabilidades que se mantienen constantes o no cambian (Levin, Peres, & Wilmer, 2009).

5.2.5.-Determinación de las condiciones del estado estable

De acuerdo con Cruz Soriano (2016) la existencia de condiciones de estado estable en una cadena ergódica regular, se encuentran elevando la matriz de transición "n" veces, también se encuentra resolviendo el sistema de ecuaciones que se desprende de la matriz de transición. A esta cadena de Markov se le conoce como de alto orden y nos indica los cambios futuros en las preferencias.

A medida que aumenta el valor de n, los valores P_{ij} tienden hacia un límite fijo y cada vector de probabilidad V tiende a ser igual para todos los valores de j.

1) Para un valor de "n" suficientemente grande, el vector de probabilidad V_iⁿ se hace igual para todas las i-es y no cambia para otros valores mayores a "n" dados.

2) Puesto que V₁ⁿ⁺¹ = V₁ⁿ P y V_iⁿ⁺¹ = V_iⁿ, existe un vector V* = (V*)(P)

El V* contiene las probabilidades que existen en condiciones de estado estable.

5.2.6.- El Proceso cadenas de Markov en IDRISI

El análisis de la cadena de Markov es una herramienta conveniente para modelar el cambio de uso del suelo cuando los cambios y procesos en el paisaje son difíciles de describir. Un proceso de Markov es cuando el estado futuro de un

sistema se puede modelarse sobre la base del estado inmediatamente anterior (Eastman, 2006).

Esto se logra mediante el desarrollo de una matriz de probabilidad de transición de cambio de uso de la tierra, que será la base para la proyección de un período de tiempo posterior.(Eastman, 2006). El análisis de Markov no da cuenta de las causas del cambio de uso del suelo y es insensible al espacio. (Memarian et al., 2012)

El módulo de las cadenas de Markov (MARKOV) simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema.

Se trata de un procedimiento discreto en un tiempo, en donde el valor en el tiempo t_1 depende de los valores en los tiempos t_0 y $t-1$ (cadena markoviana de segundo orden). El algoritmo compara dos mapas de ocupación del suelo que se suceden cronológicamente, estima y configura una matriz de probabilidad de transición. (Paegelow, Camacho Olmedo, & Menor Toribio, 2003).

A este respecto hay que indicar que una de las limitaciones del algoritmo de las cadenas de Markov es la necesidad de contar con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la desaparición o nueva aparición de alguna de ellas impide aplicar el método (Paegelow et al., 2003).

Los modelos de Markov son el primero de los modelos ajustados, que son fáciles de crear con los requisitos mínimos de datos. Los modelos de Markov son el más simple de los modelos estocásticos que se basan en una matriz de transición y que han sido ampliamente utilizados para estudios sobre el cambio de cobertura terrestre en varias escalas espaciales (Sanchayeeta & Southworth, 2012).

5.3.- Bibliografía

- Angulo, V., Alirio, E., & Mesa, F. (2008). Propiedades de la matriz Pn en una cadena de Markov. *Scientia Et Technica*, XIV, núm., 459–463.
- Bedoya, J. C., & Barrera, M. (2006). Convergencia de las cadenas de Markov. *Scientia Et Technica*, XII, núm.3, 73–78.
- Cruz Soriano R.. (2016). Apuntes de investigación de operaciones . 10-12-2016, de Determinación de las condiciones del estado estable Sitio web: <http://www.ingenieria.unam.mx/industriales/descargas/documentos/catedra/invop.pdf>
- Cuenca del canal de Panama. (2016). Cubierta vegetal. 08-02-2016, de Sitio web: http://www.geoinstitutos.org/geoinstitutos/art_03_imp2.html
- División de Ciencias Forestales (DICIFO). (2016). Estación Forestal Experimental Zoquiapan. 23-October-2016, de (EFEZ) Sitio web: <http://dicifo.chapingo.mx/licenciatura/zoquiapan/index.php>
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes Tutorial*. Clark University. USA.
- Figuroa-Jauregui, M. L., Ibañez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramirez, R., Arellano-Monterrosas, L., & Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45, 531–544.
- Levin, D. a., Peres, Y., & Wilmer, E. L. (2009). *Markov Chains and Mixing Times*. Book, 371. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2006.02.008>
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11,num1, 57–71.
- Memarian, H., Balasundram, S. K., Talib, J. Bin, Teh, C., Sung, B., Sood, A. M., & Abbaspour, K. (2012). Validation of CA-Markov for Simulation of Land Use and Cover Change in the Langat Basin , Malaysia. *Journal of Geographic Information System*, 4(December), 542–554. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46059>
- Oyarzún, C. E., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., & Hervé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque*, 32(1), 10–19. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000100002>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., & Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de

Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *International Review of Geographical Information Science and Technology*, 3, 22–44.

Prada-Alonso, S. (2013). *Cadenas de Markov en la Investigación del Genoma*. Universidad de Coruña, Universidad de Santiago de Compostela, Universidad de Vigo.

Sanchayeeta, A., & Southworth, J. (2012). Simulating forest cover changes of bannerghatta national park based on a CA-Markov model: *A remote sensing approach*. *Remote Sensing*, 4(10), 3215–3243. <https://doi.org/10.3390/rs4103215>

Sánchez-Ortiz N. R. 2007. *Preferencias alimenticias del venado cola blanca (Odocoileus Virginianus Mexicanus Gmelin, 1988) por el método microbiológico en la estación forestal experimental Zoquiapan (EFEZ), Edo de México*. Tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma Chapingo.

Soriano, M. E. (2014). *Verosimilitud compuesta*. (T. como requisito para obtener el título de L. en estadística U. A. Chapingo, Ed.). Chapingo, Texcoco, México.

Ugalde-Lezama, S., Alcántara-Carbajal, J. L., Tarango-Arámbula, L. A., Ramírez-Valverde, G., & Mendoza-Martínez, G. D. (2012). Vegetation physiognomy and abundance of birds in a temperate forest with two disturbance levels in the eje neovolcanico transversal. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(1), 133–143. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84860821441&partnerID=40&md5=eff8f2c717adee59d4580a3b97273e29>

Virgen Cobos, G. V., Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., & Borja de la Rosa, A. M. (2016). *Establecimiento de una red de monitoreo meteorológico en la Estacion Foerstal Experimental Zoquiapan*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Zepeda Gómez, C., Nemiga, X. A., Lot Helgueras, A., & Madrigal Uribe, D. (2012). Análisis del cambio del uso del suelo en las ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática Land use change in Lerma marshes (1973-2008) and its impact on aquatic vegetation. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, núm:78(Mx), 48–61.

**6.- ARTICULO CIENTÍFICO PROYECCIÓN Y CAMBIO DE USO DE
SUELO EN ZOQUIAPAN, MÉXICO: CONSIDERACIONES PARA
SU MANEJO FORESTAL**

6.1 Resumen y abstract

PROYECCIÓN Y CAMBIO DE USO DE SUELO EN ZOQUIAPAN, MÉXICO: CONSIDERACIONES PARA SU MANEJO FORESTAL

RESUMEN

El trabajo analiza el cambio de uso de suelo entre 1989 y 2009 por medio del proceso estocástico denominado cadenas de Markov, para estimar la tendencia de cambio de uso de suelo en la microcuenca Zoquiapan para el año 2020. Las cadenas de Markov son un proceso estocástico donde la transición a un estado siguiente depende del estado presente en que se encuentre el sistema. El método consistió en obtener imágenes de satélite LANSAT y procesarlas en IDRISI-SELVA©. Se hizo una clasificación no supervisada con el mismo número de clases en cada una, resaltando *bosque*, *pastizal* y *uso agrícola*. Entre los dos años estudiados se aplicó el comando *Markov-Markovian transition estimator* para estimar el vector estacionario de la cadena y conocer las tendencias futuras de la cobertura vegetal. De acuerdo con los resultados, para el año 2020 en la microcuenca Zoquiapan se tendrían probabilidades bajas de cambio en el uso del suelo. Se observa que la cobertura forestal tiene una alta probabilidad de permanencia, mientras que las áreas de pastizal y agrícolas mostraron baja probabilidad de cambio.

Palabras clave: cobertura vegetal, cadenas de Markov en IDRISI, estado estable

PROJECTION AND CHANGE OF SOIL USE IN ZOQUIAPAN, MEXICO: CONSIDERATIONS FOR ITS FOREST MANAGEMENT

ABSTRACT

The work analyzes the change of land use between 1989 and 2009 through the stochastic process called Markov chains, to estimate the trend of land use change in the Zoquiapan microcatchment by 2020. Markov chains are a stochastic process where the transition to a next state depends on the present state in which the system is. The method consisted in obtaining images of satellite LANSAT and processing them in IDRISI-SELVA ©. An unsupervised classification was made with the same number of classes in each one, highlighting forest, pasture and agricultural use. Between the two years studied the Markov-Markovian transition estimator was applied to estimate the steady vector of the chain and to know the future tendencies of the vegetation cover. According to the results, by the year 2020 in the Zoquiapan microcatchment there would be low probability of change in land use. It is observed that the forest cover has a high probability of permanence, while the pasture and agricultural areas showed low probability of change.

Key words: vegetal cover, Markov chains in IDRISI, steady state

6.2.- Introducción

Los estudios de usos de suelo y cambio de la cubierta vegetal así como su dinámica son cruciales para la gestión ambiental y manejo sostenible de los recursos naturales (Memarian et al., 2012). El análisis de la cadena de Markov es una herramienta conveniente para modelar el cambio de uso del suelo cuando los cambios y procesos en el paisaje son difíciles de describir. Un proceso de Markov es cuando el estado futuro de un sistema se puede modelarse sobre la base del estado inmediatamente anterior (Eastman, 2006).

El módulo de las cadenas de Markov (MARKOV) en IDRISI simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema; hay que indicar que una de las limitaciones del algoritmo de las cadenas de Markov es la necesidad de contar con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la desaparición o nueva aparición de alguna de ellas impide aplicar el método (Paegelow et al., 2003).

El propósito del presente estudio es analizar el cambio de uso de suelo de dos momentos por medio del proceso estocástico cadenas de Markov para estimar la tendencia de cambio de uso de suelo en la microcuenca Zoquiapan, así como encontrar la matriz de transición del estado estable para conocer las tendencias de uso de suelo. De acuerdo con Sanchayeeta & Southworth, (2012), los modelos de Markov son el primero de los modelos ajustados, que son fáciles de crear con los requisitos mínimos de datos.

Un estado es estable cuando ya no hay cambios en el sistema, es decir que se alcanza el equilibrio. Una manera posible de obtener las condiciones del sistema para el estado estable es repetir iterativamente los cálculos para cada periodo con el fin de hallar el periodo con aquellas probabilidades que se mantienen constantes o no cambian (Levin, Peres, & Wilmer, 2009).

Por otra parte el uso de suelo tiene gran influencia en el proceso de infiltración, distribución del agua en el suelo y evaporación, el análisis del uso de suelo permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad (Figueroa-Járegui et al., 2011). Y la microcuenca Zoquiapan cubre una porción del parque Nacional Zoquiapan y Anexas tiene graves problemas de desequilibrio ecológico, degradación ambiental, así como una baja sustentabilidad del medio ambiente; de acuerdo con la Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas elaborada por Lomas-Barrié et al. (2005).

6.3.- Materiales y métodos

Se obtuvieron las imágenes de satélite LANSAT en la página de internet <http://glovis.usgs.gov/> donde las imágenes con mejor nitidez y baja nubosidad fueron las de 21 de marzo del 2009 y 7 de Marzo de 1989 con una resolución de 25m. Las imágenes fueron procesadas en el software IDRISI SELVA donde primero se hizo una combinación en falso color utilizando las bandas 1, 2 y 3. Después se hizo una clasificación no supervisada con el mismo número de clases, las principales clases son bosque, pastizal y uso agrícola; se verificaron y rectificaron las clases en ambas imágenes de satélite, se extrajo la superficie de la microcuenca Zoquiapan; con el comando Window- image windowing ambas imágenes fueron cortadas sobre la misma área. Una vez teniendo la misma superficie, resolución y numero de clases se aplicó el comando Markov-Markovian transition estimator, para conocer la matriz de transición de la microcuenca Zoquiapan de los periodos 1989 y 2009 con un lapso de tiempo de 20 años, con tres categorías de uso forestal (1), pastizal (2) y agrícola (3) (Cuadro 5) y una estimación a 11 años, para estimar las tendencias de uso de suelo del año 2020 con un rango de error de 0.05

Cuadro 5. Descripción de categorías de uso de suelo

Categoría de uso de suelo	Descripción
forestal (1)	Constituido por especies arbóreas como oyamel, pino, encino y sus asociaciones
pastizal (2)	Son comunidades vegetales donde predominan los pastos con pocos árboles y arbustos. Pueden ser producto del desmonte de terrenos boscosos
agrícola (3)	Agricultura de temporal

Cuando generamos observaciones con algún método de cadenas de Markov, debemos verificar primero, si la cadena alcanza el estado estacionario. Como las observaciones que se generan son dependientes, debemos darle tiempo a la cadena para que se estabilice. Esto significa que debemos correr la cadena un cierto número de interacciones como "periodo de calentamiento" y después de ese periodo, preguntarnos por la estacionalidad y convergencia de la cadena.

Para tener una idea de si estamos alcanzando un estado estacionario, lo más sencillo es realizar algunas graficas. Por ejemplo, podrían graficarse promedios de algunas funciones de interés, por ejemplo $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k h(x_i)$, que por el teorema ergódico, deberían situarse a medida que n crece alrededor de $E(h(X))$.

En este caso, para encontrar la distribución estacionaria de la cadena de Markov se obtuvo la matriz de transición para el año 2010 (Cuadro 6), con los datos de uso de suelo de 2009 se obtuvieron las probabilidades iniciales (π_i) y se realizaron 10000 iteraciones de una cadena de Markov a tiempo discreto utilizando el programa R (ver código en Anexos), después se calculó la media ergódica de dicho proceso. Una vez obtenido el vector estacionario (por medio de la media ergódica: se tomaron cada 10 observaciones, para obtener finalmente una muestra de 1000, ver Figura 16) se estimó su respectiva matriz de transición en el programa IDRISI.

Por otro lado la matriz de transición para el año 2010 (Cuadro 6) tiene como datos de referencia las clasificaciones de uso de suelo de los años 1989 y 2009 para predecir el año 2010 con un error del 5%, e indica que no hay cambios del área

agrícola hacia el área forestal ni viceversa, la probabilidad de permanencia del bosque es de 94.46%, la probabilidad de permanencia del pastizal es de 72.75% y la probabilidad de permanencia de la agricultura es de 60.21%, la probabilidad de cambio de forestal a pastizal es de 6.66% y la probabilidad de cambio de agricultura a pastizal es de 39.79%.

Cuadro 6. Matriz de transición para el año 2010

Estados	Forestal (1)	Pastizal (2)	Agrícola (3)
Forestal (1)	0.9446	0.0666	0.0000
Pastizal (2)	0.1224	0.7275	0.1501
Agrícola (3)	0.0000	0.3979	0.6021

6.3.1.- Zona de estudio

La Microcuenca Estación Forestal Experimental Zoquiapan se ubica en la Región hidrográfica XVIII Balsas, sobre la Cuenca del Río Atoyac en las subcuenca RH18Ad San Martín Texmelucan Figura 11. Sus coordenadas extremas bajo la proyección UTM Zona14, Datum North American 1983 y esferoide GRS 1980 son 2137115.965 N, 2122190.173 S. 544888.067 E y 532075.201 O.



Figura 11. Ubicación hidrográfica de la microcuenca Zoquiapan

La Microcuenca tiene una superficie de 8,087.16 ha se localiza en los límites estatales de México y Puebla, en los municipios de Ixtapaluca, Chalco y Tlamanalco en el estado de México, así como en Tlahuapan y San Salvador el verde en Puebla.

6.4.- Resultados

6.4.1.- Clasificación de las imágenes de satélite

Tanto en la clasificación de 1989 como en la del 2009 el uso de suelo dominante es el uso forestal seguido por el pastizal y la agricultura como se observa en Figuras 12 y 13, de acuerdo con Virgen Cobos et al., (2016) las asociaciones de especies presentes en la EFEZ que se encuentra dentro de la microcuenca Zoquiapan son oyamel, pino, pino-aile, pino-encino y pino-oyamel.

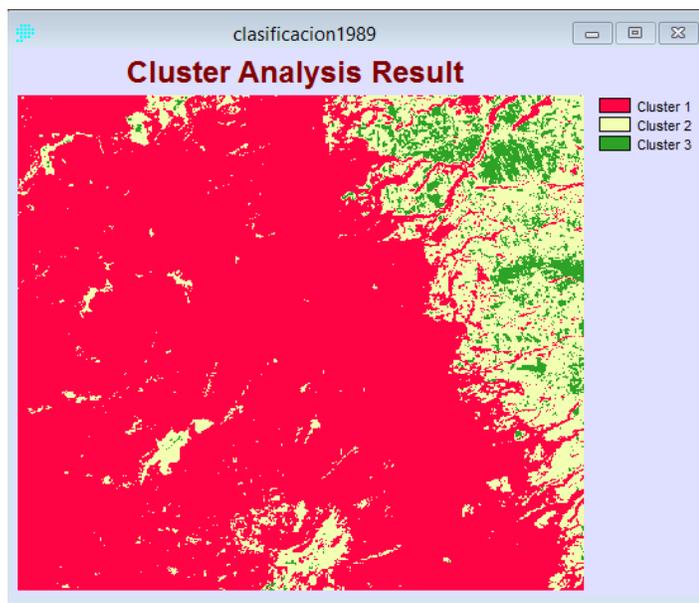


Figura 12. Imagen 1989 con tres coberturas de uso de suelo forestal (1), pastizal (2) y agrícola (3)

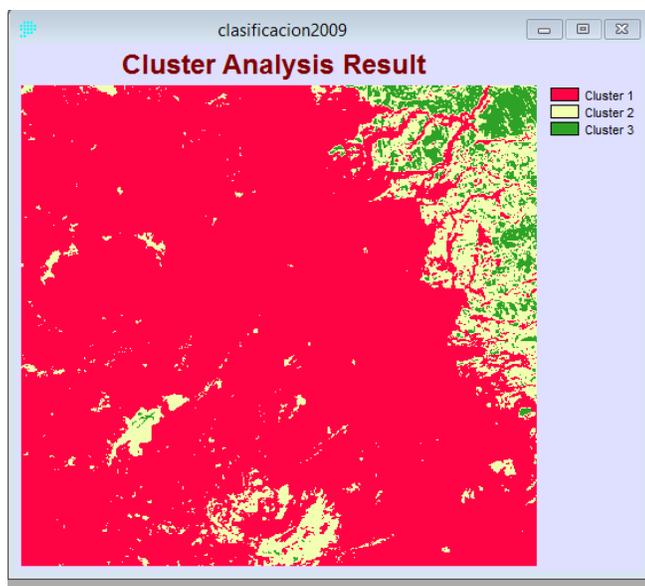


Figura 13. Imagen 2009 con tres coberturas de uso de suelo forestal (1), pastizal (2) y agrícola (3)

6.4.1.1.- Uso de suelo y vegetación de la microcuenca Zoquiapan 2009 y 1989

Una vez clasificadas las imágenes de satélite estas fueron rectificadas y se agregó el uso de suelo sin vegetación aparente la cual es parte del volcán y cuenta con 203,60 hectáreas. El área agrícola se redujo en 1.86 hectáreas del año 1989 al año 2009 contando con 521.91 hectáreas que corresponden al 6.45% en el año 2009. La categoría de uso pastizal también se redujo, con 88.63 hectáreas, para el año 2009 contaba con 119.76 hectáreas que corresponden al 1.48% del área de la microcuenca Zoquiapan. Mientras que el uso forestal se incrementó en 90.49 hectáreas como se aprecia en el Cuadro 7.

Cuadro 7.-Uso de suelo y vegetación de 2009 y 1989

Uso de suelo y vegetación	2009		1989		Diferencia 2009-1989	
	superficie		Superficie		Superficie	
	Ha	%	ha	%	ha	%
Agrícola	521.91	6.45	523.78	6.47	-1.86	-0.02
Pastizal	119.76	1.48	208.39	2.57	-88.63	-1.09

Forestal	7142.87	88.32	7052.37	87.22	90.49	1.11
Área sin vegetación aparente	302.60	3.75	302.60	3.74	0	0
Total	8087.16	100.00	8087.16	100	0	0

En la Figura 14 se observa el incremento del área forestal cerca del área agrícola en la zona Norte de la microcuenca.

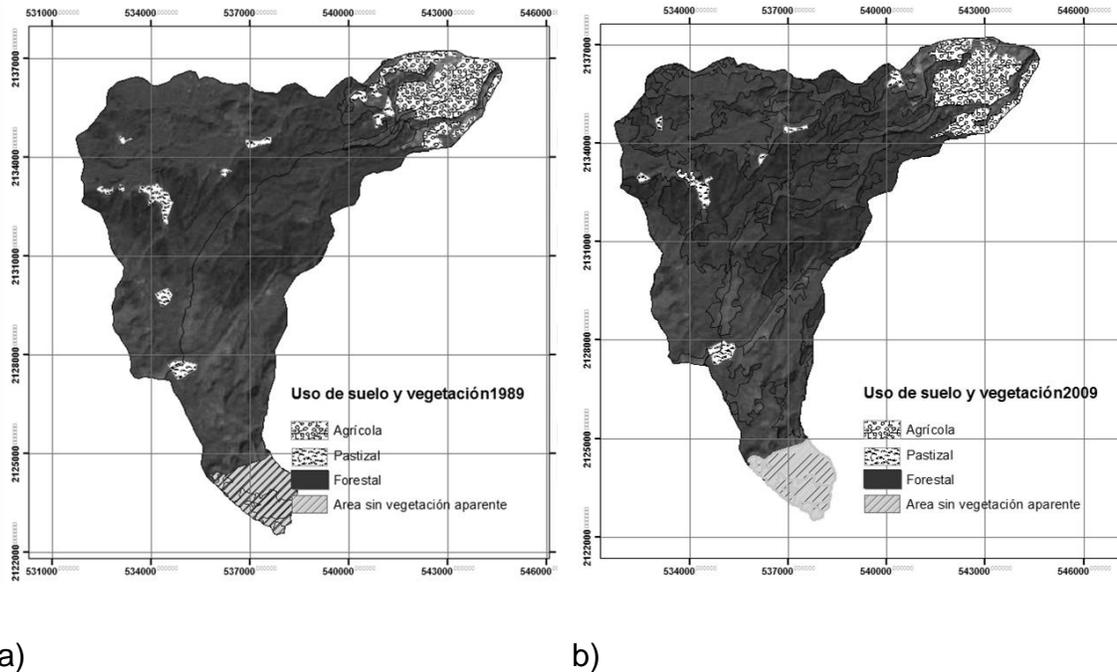


Figura 14. Mapas de uso de suelo y vegetación de (a) 1989 y (b) 2009

6.4.2.- Tendencia de uso de suelo para el año 2020

La matriz de transición que analiza los datos de 1989 y 2009 para predecir el año 2020 indica que no se observaron cambios del área agrícola hacia el área forestal ni viceversa Cuadro 8. Esto se puede atribuir al carácter de conservación de la mayoría de la superficie analizada.

Cuadro 8. Matriz de transición para el año 2020

Estados	Forestal (1)	Pastizal (2)	Agrícola (3)
Forestal (1)	0.9454	0.0546	0.0000
Pastizal (2)	0.0556	0.8875	0.0569

Estados	Forestal (1)	Pastizal (2)	Agrícola (3)
Agrícola (3)	0.0000	0.0900	0.9100

- También se observa que la probabilidad de que permanezca como bosque para el año 2020 es de 94.54% (con 5613.31ha), la probabilidad de que permanezca como pastizal es del 88.75% (con 874.29ha) mientras que la probabilidad de que permanezca como agricultura es de 91% (con 284.22ha). También se observan las siguientes probabilidades de cambio.
- 369.68 ha con una probabilidad de cambio de pastizal a bosque 05.56%, esta probabilidad de cambio es lógica considerando una sucesión ecológica donde el pastizal precede al bosque.
- Probabilidad de cambio de agrícola a bosque 0%; que puede ser atribuido a que en este paso primero se debe dar una sucesión ecológica de agricultura después pastizal y finalmente bosque.
- 410.71ha con una probabilidad de cambio de bosque a pastizal 05.46%, este cambio puede darse como parte del manejo forestal al aplicar cortas forestales, para hacer aclareos o para provocar la regeneración del bosque.
- Probabilidad de cambio de bosque a agrícola 0%, este cambio es nulo debido al carácter de conservación de la mayor parte del área de estudio.
- 210.48 ha con una probabilidad de cambio de pastizal a agrícola 05.69%, este cambio es producto de las actividades humanas que colonizan cada vez más áreas naturales.
- 324.48 ha con una probabilidad de cambio de agrícola a pastizal 09.00%, en el momento en que se abandona una parcela agrícola comienza un proceso de sucesión ecológica.

6.4.3.- Cadena de Markov en el programa R

La cadena de Markov a tiempo discreto con tres estados $x=1$ forestal, $x=2$ pastizal, $x=3$ agrícola, que se muestra en la Figura 15 muestra 10000 iteraciones marcando una línea por cada cambio o iteración, donde la concentración de líneas obedece la probabilidad inicial de $p[1]=0.9207$ probabilidad de que sea

bosque, $p[2]=0.0148$ probabilidad de que sea pastizal y $p[3]=0.0645$ la probabilidad de que sea agrícola de acuerdo al uso de suelo 2009.

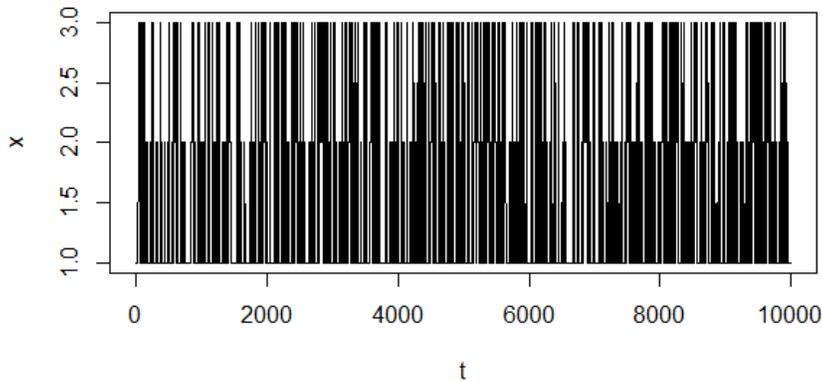


Figura 15. Cadena de Markov para 10000 iteraciones

6.4.4.- El estado estable de la cadena de Markov

La estimación de la media ergódica en el código antes mencionado promedia los estados de la cadena de Markov (1,2,3) cada 10 iteraciones y los grafica para hacer visible el momento en el cual dichos estados convergen y dejan de cambiar. La Figura 16 presenta la gráfica de la media ergódica donde se observa que después de las 400 iteraciones ya se tiene el periodo estable, en IDRISI la matriz de transición del estado estable se encontró después de calcular varias veces para diferentes periodos donde arrojo que después de 600 iteraciones se obtendrá la convergencia de la media ergodica.

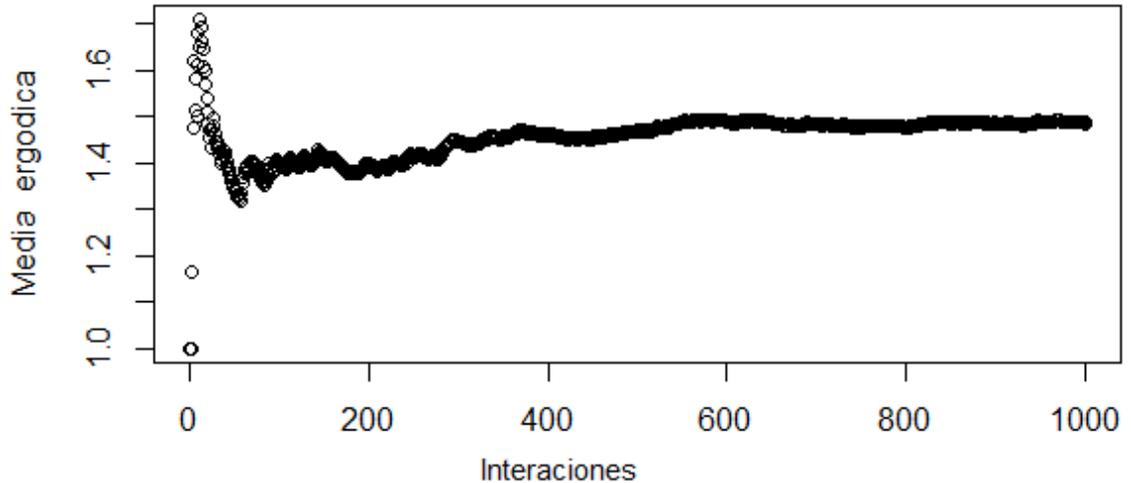


Figura 16. Media ergódica de 10000 iteraciones de una cadena de Markov a tiempo discreto

La matriz de transición después de 600 iteraciones se obtiene el estado estable, donde el 90.41% permanecerá como forestal, el 7.59% permanecerá como pastizal y el 2% permanecerá como agrícola.

6.5.- Conclusiones

De acuerdo a los resultados de la cadena de Markov para el año 2020 la microcuenca Zoquiapan se encuentra en un área donde la probabilidad de cambio es baja, se observa que en áreas de pastizal y agrícolas hay una baja probabilidad de cambio. También se observa que el bosque tiene una alta probabilidad de permanencia.

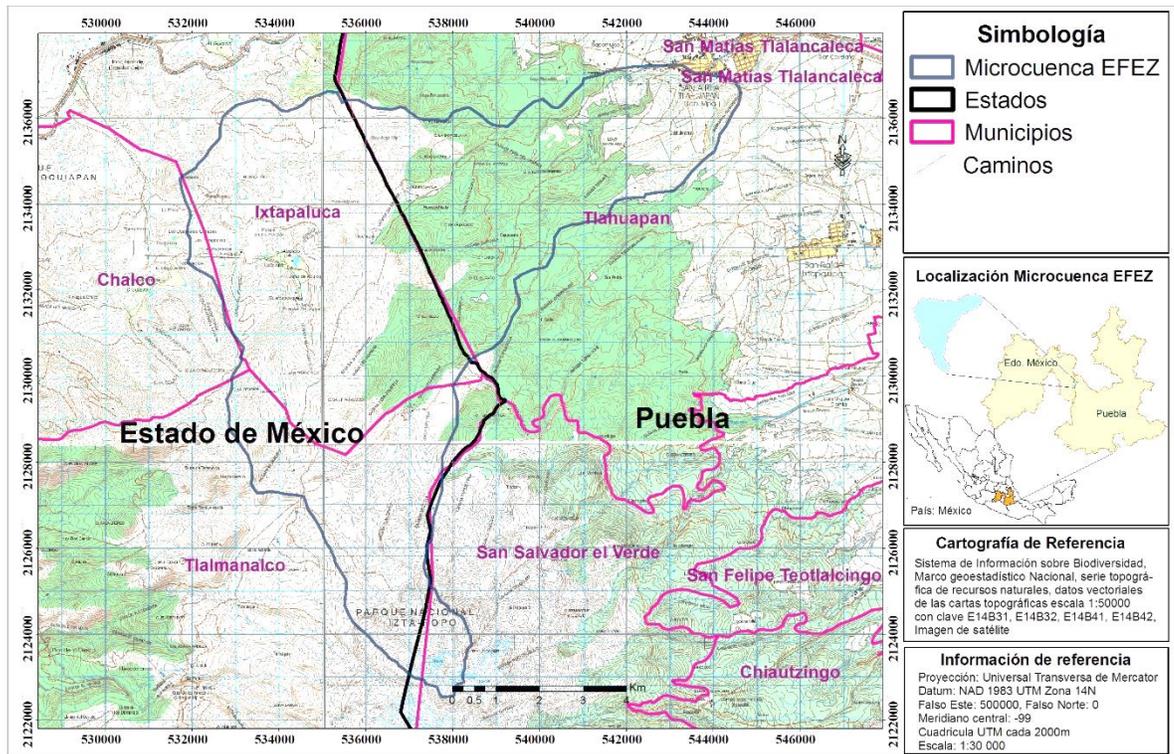
Considerando los resultados de la matriz de transición en el estado estable las probabilidades de permanencia de los usos de suelo serán el 90.41% para permanecer como forestal el 7.59% para pastizal y el 2% para agrícola.

6.6.-Bibliografía

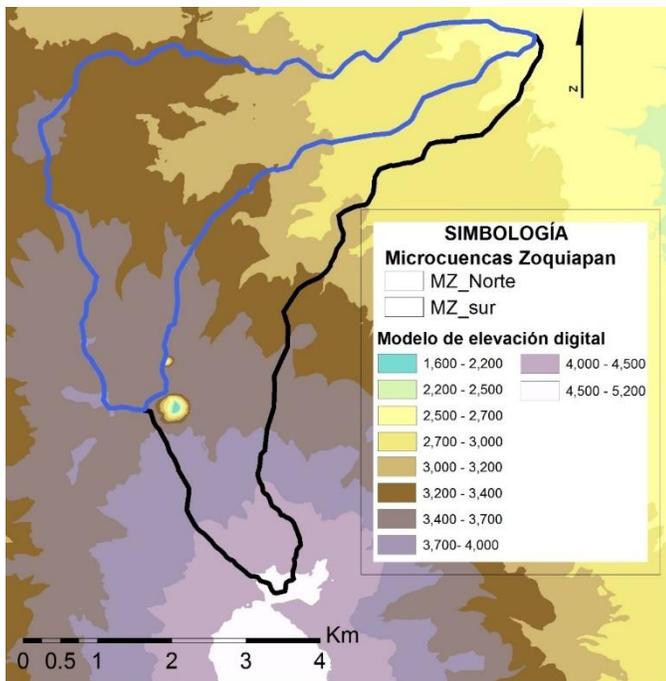
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes Tutorial*. Clark University. USA.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI selva*. Worcester, MA: Clark University.
- Figueroa-Jauregui, M. L., Ibañez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramirez, R., Arellano-Monterrosas, L., & Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45, 531–544.
- Levin, D. a., Peres, Y., & Wilmer, E. L. (2009). *Markov Chains and Mixing Times*. Book, 371. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2006.02.008>
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 11, num1, 57–71.
- Memarian, H., Balasundram, S. K., Talib, J. Bin, Teh, C., Sung, B., Sood, A. M., & Abbaspour, K. (2012). Validation of CA-Markov for Simulation of Land Use and Cover Change in the Langat Basin , Malaysia. *Journal of Geographic Information System*, 4(December), 542–554. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46059>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., & Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *International Review of Geographical Information Science and Technology*, 3, 22–44.
- Sanchayeeta, A., & Southworth, J. (2012). Simulating forest cover changes of bannerghatta national park based on a CA-Markov model: A remote sensing approach. *Remote Sensing*, 4(10), 3215–3243. <https://doi.org/10.3390/rs4103215>
- Virgen Cobos, G. V., Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., & Borja de la Rosa, A. M. (2016). *Establecimiento de una red de monitoreo meteorológico en la Estacion Foerstal Experimental Zoquiapan*. Tesis de maestría, Universidad Autonoma Chapingo, México.

7.- ANEXOS

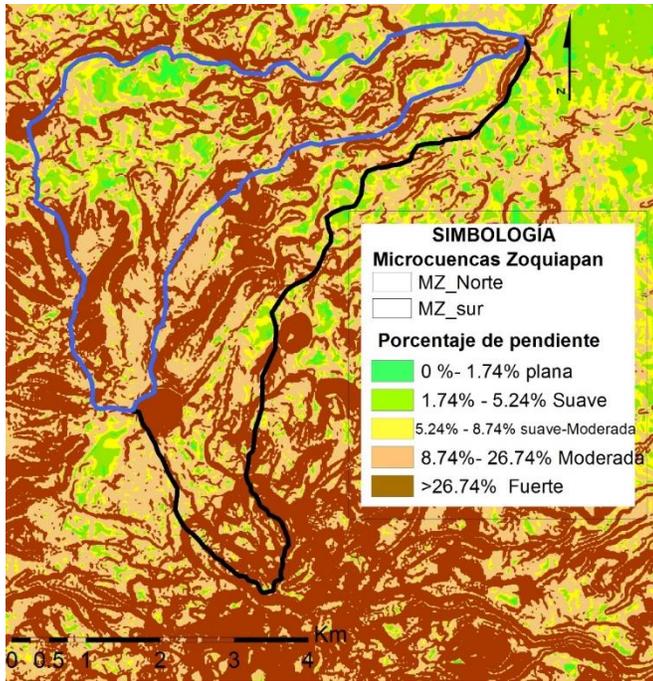
7.1. Anexo Cartográfico



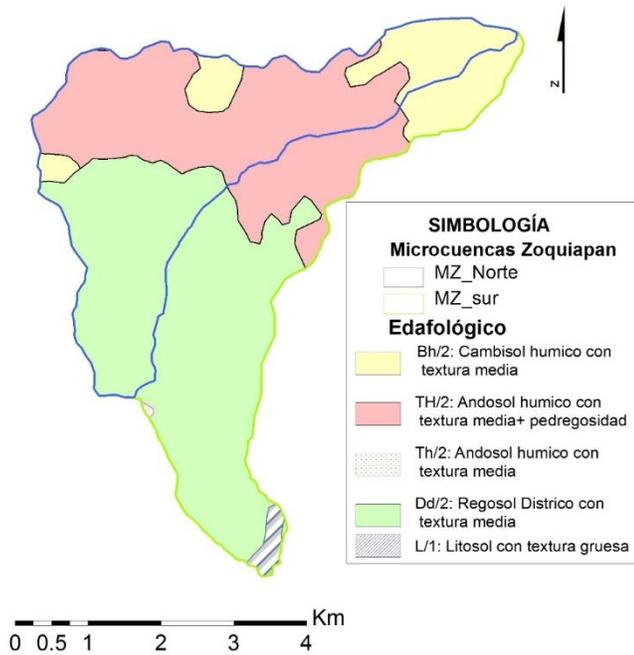
Mapa 1. Municipios dentro de la Microcuenca Zoquiapan



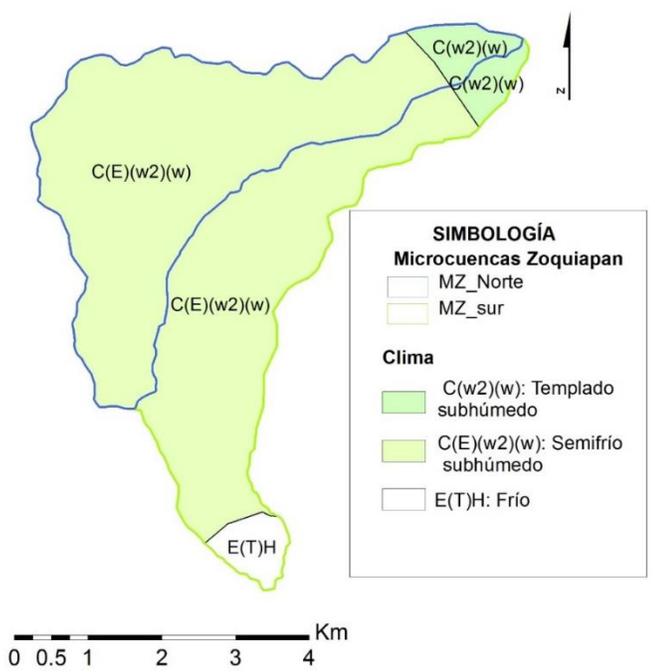
Mapa 2. Modelo de Elevación Digital de las Microcuenzas Zoquiapan



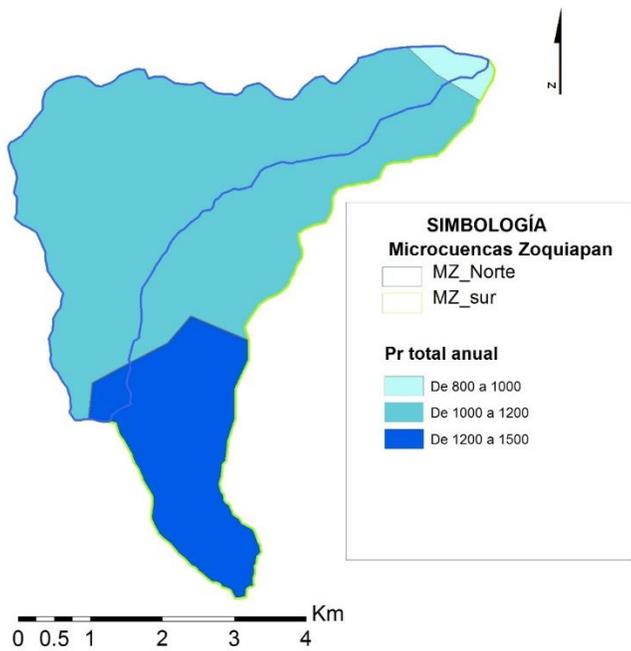
Mapa 3. Porcentaje de pendiente de la Microcuenca Zoquiapan



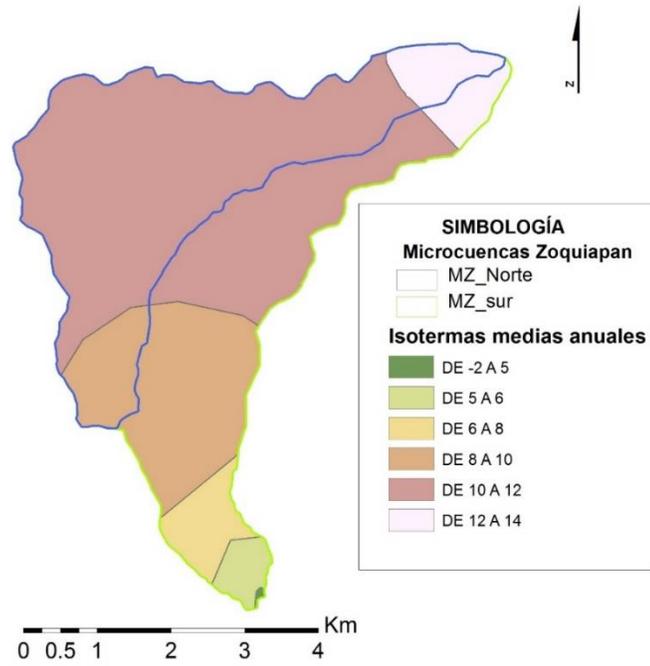
Mapa 4. Suelos de la Microcuenca Zoquiapan



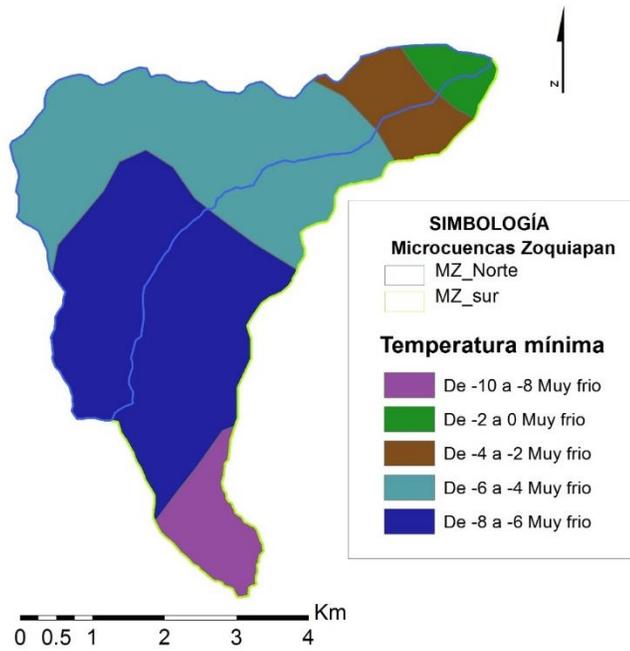
Mapa 5. Clima de la Microcuenca Zoquiapan



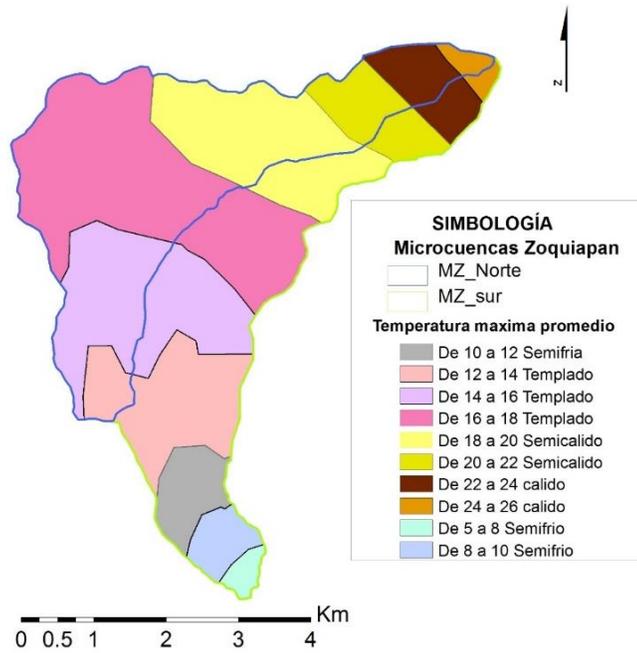
Mapa 6. Precipitación total anual de la Microcuenca Zoquiapan



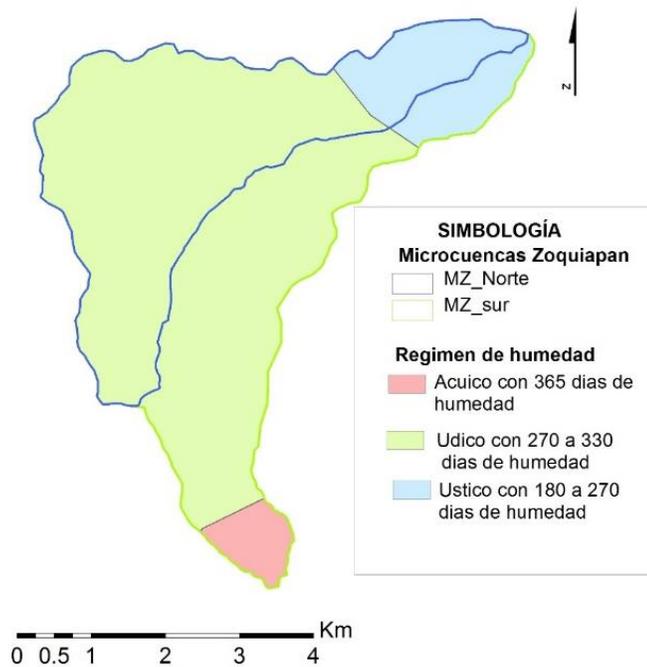
Mapa 7. Isothermas medias anuales de la Microcuenca Zoquiapan



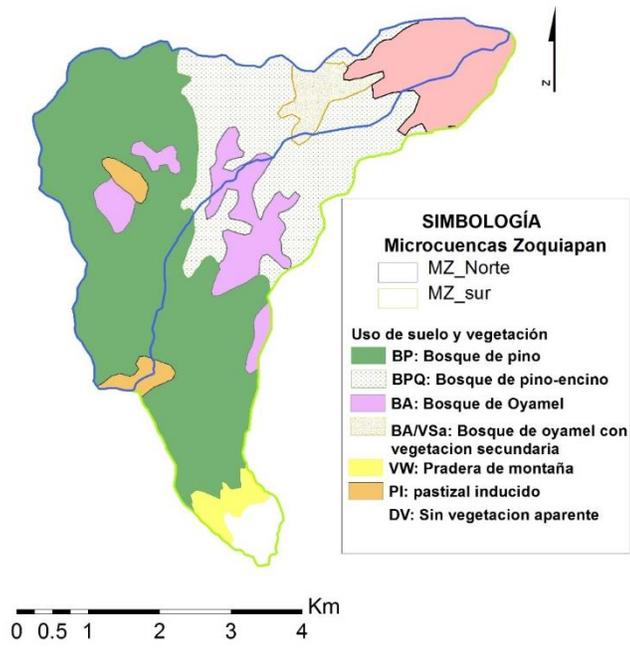
Mapa 8. Temperatura mínima de la Microcuenca Zoquiapan



Mapa 9. Temperatura máxima promedio de la Microcuenca Zoquiapan



Mapa 10. Régimen de humedad de la Microcuenca Zoquiapan



Mapa 11. Mapa uso de suelo y vegetación serie III de INEGI de la Microcuenca Zoquiapan

7.2.- Calculo de perfil longitudinal

7.2.1. Calculo de perfil longitudinal Sección Norte

x	y	altitud (z)	Diferencia de altitud	distancia entre dos puntos	distancia acumulada	distancia (km)	altitud (z)
533811.00	2127738.00	3599.25	62.49	541.79	541.79	0.54	3599.25
534077.00	2128210.00	3536.77	58.42	500.85	1042.65	1.04	3536.77
534139.00	2128707.00	3478.34	61.08	1114.64	2157.29	2.16	3478.34
533936.00	2129803.00	3417.26	36.21	566.37	2723.66	2.72	3417.26
533759.00	2130341.00	3381.05	68.03	883.73	3607.38	3.61	3381.05
534128.00	2131144.00	3313.02	39.99	746.55	4353.93	4.35	3313.02
534564.00	2131750.00	3273.04	9.49	233.04	4586.97	4.59	3273.04
534586.00	2131982.00	3263.55	5.46	214.76	4801.72	4.80	3263.55
534472.00	2132164.00	3258.09	11.81	308.02	5109.75	5.11	3258.09
534349.08	2132446.43	3246.28	52.77	1021.63	6131.37	6.13	3246.28
534499.00	2133457.00	3193.51	22.27	528.34	6659.72	6.66	3193.51
535027.00	2133438.00	3171.24	34.14	482.66	7142.38	7.14	3171.24
535508.00	2133398.00	3137.09	20.13	334.26	7476.64	7.48	3137.09
535826.00	2133295.00	3116.96	18.03	573.65	8050.29	8.05	3116.96
536388.00	2133410.00	3098.93	8.39	563.04	8613.33	8.61	3098.93
536641.00	2133913.00	3090.54	23.72	484.95	9098.28	9.10	3090.54
537008.00	2134230.00	3066.83	8.72	570.92	9669.20	9.67	3066.83
537573.00	2134312.00	3058.11	43.14	695.31	10364.51	10.36	3058.11
538052.00	2134816.00	3014.97	104.40	866.23	11230.74	11.23	3014.97
538767.00	2135305.00	2910.57	14.99	347.52	11578.26	11.58	2910.57
539108.00	2135238.00	2895.58	41.45	668.35	12246.61	12.25	2895.58
539684.00	2134899.00	2854.13	18.62	107.54	12354.15	12.35	2854.13
539783.00	2134857.00	2835.51	16.83	430.51	12784.66	12.78	2835.51
540212.00	2134821.00	2818.68	22.97	537.78	13322.44	13.32	2818.68
540622.00	2135169.00	2795.71	40.48	426.60	13749.03	13.75	2795.71
541046.00	2135216.00	2755.24	18.45	340.60	14089.63	14.09	2755.24
541168.00	2135534.00	2736.79	14.54	408.85	14498.49	14.50	2736.79
541224.00	2135939.00	2722.25	42.48	705.30	15203.79	15.20	2722.25
541811.00	2136330.00	2679.77	20.90	807.57	16011.36	16.01	2679.77
542442.00	2136834.00	2658.86	2.31	156.52	16167.88	16.17	2658.86
542475.00	2136987.00	2656.56	26.64	479.05	16646.93	16.65	2656.56
542954.00	2136994.00	2629.91	31.45	523.00	17169.94	17.17	2629.91
543436.00	2136791.00	2598.46	7.11	242.29	17412.23	17.41	2598.46
543677.00	2136766.00	2591.35	11.19	135.77	17548.00	17.55	2591.35
543802.00	2136713.00	2580.16	2580.16	2204827.2 2	20773.00	20.77	2580.16

7.2.2. Calculo de perfil longitudinal Sección Sur

x	y	altitud (z)	Distancia entre dos puntos	distancia acumulada	distancia (km)	altitud (z)
537666.00	2122790.00	4597.75	846.43	846.43	0.85	4597.75
537063.00	2123384.00	4318.25	606.61	1453.04	1.45	4318.25
536910.00	2123971.00	4122.36	625.77	2078.81	2.08	4122.36
536439.00	2124383.00	3947.73	595.85	2674.66	2.67	3947.73
536185.00	2124922.00	3836.79	730.60	3405.26	3.41	3836.79
535942.00	2125611.00	3737.11	514.33	3919.58	3.92	3737.11
536144.00	2126084.00	3694.25	422.93	4342.52	4.34	3694.25
536259.00	2126491.00	3680.01	633.76	4976.28	4.98	3680.01
536154.00	2127116.00	3586.59	567.02	5543.30	5.54	3586.59
536159.00	2127683.00	3518.58	945.93	6489.23	6.49	3518.58
536776.00	2128400.00	3470.09	366.12	6855.34	6.86	3470.09
536715.00	2128761.00	3440.81	513.01	7368.35	7.37	3440.81
537064.00	2129137.00	3397.55	1559.12	8927.47	8.93	3397.55
538057.00	2130339.00	3237.61	524.78	9452.25	9.45	3237.61
538147.00	2130856.00	3107.94	286.46	9738.70	9.74	3107.94
538074.00	2131133.00	3050.10	657.14	10395.84	10.40	3050.10
538127.00	2131788.00	2998.29	495.45	10891.29	10.89	2998.29
538592.00	2131959.00	2960.25	635.41	11526.70	11.53	2960.25
539121.00	2132311.00	2949.48	462.45	11989.15	11.99	2949.48
539257.00	2132753.00	2936.42	745.87	12735.02	12.74	2936.42
539448.00	2133474.00	2926.90	751.99	13487.01	13.49	2926.90
540162.00	2133710.00	2895.65	220.84	13707.85	13.71	2895.65
540013.00	2133873.00	2858.98	307.71	14015.56	14.02	2858.98
540191.00	2134124.00	2818.78	718.63	14734.19	14.73	2818.78
540909.00	2134094.00	2797.27	1145.20	15879.39	15.88	2797.27
541763.00	2134857.00	2739.39	487.49	16366.88	16.37	2739.39
542232.00	2134990.00	2711.85	529.67	16896.55	16.90	2711.85
542760.00	2135032.00	2705.30	441.90	17338.45	17.34	2705.30
543196.00	2134960.00	2690.19	623.94	17962.39	17.96	2690.19
543776.00	2135190.00	2680.00	307.30	18269.70	18.27	2680.00
543946.00	2135446.00	2629.73	992.55	19262.25	19.26	2629.73
544333.00	2136360.00	2585.06	440.11	19702.37	19.70	2585.06
544493.00	2136770.00	2557.42	118.27	19820.63	19.82	2557.42
544439.39	2136875.42	2556.72	2205141.90	21406.00	21.41	2556.72

7.3.- Calculo de curva hipsométrica

7.3.1. Calculo de curva hipsométrica Sección Norte

Altitud	Área (m2)	km2	Área acumulada	Área Total-Área acumulada (a)	%área con respecto al total	%_area_acumulada(h)	Diferencia de altitud	Desnivel acumulado (h)	a/Área Total	h/H (desnivel total)
2450	149291.85	0.15	0.15	44.29	0.34	0.34	0.00	0.00	1.00	0.00
2550	1491288.74	1.49	1.64	42.80	3.36	3.69	100.00	100.00	0.96	0.08
2650	2621868.31	2.62	4.26	40.18	5.90	9.59	100.00	200.00	0.90	0.17
2750	2746774.36	2.75	7.01	37.43	6.18	15.77	100.00	300.00	0.84	0.25
2850	2053522.64	2.05	9.06	35.38	4.62	20.39	100.00	400.00	0.80	0.33
2950	2743640.96	2.74	11.81	32.63	6.17	26.57	100.00	500.00	0.73	0.42
3050	6102768.96	6.10	17.91	26.53	13.73	40.30	100.00	600.00	0.60	0.50
3150	10348482.89	10.35	28.26	16.18	23.29	63.59	100.00	700.00	0.36	0.58
3250	6563265.23	6.56	34.82	9.62	14.77	78.35	100.00	800.00	0.22	0.67
3350	4025188.91	4.03	38.85	5.59	9.06	87.41	100.00	900.00	0.13	0.75
3450	3399140.83	3.40	42.25	2.19	7.65	95.06	100.00	1000.00	0.05	0.83
3550	2074546.04	2.07	44.32	0.12	4.67	99.73	100.00	1100.00	0.00	0.92
3650	120320.15	0.12	44.44	0.00	0.27	100.00	100.00	1200.00	0.00	1.00

7.3.2. Calculo de curva hipsométrica Sección Sur

Altitud	Área (m2)	km2	Área acumulada	Área Total-Área acumulada (a)	%área con respecto al total	%_área_acumulada(h)	Diferencia de altitud	Desnivel acumulado (h)	A/Área Total	h/H (desnivel total)
2650	2250593.82	2.25	2.25	32.82	6.42	6.42	0.00	0.00	#iDIV/O!	0.00
2750	1628053.30	1.63	3.88	31.19	4.64	11.06	100.00	100.00	0.889	0.05
2850	3077354.18	3.08	6.96	28.11	8.78	19.83	100.00	200.00	0.802	0.11
2950	2641897.39	2.64	9.60	25.47	7.53	27.37	100.00	300.00	0.726	0.16
3050	2326735.93	2.33	11.92	23.14	6.63	34.00	100.00	400.00	0.660	0.21
3150	2825454.97	2.83	14.75	20.32	8.06	42.06	100.00	500.00	0.579	0.26
3250	3668205.19	3.67	18.42	16.65	10.46	52.52	100.00	600.00	0.475	0.32
3350	3560539.19	3.56	21.98	13.09	10.15	62.67	100.00	700.00	0.373	0.37
3450	2971609.13	2.97	24.95	10.12	8.47	71.15	100.00	800.00	0.289	0.42
3550	2206707.54	2.21	27.16	7.91	6.29	77.44	100.00	900.00	0.226	0.47
3650	1808927.16	1.81	28.97	6.10	5.16	82.60	100.00	1000.00	0.174	0.53
3750	1728650.94	1.73	30.69	4.37	4.93	87.53	100.00	1100.00	0.125	0.58
3850	790850.91	0.79	31.49	3.58	2.26	89.78	100.00	1200.00	0.102	0.63
3950	727826.67	0.73	32.21	2.86	2.08	91.86	100.00	1300.00	0.081	0.68
4050	893250.84	0.89	33.11	1.96	2.55	94.40	100.00	1400.00	0.056	0.74
4150	754027.43	0.75	33.86	1.21	2.15	96.55	100.00	1500.00	0.034	0.79
4250	603104.76	0.60	34.46	0.61	1.72	98.27	100.00	1600.00	0.017	0.84

4350	272693.02	0.27	34.74	0.33	0.78	99.05	100.00	1700.00	0.009	0.89
4450	217664.09	0.22	34.95	0.12	0.62	99.67	100.00	1800.00	0.003	0.95
4550	115358.48	0.12	35.07	0.00	0.33	100.00	100.00	1900.00	0.000	1.00

7.3.-Código en r para 10,000 iteraciones de una cadena de Markov a tiempo discreto y su media ergódica

```

#espacio de estados
e<-c(1,2,3)

# distribución inicial
p=matrix(0,3,1)
p[1]=0.9207
p[2]=0.0148
p[3]=0.0645

# matriz de probabilidades de transición
p
q=matrix(0,9,1)# matriz de transicion
q[1]=0.9454
q[2]=0.1224
q[3]=0
q[4]=0.0555
q[5]=0.7275
q[6]=0.3979
q[7]=0.0000
q[8]=0.1501
q[9]=0.6021

q=matrix(q,ncol=3,nrow=3,byrow = T)

```

```

q
(func.inic=cumsum(q)) # funcion de iniciacion
# longitud cadena de Markov
k=10000
# cadena de Markov
x<-matrix(0,k,1)
# estado inicial
u <-runif(1) # uniformes U1,...,Un en [0,1]
# primer valor de la cadena
j = 1; while(u[1]>func.inic[j]) j=j+1;
x[1]=estados[j]
x #estado inicial
for(i in 2:k)
{ # i=2
  if(x[i-1]==1)
  { u1<-runif(1)
    if(u1<q[1,1]) {x[i]<-1}
    if(u1>=q[1,1]&&u1<(q[1,1]+q[1,2]))
    {x[i]<-2}
    if(u1>=(q[1,1]+q[1,2])&&u1<(q[1,1]+q[1,2]+q[1,3]))
    {x[i]<-3}}
  if(x[i-1]==2)
  { u1<-runif(1)
    if(u1<q[2,1]) {x[i]<-1}
    if(u1>=q[2,1]&&u1<(q[2,1]+q[2,2]))

```

```

{x[i]<-2}
if(u1>=(q[2,1]+q[2,2])&&u1<(q[2,1]+q[2,2]+q[2,3]))
{x[i]<-3}
}
if(x[i-1]==3)
{ u1<-runif(1)
if(u1<q[3,1]) {x[i]<-1}
if(u1>=q[3,1]&&u1<(q[3,1]+q[3,2]))
{x[i]<-2}
if(u1>=(q[3,1]+q[3,2])&&u1<(q[3,1]+q[3,2]+q[3,3]))
{x[i]<-3}
}}
x
t<-seq(1,k,1)
plot(t,x,type="l")
#medias ergodicas, cada 10 iteraciones
n=k
Me<-matrix(0,nrow=n/10,ncol=1)
con<-10;con2<-1;
while(con<=n)
{Me[con2]<-(1/con)*sum(x[1:con])
con2<-con2+1
con<-con+10}
plot(Me)

```