



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA

MARÍA LORENZA TOLEDO MEDRANO

T E S I S

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

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS
REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe María Lorenza Toledo Medrano, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Identificación de variables ambientales que influyen en la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 14 de Julio de 2017.



Firma del
Alumno (a)



Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **Identificación de variables ambientales que influyen en la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña**, realizada por la alumna: **María Lorenza Toledo Medrano**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS HIDROCIENCIAS

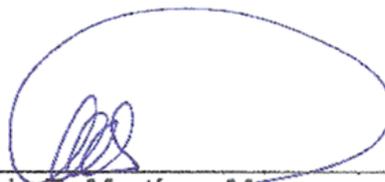
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso

ASESOR



Dr. Mario R. Martínez Ménez

ASESOR



Dr. José Luis García Rodríguez

ASESOR



M.C. Erasmo Rubio Granados

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2017

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA

María Lorenza Toledo Medrano, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

La presente investigación busca identificar las variables ambientales que favorecen la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña, a través de un análisis multivariado de los principales factores, que reporta la literatura, que influyen en este tipo de erosión. El presente trabajo inicia con la identificación de las diversas variables que reporta la literatura en la formación de cárcavas y continúa con la recopilación de cartografía en escala superior a 1:50 000. Las variables preseleccionadas fueron sometidas a un análisis estadístico para discriminar aquellas que tenían altas correlaciones entre sí, de este proceso resultaron: distancia a fallas, distancia a picos, pendiente, curvatura vertical, curvatura horizontal, índice de posición topográfica, longitud de la pendiente, índice topográfico de humedad, densidad de población e índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). Sobre estas variables se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) resultando que los primeros seis componentes condensan el 96.7% de la información contenida en las 10 capas analizadas. Con estos seis componentes se realizó la clasificación supervisada y se obtuvieron las zonas con presencia y susceptibilidad a la formación de cárcavas. Para validar las áreas clasificadas con problemas de cárcavas se verificó las áreas con una probabilidad superior al 50% en google earth. La confiabilidad del mapa resultante, en función de ausencia y presencia de cárcavas fue de 96.2%; para un buffer de 50 m resultó del 83.4%, para uno de 100 m fue 81.7% y para uno de 150 m alcanzó el 77.9%. Del trabajo se concluye que las variables de mayor influencia, en la formación de cárcavas son: distancia a fallas, distancias a picos, índice topográfico de humedad, NDVI, pendiente del terreno y densidad de población.

Palabras Clave: Máxima verosimilitud, análisis multivariado, puntos de muestreo, modelos de elevación.

IDENTIFICATION OF ENVIRONMENTAL VARIABLES THAT INFLUENCE THE FORMATION OF GULLIES IN THE MIXTEC OF OAXACA

María Lorenza Toledo Medrano, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

The present research seeks to identify the environmental variables that favor the formation of gullies in the Mixtec of Oaxaca, through a multivariate analysis of the main factors reported in the literature, which influence this type of erosion. . The present work begins with the identification of the various variables reported in the literature on the formation of gullies and it continues with the compilation of cartography on a scale greater than 1:50 000. The pre-selected variables were subjected to a statistical analysis to discriminate those that had high correlations with each other; of this process was obtained: distance to faults, distance to peaks, slope, vertical curvature, horizontal curvature, Topographic Position Index, slope length, Topographic Index of humidity, population density and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). On these variables, the principal component analysis (PCA) was applied, resulting that the first six components condense 96.7% of the information contained in the 10 layers analyzed. With these six components, the supervised classification was made and the areas having or showing susceptibility to gully formation were obtained. In order to validate the areas classified as gully areas, areas with a probability greater than 50% in google earth were verified. The reliability of the resulting map, based on absence and presence of gullies was 96.2%; for a buffer of 50 m it was 83.4%, for one of 100 m it was 81.7% and for one of 150 m it reached 77.9%. From this work, it was concluded that the variables of greater influence in the formation of gullies in the study area, in order of importance, are: distance to faults, distances to peaks, topographic index of humidity, NDVI, land slope and population density.

Keywords: Maximum likelihood, multivariate analysis, sampling points, elevation models.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo de Ciencia y Tecnología**, por la oportunidad que me proporcionó otorgando la beca para el financiamiento de la maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, por permitirme continuar con mi preparación académica.

Al **Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso**, por darme la guía y confianza para realizar la presente investigación. Gracias Dr. por su paciencia y comprensión ante la etapa que estoy pasando.

Al **Dr. Mario Martínez Menez**, por el apoyo y consejos para realizar el trabajo de tesis. Gracias por todos los detalles que me hicieron más fuerte.

Al **Dr. José Luis García Rodríguez**, por la disposición y por formar parte de mi consejo.

Al **M.C. Erasmo Rubio Granados**, por el apoyo incondicional, la orientación y la confianza hacia mi persona.

Al **M.C. José Donald Ríos Berber**, por su apoyo, confianza y por aquellas largas pláticas aportadoras de experiencia.

Al **Ing. Carlos Palacios Espinoza**, por los conocimientos compartidos hacia todos los que te pedimos ayuda.

A la **Familia Toledo Medrano**, por estar siempre unidos apoyándonos en todo como nuestros padres nos lo han inculcado.

A **Mi Familia**, por la paciencia y comprensión que me han tenido, por ustedes lucho y no me doy por vencida para seguir adelante.

A **Mis Compañeros** y amigos que me permitieron compartir momentos académicos y familiares.

A **Mariela y Patricia** por apoyarme a en los trámites administrativos durante mi estancia en el CP.

DEDICATORIA

A mi familia

Felipe de Jesús, Ileri Jazmín y Alan Josué, mis amores por ustedes trabajo para ser un ejemplo a seguir, los adoro por estar siempre a mi lado apoyando cada paso que doy.

A mis padres

Ninfa Medrano Meza y Benjamín Toledo García (†), por darme las herramientas de ir siempre hacia adelante para culminar los proyectos. Mamita eres una persona admirable y un ejemplo a seguir. Papá yo sé que aunque no estés conmigo en esta vida terrenal siempre estas a mi lado apoyándome.

A mis hermanos

Adela, Gerardo, Moisés, Graciela, Trinidad, Esmeralda, Cecilia y Pilar, por estar siempre unidos apoyándonos como nuestros padres nos lo han inculcado.

A mis sobrinos

Kari, Nayeli, Perla, Brenda, Estefany, Dany, Erandi, Nicole, Nadia, Gadi, Misael, Emanuel, Erik, Samuel, Isaí, Iván, Diego, Jezer y Jared, son unos chicos extraordinarios que adoro.

A la familia López Ortiz y Morales Ortiz

Gracias por adoptarnos como parte de su apreciable familia, es un honor poder contar con ustedes.

A mis amigos y compañeros.

Ale García, Miroslava, Ale Reyes, José Cortes, Carlos Tavares, Roció, Ana Luisa, Gris, Claudia, Jazmín, Jaque, Betsy, Horacio, Roberto, Eliezer y Rafael (†), por cada uno de los instantes compartidos y el apoyo incondicional.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. <i>General.....</i>	2
2.2. <i>Objetivos particulares.....</i>	2
3. HIPOTESIS.....	2
4. REVISION DE LITERATURA.....	3
4.1. <i>Variables que influyen en la formación de cárcavas.....</i>	4
4.1.1. <i>Variable antrópicas.....</i>	4
4.1.2. <i>Variables físicas.....</i>	5
4.2. <i>Procesos de aparición de cárcavas.....</i>	7
4.3. <i>Uso de los sensores remotos y SIG.....</i>	7
4.4. <i>Enfoques para el estudio de las cárcavas.....</i>	8
4.5. <i>Técnicas de análisis para la identificación de cárcavas.....</i>	9
4.5.1. <i>Análisis multicriterio.....</i>	9
4.5.2. <i>Análisis multivariado.....</i>	9
4.5.3. <i>Clasificación supervisada.....</i>	11
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
5.1. <i>Caracterización biofísica.....</i>	13
5.1.1. <i>Ubicación geográfica del área de estudio.....</i>	13
5.1.2. <i>Clima.....</i>	14
5.1.2.1. <i>Grupo climático Cálido.....</i>	16
5.1.2.2. <i>Grupo climático semicálido del grupo de los cálidos.....</i>	16
5.1.2.3. <i>Grupo climático seco.....</i>	17
5.1.2.4. <i>Grupo climático Templados.....</i>	17
5.1.2.5. <i>Grupo climático Templado Semifrío.....</i>	18

5.1.3.	Suelos.....	18
5.1.3.1.	Descripción de los tipos de suelos	21
5.1.4.	Fisiografía.....	24
5.1.4.1.	Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur	26
5.1.4.2.	Subprovincia Cordillera Costera del Sur	26
5.1.4.3.	Subprovincia Mixteca Alta	27
5.1.4.4.	Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca.....	27
5.1.5.	Hidrología	27
5.1.5.1.	Regiones y cuencas hidrológicas	29
5.1.6.	Geología.....	30
5.1.6.1.	Tipos de rocas.....	30
5.1.6.2.	Estratigrafía regional	33
5.1.6.3.	Falla Tamazulapam.....	36
5.1.7.	Uso de suelo y vegetación.....	38
5.2.	<i>Materiales</i>	40
5.3.	<i>Métodos</i>	41
5.3.1.	Recopilación y análisis	41
5.3.2.	Recopilación de información de relieve	43
5.3.3.	Recopilación de información satelital	44
5.3.4.	Recopilación de información de campo	45
5.3.5.	Obtención de variables	64
5.3.5.1.	Variables topográficas.....	65
5.3.5.2.	Variables hidrológicas	81
5.3.5.3.	Variables geológicas	85
5.3.5.4.	Variables Cobertura vegetal.....	90
5.3.5.5.	Variable antropogénica	96
5.3.6.	Escalamiento de variables.....	99
5.3.7.	Análisis de componentes principales.....	99
5.3.8.	Clasificación supervisada para determinar la susceptibilidad a la formación de cárcavas	100
5.3.8.1.	Áreas de entrenamiento	100

5.3.8.2. Creación de firmas ambientales	101
5.3.8.3. Clasificación supervisada	102
5.3.8.4. Puntos de inspección	102
5.3.8.5. Confiabilidad de la clasificación.....	103
6. RESULTADOS.....	104
6.1. <i>Variables seleccionadas</i>	104
6.1.1. Pendiente topográfica.....	104
6.1.2. Curvatura vertical o de perfil (CV)	105
6.1.3. Curvatura Horizontal o plana (CH)	106
6.1.4. Longitud de la pendiente	106
6.1.5. Índice de posición topográfica	107
6.1.6. Índice topográfico de humedad	108
6.1.7. Distancia a picos	109
6.1.8. Distancia a fallas	110
6.1.9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	111
6.1.10. Densidad de Población.....	112
6.2. <i>Análisis de componentes principales</i>	113
6.2.1. Descripción de los Componentes principales seleccionados	116
6.2.2. Cobertura raster resultado del ACP.....	117
6.3. <i>Probabilidad de existencia de cárcavas</i>	118
6.4. <i>Validación de resultados</i>	120
7. CONCLUSIONES	122
8. RECOMENDACIONES.....	123
9. LITERATURA CITADA	124
10. ANEXOS.....	140

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de climas del área de estudio.	14
Cuadro 2. Tipos de suelos.....	19
Cuadro 3. Provincias fisiográficas.....	26
Cuadro 4. Regiones hidrológicas en el área de estudio.	29
Cuadro 5. Geología del área de estudio.	30
Cuadro 6. Uso de suelo y vegetación.	38
Cuadro 7. Ubicación de los sitios visitados en campo.....	46
Cuadro 8. Clasificación de pendientes (Ferrando, 1993).	66
Cuadro 9. Clasificación de pendientes del área de estudio.	67
Cuadro 10. Clasificación de curvatura vertical.....	70
Cuadro 11. Clasificación de curvatura horizontal.	72
Cuadro 12. Longitud de la pendiente del área de estudio.	75
Cuadro 13. Clasificación del relieve en función del IPT.....	78
Cuadro 14. . Índice de posición topográfica.....	79
Cuadro 15. Índice topográfico de humedad.....	83
Cuadro 16. Rangos de distancia a picos (m).	86
Cuadro 17. Distancias a la Falla Tamazulapam.	88
Cuadro 18. Características de las imágenes de satélite.....	90
Cuadro 19. Rangos del Índice de Vegetación Normalizada.....	94

Cuadro 20. Rangos de densidad de población.....	97
Cuadro 21. Matriz de covarianzas del ACP.	113
Cuadro 22. Matriz de correlaciones del ACP.	114
Cuadro 23. Matriz de vectores propios del ACP.	114
Cuadro 25. Matriz de autovalores y porcentaje de variación explicada del ACP.....	115
Cuadro 26. Probabilidad de existencia de cárcavas.	118
Cuadro 27. Variables más importantes en la formación de cárcavas.	119
Cuadro 28. Punto de verificación de cárcavas.	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas en la evolución de una cárcava.....	3
Figura 2. Concepto de Componentes principales para 2CP	11
Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio.	13
Figura 4. Tipos de climas en la Mixteca Oaxaqueña (INEGI, 2008).	15
Figura 5. Tipos de suelos en el área de estudio (INEGI, 2006).	20
Figura 6. Fisiografía del área de estudio (INEGI, 2004).	25
Figura 7. Hidrología del área de estudio (INEGI, 2010).	28
Figura 8. Geología del área de estudio (SGM, 2000; SGM 2001).	32
Figura 9. Perfil estratigráfico de la Mixteca Oaxaqueña (Santamaría - Díaz, 2009).	36
Figura 10. Formaciones y estructuras geológicas del área de estudio (SGM, 2000).	37
Figura 11. Uso de suelo y vegetación (WWF, 2014).	39
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.	42
Figura 13. Remuestreo del modelo de elevación.	44
Figura 14. Imágenes Spot usadas.	45
Figura 15. Sitios de reconocimiento en campo.	47
Figura 16. Fotografías del sitio 1.	48
Figura 17. Fotografías del sitio 2.	49
Figura 18. Fotografías del sitio 3.	50
Figura 19. Fotografías del sitio 4.	51

Figura 20. Fotografías del sitio 5.....	52
Figura 21. Fotografías del sitio 6.....	53
Figura 22. Fotografías del sitio 7.....	54
Figura 23. Fotografías del sitio 8.....	55
Figura 24. Fotografías del sitio 9.....	56
Figura 25. Fotografías del sitio 10.	57
Figura 26. Fotografías del sitio 11.	58
Figura 27. Fotografías del sitio 12.	59
Figura 28. Fotografías del sitio 13.	60
Figura 29. Fotografías del sitio 14.	61
Figura 30. Fotografías del sitio 15.	62
Figura 31. Fotografías del sitio 16.	63
Figura 32. Fotografías del sitio 17.	64
Figura 33. Representación gráfica de la pendiente.	66
Figura 34. Rangos de pendientes del área de estudio.....	68
Figura 35. Tipos de curvatura de perfil o vertical.....	69
Figura 36. Curvatura vertical del área de estudio.....	71
Figura 37. Tipos de curvatura plana u horizontal.	72
Figura 38. Curvatura horizontal del área de estudio.	73
Figura 39. Longitud de la pendiente.	74

Figura 40. Comando para el cálculo de longitud de la pendiente en Qgis.	74
Figura 41. Clasificación de longitud de la pendiente.	76
Figura 42. IPT adaptado de Weiss, 2001 (Silveira y Silveira, 2014).	77
Figura 43. Clasificación del relieve en función del IPT.	78
Figura 44. Clasificación del Índice de Posición Topográfica.	80
Figura 45. Modelo para obtener el ITH.	82
Figura 46. Distribución geográfica del Índice topográfico de humedad.	84
Figura 47. Clasificación de Distancia a picos.	87
Figura 48. Clasificación de Distancia a fallas.	89
Figura 49. Comandos para el cálculo de radianza en Qgis.	92
Figura 50. Comandos para el cálculo de reflectancia en Qgis.	93
Figura 51. Clasificación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.	95
Figura 52. Calculo de densidad de población con Kernel.	96
Figura 53. Clasificación de Densidad de Población.	98
Figura 54. Model builder para escalar las variables.	99
Figura 55. Proceso de Análisis de Componentes Principales.	99
Figura 56. Áreas de entrenamiento.	101
Figura 57. Procedimiento para crear puntos al azar.	102
Figura 58. Ejemplos de inspección en Google earth.	103

Figura 59. Distribución de las cárcavas en función de la pendiente del terreno (áreas de entrenamiento).	104
Figura 60. Distribución de las cárcavas en función de la curvatura vertical (áreas de entrenamiento).	105
Figura 61. Distribución de las cárcavas en función de la curvatura horizontal (áreas de entrenamiento).	106
Figura 62. Distribución de las cárcavas en función de la longitud de la pendiente (áreas de entrenamiento).	107
Figura 63. Distribución de las cárcavas en función del Índice de posición topográfica (áreas de entrenamiento).	108
Figura 64. Distribución de las cárcavas en función del Índice Topográfico de humedad (áreas de entrenamiento).	109
Figura 65. Distribución de las cárcavas en función de la distancia a picos (áreas de entrenamiento).	110
Figura 66. Distribución de las cárcavas en función de la distancia a fallas (áreas de entrenamiento).	111
Figura 67. Distribución de las cárcavas en función del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. (Áreas de entrenamiento).	111
Figura 68. Histograma de Densidad de Población.	112
Figura 69. Grafica de densidad de los componentes principales.	115
Figura 70. Imagen del ACP con 10 capas.	117
Figura 71. Imagen del ACP con 6 bandas.	117
Figura 72. Probabilidad de existencia de cárcavas.	120

Figura 73. Porcentaje de cobertura de cárcavas en los puntos de verificación. 121

1. INTRODUCCIÓN

La erosión se considera un problema de degradación del suelo con impactos ambientales, económicos y sociales permanentes. La pérdida de suelo, con el paso del tiempo, reduce la profundidad de la capa superficial del suelo, baja la fertilidad, disminuye el rendimiento de los cultivos e incrementa la marginación y pobreza de las poblaciones.

Una forma avanzada de la erosión son las cárcavas, que afecta a gran parte de los suelos del mundo, es fuente de sedimentos que azolvan cauces y colmatan embalses, reducen la calidad del agua y alteran las propiedades hidráulicas en cauces e infraestructura (Pathak *et al.*, 2005).

Las cárcavas son resultado de las actividades antrópicas, como el sobrepastoreo de agostaderos, la agricultura sin control de escurrimientos, la expansión de la frontera agrícola en laderas y la deforestación (Pathak *et al.*, 2005). Guerrero-Arenas *et al.* (2010) mencionan que los ecosistemas de la Mixteca alta de Oaxaca, sufrieron una serie de transformaciones desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno, las comunidades originales eran bosques abiertos con cuerpos de agua y estacionalidad climática, y terrenos con abundante materia orgánica; recientemente, después de la conquista, el área estuvo sometida a procesos de deforestación, sobrepastoreo de ganado caprino (Mendoza-García, 2002) y expansión de la frontera agrícola. Todo ello provocó, el desastre ecológico que en amplias superficies de la Mixteca la erosión en cárcavas sea un problema latente y difícil de controlar.

El control de este tipo de erosión requiere conocer las variables que favorecen la formación de cárcavas, con el fin de prevenir el incremento del área afectada. Para caracterizar las variables que influyen en la formación de cárcavas se han utilizado parámetros morfométricos, geológicos, edafológicos y de cobertura vegetal (Van Ghelue y Van Molle, 1990; Hernández, 1991).

En esta investigación se identificaron las áreas con mayor susceptibilidad de formación de cárcavas, a partir de variables ambientales y análisis multivariado.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Identificar áreas susceptibles a la formación de cárcavas, a través de variables ambientales.

2.2. Objetivos particulares

- Identificar las variables ambientales que influyen, en la formación de cárcavas.
- Validar estadísticamente el mapa generado con áreas observadas con la presencia de cárcavas.

3. HIPOTESIS

Las variables ambientales permiten identificar los factores que influyen en la formación de cárcavas.

4. REVISION DE LITERATURA

Las cárcavas son incisiones que se forman en el terreno cuando se concentra el escurrimiento, (Poesen, 1993; Poesen *et al.*, 2003), generalmente se desarrollan en capas de materiales no consolidados. Su formación inicia con canalillos pequeños, a medida que aumenta el escurrimiento superficial, estos tienden a crecer en profundidad y amplitud; hasta formar secciones transversales difíciles de controlar con el laboreo o el paso de la maquinaria.

Al crecer la cárcava, en sentido contrario del agua, recibe el nombre de cárcava remontante. El desarrollo comienza con una incisión y termina con un derrumbe que desplaza a la cabecera (Gómez *et al.*, 2011). Al comparar dos sitios de cárcavas en ubicaciones geográficas diferentes, Casali *et al.* (2000) concluyen que los procesos erosivos son similares: comienzan por una incisión, continua con el ensanchamiento de la sección y empinamiento del banco (Figura 1).

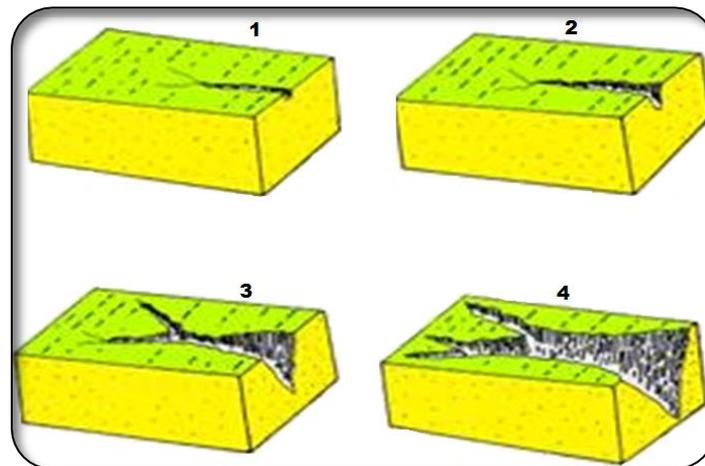


Figura 1. Etapas en la evolución de una cárcava.

Las cárcavas se diferencian en efímeras y permanentes; las primeras son aquellas que se eliminan mediante el laboreo agrícola. Las cárcavas permanentes son difíciles de eliminar con laboreo. Las cárcavas efímeras representan un problema en muchas regiones geográficas.

4.1. Variables que influyen en la formación de cárcavas

Los variables que influyen en la formación de las cárcavas se dividen en dos tipos: antrópicas y físicas; en las antrópicas es importante el sobrepastoreo; el manejo de las actividades agrícolas, en especial en pendientes pronunciadas, el manejo de los terrenos cultivados y la deforestación (Pathak *et al.*, 2005).

Poesen *et al.* (2003), menciona que la erosión en cárcavas es función de las propiedades del suelo (físico-químicas), su distribución en el espacio (Bull *et al.*, 1997), el uso y manejo del terreno, el clima y la topografía. Bocco (1991), menciona que en el desarrollo de las cárcavas influyen la topografía, tamaño y forma de la cuenca, intensidad y cantidad de lluvia, y el grado y longitud de la pendiente. Para Poesen *et al.* (2003) y Valcárcel *et al.* (2003), su ocurrencia y evolución está condicionada por la geología, clima, suelo, hidrología, uso de suelo, vegetación y manejo.

4.1.1. Variable antrópicas

El tipo de vegetación, estacionalidad, densidad, edad y estado físico son variables que controlan o disparan la erosión en cárcavas. Las modificaciones de la red de drenaje, el cambio de uso de suelo y de la cubierta vegetal para incremento de frontera agrícola, ligadas a eventos extremos de lluvia, son señaladas como las causantes de formación de cárcavas (Nyssen *et al.*, 2002).

En áreas con pastoreo, la capacidad de carga es básica para el inicio o progreso de los procesos erosivos (Nyssen *et al.*, 2004). El sobrepastoreo, deteriora los ecosistemas, reduce la vegetación y deja terrenos expuestos a la acción erosiva. El pisoteo del ganado, compacta el suelo, lo que reduce el agua infiltrada (Pathak *et al.*, 2005).

Por otra parte, cuando se construyen vialidades y no se consideran los sistemas de desagüe, el exceso de escorrentía produce problemas de cárcavas en los terrenos aledaños.

4.1.2. Variables físicas

Precipitación

Lal (1992), menciona que la alta intensidad de la lluvia y baja cobertura del suelo son condiciones idóneas para generar grandes volúmenes de escorrentía, producir flujo concentrado y formar cárcavas.

Los factores climáticos se relacionan con los agentes erosivos (precipitación y viento). Poesen y Hooke (1997) señalan que la intensidad y magnitud de los eventos se asocian a la erosión y surgimiento de cárcavas.

Geomorfología

Según Meijerink (1988) y Verstappen y Van Zuidam (1991) la geomorfología se relaciona con los procesos de erosión, transporte y deposición del suelo; lo cual ayuda a caracterizar el relieve y predecir como las deformaciones del terreno impactan la erosión. Varios autores han usado elementos morfométricos como forma, aspecto y longitud de la pendiente para explicar la génesis de suelos e identificar áreas con riesgo de erosión (Meijerink, 1988; Kreznor *et al.*, 1989; Zinck y Valenzuela, 1990; Nizeyimana y Bicki, 1992; Stolt *et al.*, 1993 y van Ghelue *et al.*, 1990). Según Pathak *et al.* (2005) el tamaño y forma de un área de drenaje, la longitud y grado de la pendiente son variables que influyen en la velocidad de la escorrentía y la erosión. Patton *et al.* (1975) mencionan que el desarrollo de una cárcava es un umbral topográfico, a mayor pendiente más velocidad del agua y mayor la posibilidad de formar cárcavas.

De acuerdo con lo antes mencionado las variables que influyen en la formación de cárcavas, son:

- Material parental: determina la génesis del suelo, profundidad, fases físicas y propensión a la erosión.
- Pendiente del terreno: representa el cambio de altitud entre dos puntos en relación con la distancia que los separa, se expresa en grados o porcentaje
- Longitud de la pendiente: corresponde a la proyección horizontal en una ladera, entre mayor sea su magnitud mayor la erosión.

-
- Orientación o aspecto del terreno: se refiere a la dirección horizontal con respecto al sol. Esta variable es determinante en el clima y la cobertura vegetal.
 - Curvatura del terreno: representa la tasa de cambio de la pendiente en el espacio e indica la concavidad o convexidad de un terreno. La curvatura plana u horizontal es perpendicular a la máxima pendiente y depende de la pendiente y del aspecto.
 - Índice topográfico de humedad: define los sitios donde hay acumulación de agua se relaciona con la generación de escorrentía.
 - Índice topográfico de humedad: define los sitios donde hay una tendencia topográfica a acumular agua y es función directa del área de aporte. Esta se relaciona con la humedad del suelo y refleja la tendencia de este a generar escorrentía.
 - Índice de posición topográfica o índice topográfico compuesto: clasifica con base en variables morfológicas las geoformas de un lugar según su posición relativa en el paisaje (Moore *et al.*, 1991).

Suelos

Las propiedades físicas del suelo juegan un papel importante en crear y desarrollar cárcavas. Entre las variables más usadas, para determinar la fragilidad de un suelo a erosionarse, están la erodabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante. Ambas están determinadas por la textura del suelo y la permeabilidad (Poesen *et al.*, 1999). Los vertisoles son suelos susceptibles de formar cárcavas por su propiedad de formar grietas (Pathak *et al.*, 2005).

La cubierta vegetal

Un terreno con cubierta vegetal favorece la infiltración y aumenta la resistencia al escurrimiento. Por otro lado, en suelos con escasa cubierta vegetal su superficie está expuesta a la acción erosiva de la lluvia y al arrastre de partículas, cuando se presenta la concentración de escurrimientos, lo que favorece la formación de cárcavas (Pathak *et al.*, 2005). Para cuantificar la densidad de la cobertura vegetal se usan sensores remotos e índices de vegetación. Estos índices se basan en los valores de reflectancia en las zonas espectrales del rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR). Entre los más usados están

el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

4.2. Procesos de aparición de cárcavas

El flujo concentrado es un factor importante en la formación de cárcavas (Knapen *et al.*, 2007), aparecen cuando el esfuerzo cortante del flujo supera la resistencia de las partículas de suelo (Gómez *et al.*, 2011). La fuerza que se ejerce sobre la superficie del suelo se representa por el esfuerzo cortante del flujo (Lyle y Smerdon, 1965) y por potencial de la corriente (Bagnold, 1977; Knapen *et al.*, 2007).

Las cárcavas pueden ser resultado del flujo del agua en túneles, los cuales son estructuras tubulares que al desgastarse se colapsan y se genera un escalón que, tras la acción del flujo superficial, se convierte en la cabecera de estas (Jones, 1981).

La pérdida de suelo representan una dinámica de cambio en cortos tiempos creándose la necesidad de probar metodologías rápidas, precisas y de bajos costos para la evaluación de esta, los sensores remotos y sistemas de información geografía (SIG) son herramientas que contribuyen a cumplir estos requisitos (Buendía-Rodríguez *et al.*, 2008).

4.3. Uso de los sensores remotos y SIG

Los sensores remotos son una herramienta de bajo costo para coleccionar datos de uso, cobertura, densidad de drenaje y para evaluar el proceso erosivo y sus consecuencias en las zonas afectadas (Chuvienco, 2002; Bagyaraj *et al.*, 2013). Por otra parte, los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta que facilita el análisis de información ambiental (Martín *et al.*, 1998).

4.4. Enfoques para el estudio de las cárcavas

La clasificación de la erosión en cárcavas se orienta a identificar la morfología y el grado de desarrollo (Ireland *et al.*, 1939; Heede, 1970; Imeson y Kwaad, 1980; Crouch y Blong, 1989). Gómez *et al.* (2011) mencionan que las cárcavas se analizan con base en la morfología de la cabecera de la sección, génesis y morfología, lugar topográfico y estructura de la red de drenaje. Al clasificar cárcavas, el principal objetivo es el avance de las cabeceras (Meyer *et al.*, 1999).

Para analizar la influencia en la génesis de cárcavas, en India, Bagyaraj *et al.* (2011) utilizaron variables morfométricas para caracterizar los accidentes geográficos (topoformas) y parámetros del suelo, como textura, drenaje y erosión. Bagyaraj *et al.* (2013) identificaron zonas de riesgo de erosión potencial con variables de densidad de drenaje y unidades geomorfológicas.

Con base en las relaciones suelo-paisaje y los procesos de erosión por cárcavas y barrancos, González (1998) analizó la importancia de los análisis morfológicos, a escala semidetallada, para el estudio hidrográfico, identificación de áreas afectadas e inventario de suelos en cuencas fluviales. En un estudio cuantitativo de la red de drenaje realizado por Sanjulián y Urdiain (1983) utilizaron análisis morfométricos para jerarquizar la red fluvial. Okereke *et al.* (2012) identificaron, por medio de sensores remotos y técnicas SIG, los patrones de drenaje y la manera en que interactúan con el desarrollo de la erosión en cárcavas en el suroeste de Nigeria. Con imágenes de satélite y sensores remotos Khan (2003) cuantificó las tasas de erosión en banco a lo largo del río Brahmaputra–Jamuna, Bangladesh, India.

Por su parte Abdullah *et al.* (2013), encontraron que la banda 5 de la imagen Landsat ETM-7 es apropiada para identificar los patrones de drenaje, encuentran que las técnicas de teledetección y SIG son herramientas poderosas para identificar estructuras geológicas, aunado a la capacidad para realizar superposiciones para determinar relaciones espaciales de diferentes factores que intervienen en áreas con fallas geológicas. Abdullah (2013) realizó un estudio en Yemen en el que utiliza sensores

remotos para detectar las características estructurales, como fallas; el aporte es útil, ya que permite identificar las áreas afectadas por erosión en cárcavas.

Camargo *et al.* (2014), en la microcuenca La Machirí, para los periodos 1952, 1976 y 2010, con apoyo de los SIG y software fotogramétrico digital (SFD) evaluaron la dinámica de los volúmenes de suelo desplazados. Concluyen que resulta inevitable usar el delineado manual para interpretar las imágenes de satélite. Dada complejidad para elaborar una cartografía de cárcavas, Mararakanye y Le Roux (2012) produjeron, a través de imágenes SPOT 5, un mapa de barrancos y cárcavas mediante interpretación visual y vectorización.

Con análisis de imágenes orientado a objetos, Wang *et al.* (2014), desarrollaron una metodología para cuantificar el volumen de erosión en cárcavas en China. Shruthi *et al.* (2011) plantearon algo similar al utilizar imágenes de alta resolución espectral, combinadas con la topografía y el rango espectral de las imágenes. Asimismo, usando imágenes Lidar, Höfle *et al.* (2013) realizó en Perú un estudio para delinear automáticamente cárcavas y describir su geomorfometría.

4.5. Técnicas de análisis para la identificación de cárcavas

4.5.1. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio (o combinación lineal ponderada) en SIG, través de capas temáticas, permite conocer la influencia de las variables sobre un tema geográfico de interés. Este análisis determina la interdependencia a partir de una mezcla lineal de probabilidades ponderadas para cada cobertura temática según su aptitud, lo que permite la toma de decisiones rápida (Bagyaraj *et al.*, 2013). Los análisis multicriterio son útiles para seleccionar las variables con mayor influencia en la formación de cárcavas.

4.5.2. Análisis multivariado

El análisis multivariado permite relacionar la estructura y forma del relieve con la dinámica espacial-temporal de la erosión, para ello es necesario caracterizar las variables morfométricas con el uso de SIG y sensores remotos.

En la estadística multivariada, el análisis de componentes principales (ACP) es la técnica de mayor uso (Abdi *et al.*, 2010); Inicialmente el ACP se aplicó en la medicina, con el paso del tiempo se introdujo en las ciencias sociales y en las últimas décadas en las ciencias ambientales. En esta última, se usa para identificar variables que influyen en los procesos ambientales y pueden generar riesgos a la humanidad.

En el ACP las variables son representadas de manera vectorial a fin de convertir un grupo de variables, correlacionadas entre sí, en variables sintéticas sin correlación. El propósito de los análisis de componentes principales es reducir al máximo el número de variables del fenómeno a representar (Jolliffe, 2002). En el nuevo sistema de variables no hay información repetida y las variables no están correlacionadas entre sí, es decir, los nuevos componentes son linealmente ortogonales (independientes), las varianzas y covarianzas se comportan diagonalmente y las varianzas decrecen progresivamente (Ferrero *et al.*, 2002).

La mayor varianza, corresponde al primer componente principal. . Del conjunto de variables, seguido del cálculo de valores propios, se elabora la matriz de covarianzas. El error en ACP no siempre es cero y puede presentarse el caso, dependiendo de la aplicación, que las varianzas bajas tengan alta relevancia predictiva (Sewell, 2007).

En la siguiente Figura 2 se ilustra el concepto para dos variables, con el uso de la distribución de los valores. En (a) se observa la distribución en el espacio de X_1 , X_2 y sus medias. La dispersión de las varianzas de los puntos, alrededor de la media ($\mu_1 - \mu_2$), indica la correlación y calidad de la información. En este caso, se busca que las variables no estén correlacionadas, (b) el nuevo conjunto de coordenadas se obtiene rotando el eje alrededor de las medias ($\mu_1 - \mu_2$), esto es, se resta a las variables originales la media ($X_1' = X_1 - \mu_1$ y $X_2' = X_2 - \mu_2$). El nuevo eje resultante, asociado a la máxima varianza, se le denomina PC1 "Primer Componente Principal", el segundo componente principal debe ser ortogonal al primero.

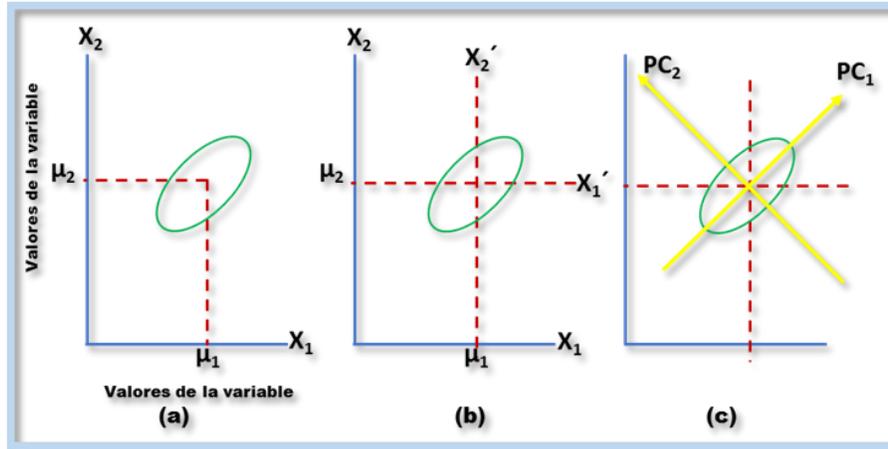


Figura 2. Concepto de Componentes principales para 2CP¹

La selección del número de componentes principales se realiza con el gráfico de sedimentación, el cual incluye, en el eje de las X, el número de CP y en Y los valores propios (eigenvalores) de cada componente. De este modo, la elección de CP se basa en observar los cambios de pendiente del gráfico, hasta que la línea de tendencia comience a estabilizarse, sin embargo, esto depende de la cantidad de información que esté dispuesto el investigador a eliminar.

4.5.3. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es una técnica usada en investigaciones ambientales para agrupar información (clústeres) proveniente de diversas fuentes; por ejemplo, de estudios de usos de suelo y vegetación, sitios con riesgo a deslizamientos, áreas con problemas de erosión, determinación de potencial de recarga de acuíferos, entre otros.

La clasificación supervisada de variables, consiste en categorizar estadísticamente los datos de campo según las clases observadas en el área de estudio. El método parte de definir las categorías, observar la distribución de los sitios de muestreo y verificar los resultados (Chuvienco, 1990). La aplicación de este método requiere que el clasificador tenga conocimiento del área de trabajo para definir los polígonos de entrenamiento y que

¹ <http://docencia.med.uchile.cl/smg/pdf/PCA%20ingenieros.pdf>

sus valores estadísticos (media, rango, varianza, desviación estándar, covarianza, etc.) sean representativos.

Con base en la revisión bibliográfica se observa que las variables responsables en la formación de cárcavas se dividen, de acuerdo con su origen, en antrópicas, geológicas, hidrológicas, topográficas, geomorfológicas y de cobertura vegetal. Teniendo en cuenta esta división, la disponibilidad y escalas de la información y la correlación entre las diversas variables, en este trabajo se incluyó la densidad de población (antrópica); distancia a fallas y a picos (geológicas); Índice topográfico de humedad (hidrológica); pendiente, curvatura vertical, curvatura horizontal, longitud de la pendiente (topográficas); índice de posición topográfica (geomorfológica); y NDVI (cobertura vegetal). Se aplicó el ACP para reducir la información redundante, estimar por el método de máxima verosimilitud (en forma supervisada) la probabilidad de presencia de cárcavas y validar su existencia a través de fotografías aéreas.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Caracterización biofísica

5.1.1. Ubicación geográfica del área de estudio

El área de estudio, tiene una superficie de 6167.5 km², se ubica al noroeste del estado de Oaxaca y cubre el 39.3% de la Mixteca Oaxaqueña. Esta región es conocida, a nivel mundial, por su importancia biológica y cultural. Políticamente se encuentra en los distritos Oaxaqueños de Coixtlahuaca (24.28%), Juxtlahuaca (5.93%), Nochixtlán (20.29%), Teposcolula (19.53%) y Tlaxiaco (29.97%), específicamente entre las coordenadas geográficas 16° 55' 32.46" y 18° 7' 2.74" de latitud norte y 97° 58' 13.35" y 97° 01' 7.42" de longitud oeste (Figura 3).

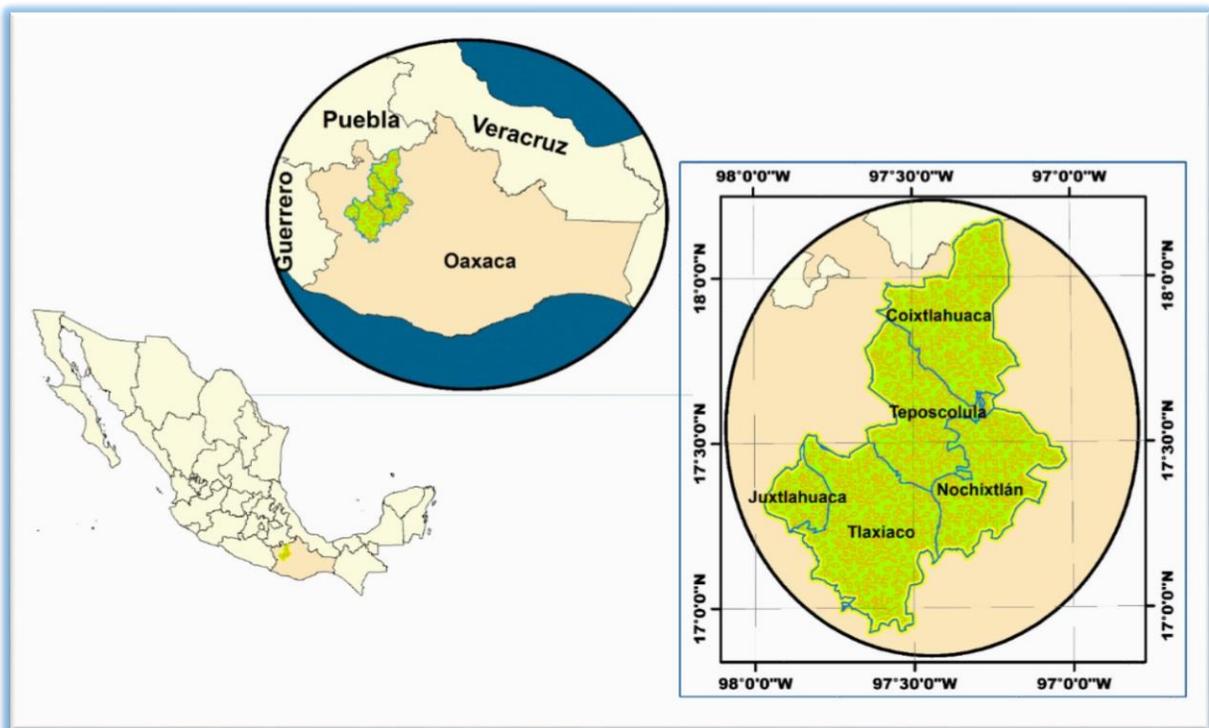


Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio.

5.1.2. Clima

Factores como latitud, longitud, altitud, relieve, proximidad al mar, corrientes marinas y vegetación son condicionantes del clima e influyen en la distribución espacio-temporal de las temperaturas y precipitaciones de un determinado lugar. Existen varias metodologías para clasificar el clima, sin embargo, en México la más aplicada es la de Köppen, modificada por Enriqueta García, basada en temperatura media mensual y precipitación mensual de un periodo mínimo de 30 años.

La cartografía de unidades climáticas de INEGI (2008), con base en la clasificación de Köppen modificado por Enriqueta García (2004) y escala 1:1 000 000, reporta que en la zona de estudio se presentan tres grupos climáticos, secos, templados y cálidos (Cuadro 1 y Figura 4).

Cuadro 1. Tipos de climas del área de estudio.

Grupo	Clave	Área (km ²)	Área (%)
Cálido	A(C)w ₀ (w)	397.57	6.45
	A(C)w ₂ (w)	147.08	2.38
	Aw ₀ (w)	0.23	0
Seco	BS ₀ (h')(w)(w)	48.45	0.79
	BS ₀ hw(w)	9.85	0.16
	BS ₁ h'(h)w(w)	69.7	1.13
	BS ₁ hw(w)	277.91	4.51
	BS ₁ kw(w)	645.96	10.47
Templado	C(E)(w ₂)(w)	34	0.55
	C(w ₀)(w)	1,460.05	23.67
	C(w ₁)(w)	1,321.1	21.42
	C(w ₂)(w)	1,755.56	28.46
Total general		6,167.46	100

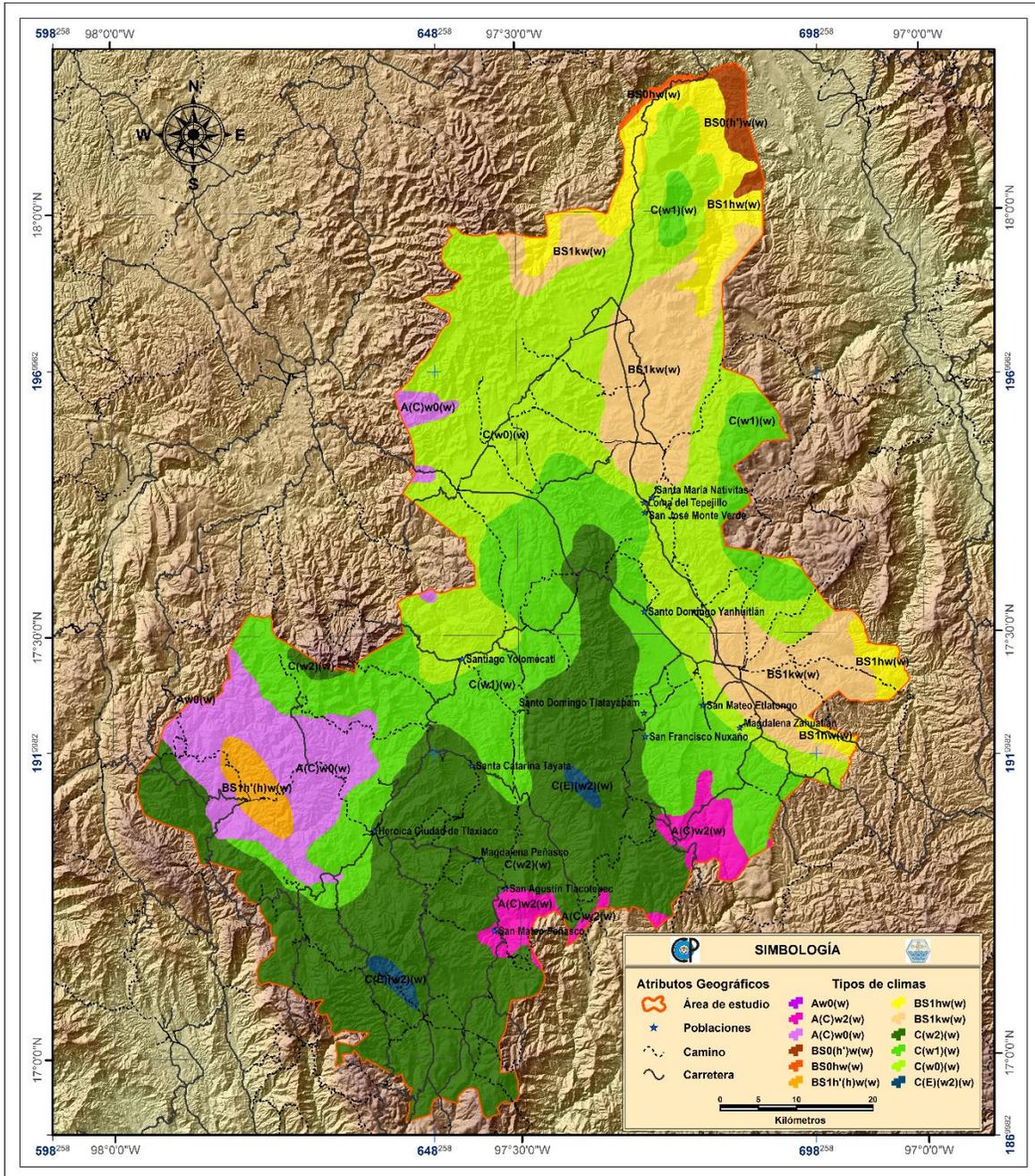


Figura 4. Tipos de climas en la Mixteca Oaxaqueña (INEGI, 2008).

5.1.2.1. Grupo climático Cálido

$Aw_0(w)$: Cálido el menos húmedo de los subhúmedos con régimen de lluvias en verano, cociente de precipitación entre temperatura² menor o igual a $43.2 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$ y un porcentaje de lluvia invernal menor a cinco. La temperatura media anual es mayor de 22°C y la del mes más frío es mayo de 18°C .

$Aw_1(w)$: Cálido subhúmedo con lluvias en verano, con un porcentaje de precipitación invernal menor a cinco, cociente de precipitación entre temperatura mayor a 43.2 y menor a $55.32 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$. La temperatura media anual es mayor de 22°C y la del mes más frío es mayo de 18°C .

5.1.2.2. Grupo climático semicálido del grupo de los cálidos

$A(C)w_0(w)$: Semicálido del grupo de los cálidos el menos húmedo de los subhúmedo con lluvias en verano. Cociente de precipitación entre temperatura menor que $43.2 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$, y un porcentaje de lluvia invernal menor a cinco. La temperatura media anual esta entre 18°C y 22°C , la temperatura del mes más frío es superior a 18°C .

$A(C)w_2(w)$: Semicálido del grupo de los cálidos el más húmedo de los subhúmedo con lluvias en verano. Cociente de precipitación entre temperatura mayor que $55.0 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$, y un porcentaje de lluvia invernal de menor a cinco. La temperatura media anual esta entre 18°C y 22°C , la temperatura del mes más frío es superior a 18°C .

² Cociente (P/T) o índice de Lang (1915), es un índice de aridez que está en función de la precipitación anual y la temperatura media anual. Es un indicador de la evaporación y grado de humedad de un lugar. Valores de 0-20 corresponde a desiertos, 20-40 a zonas áridas, 40-60 a estepas y sabanas húmedas, 60-100 a bosques claros húmedos, 100-160 a grandes bosques húmedos, y >160 a zonas muy húmedas.

5.1.2.3. Grupo climático seco

Del clima seco se presentan cinco subtipos, definidas por la variación de la precipitación y temperatura durante el año, $BS_0(h')w(w)$, $BS_0hw(w)$, $BS_1h'(h)w(w)$, $BS_1hw(w)$ y $BS_1kw(w)$.

$BS_0(h')w(w)$: Árido cálido con lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal menor de 5, cociente de precipitación entre temperatura menor o igual que $22.9 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$. La temperatura anual es mayor de 22°C y la del mes más frío superior a 18°C .

$BS_0hw(w)$: Árido semicálido con lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal menor a cinco, cociente de precipitación entre temperatura menor o igual que $22.9 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$. La temperatura media anual esta sobre 18°C y la del mes más frío es menor a 18°C .

$BS_1h'(h)w(w)$: Semiárido, semicálido, con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor a cinco, cociente de precipitación entre temperatura mayor que 22.9 . La temperatura media anual varía entre 18°C y 22°C y la del mes más frío es superior a 18°C .

$BS_1kw(w)$: Semiárido, templado con verano cálido, lluvias en verano, con porcentaje de precipitación invernal menor a cinco, cociente de precipitación entre temperatura mayor que $22.9 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$. La temperatura media anual fluctúa entre 12°C y 18°C , la del mes más frío entre -3°C y 18°C , la del mes más cálido menor a 22°C .

5.1.2.4. Grupo climático Templados

$C(w_0)(w)$: Templado el más seco de los subhúmedos, régimen de lluvias en verano, cociente de precipitación entre temperatura menor a $43.2 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$ y un porcentaje de lluvia invernal de menor a cinco. La temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C .

C(w₁)(w): Templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, cociente de precipitación entre temperatura entre a 43.2 y 55.0 mm°C⁻¹, y un porcentaje de lluvia invernal de menor a cinco. La temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C.

C(w₂)(w): Templado el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano, cociente de precipitación entre temperatura mayor de 55.0 mm°C⁻¹ y un porcentaje de lluvia invernal de menor a cinco. La temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C.

5.1.2.5. *Grupo climático Templado Semifrío*

C(E)(w₂)(w): Templado semifrío el más húmedo de subhúmedo con lluvias en verano, un porcentaje de precipitación invernal menor a cinco, temperatura media del mes más frío entre -3 y 18° C y la media anual entre 5 y 12°C.

5.1.3. Suelos

El suelo es un recurso natural indispensable para el desarrollo de los seres vivos y su formación requiere la interacción de cinco elementos: material parental, topografía, clima, tiempo y organismos. Las condiciones de formación proporcionan sus propiedades y la base para su agrupación, de acuerdo a un sistema de clasificación específico.

La metodología propuesta por FAO-UNESCO (1970) y modificada por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) en 1970, fue la metodología adoptada en la serie I del INEGI (2004) para clasificar suelos en México, la serie II adopta el Sistema de Clasificación de Suelos WRB2000. El INEGI (2006) para el área de estudio (Cuadro 2 y Figura 5) reporta ocho grupos de suelos, el leptosoles (38.18 %), luvisoles (25.13%), phaeozem (15.60%), regosoles (11.31%), vertisoles (5.44%), cambisoles (3.66%), gleysoles (0.42%), fluvisoles (0.11%) y el 0.15% es área urbana.

Cuadro 2. Tipos de suelos.

Clave	Descripción	Área (km²)	Área (%)
CMca	Cambisol calcárico	74.32	1.2
CMeu	Cambisol éutrico	60.2	0.98
CMhu	Cambisol húmico	91.53	1.48
FLca	Fluvisol calcárico	0.32	0.01
FL	Fluvisol	6.3	0.1
GLstn	Gleysol endostógnico	25.74	0.42
LPca	Leptosol calcárico	477.14	7.74
LPeu	Leptosol éutrico	219.48	3.56
LP	Leptosol	1,658.11	26.88
LVcc	Luvisol cálcico	59.39	0.96
LVcr	Luvisol crómico	520.75	8.44
LVhu	Luvisol húmico	144.44	2.34
LV	Luvisol	89.32	1.45
LVpf	Luvisol profódico	564.26	9.15
LVro	Luvisol ródico	172.14	2.79
PHca	Phaeozem calcárico	194.88	3.16
PHcr	Phaeozem crómico	0.37	0.01
PHhu	Phaeozem húmico	99.99	1.62
PHlv	Phaeozem lúvico	255.9	4.15
PH	Phaeozem	410.68	6.66
RGar	Regosol arénico	131.12	2.13
RGca	Regosol calcárico	392.11	6.36
RGeu	Regosol éutrico	118.67	1.92
RG	Regosol	55.85	0.9
VRmz	Vertisol mázico	213.77	3.47
VR	Vertisol	121.43	1.97
ZU	Zona urbana	9.25	0.15
Total general		6,167.46	100.00

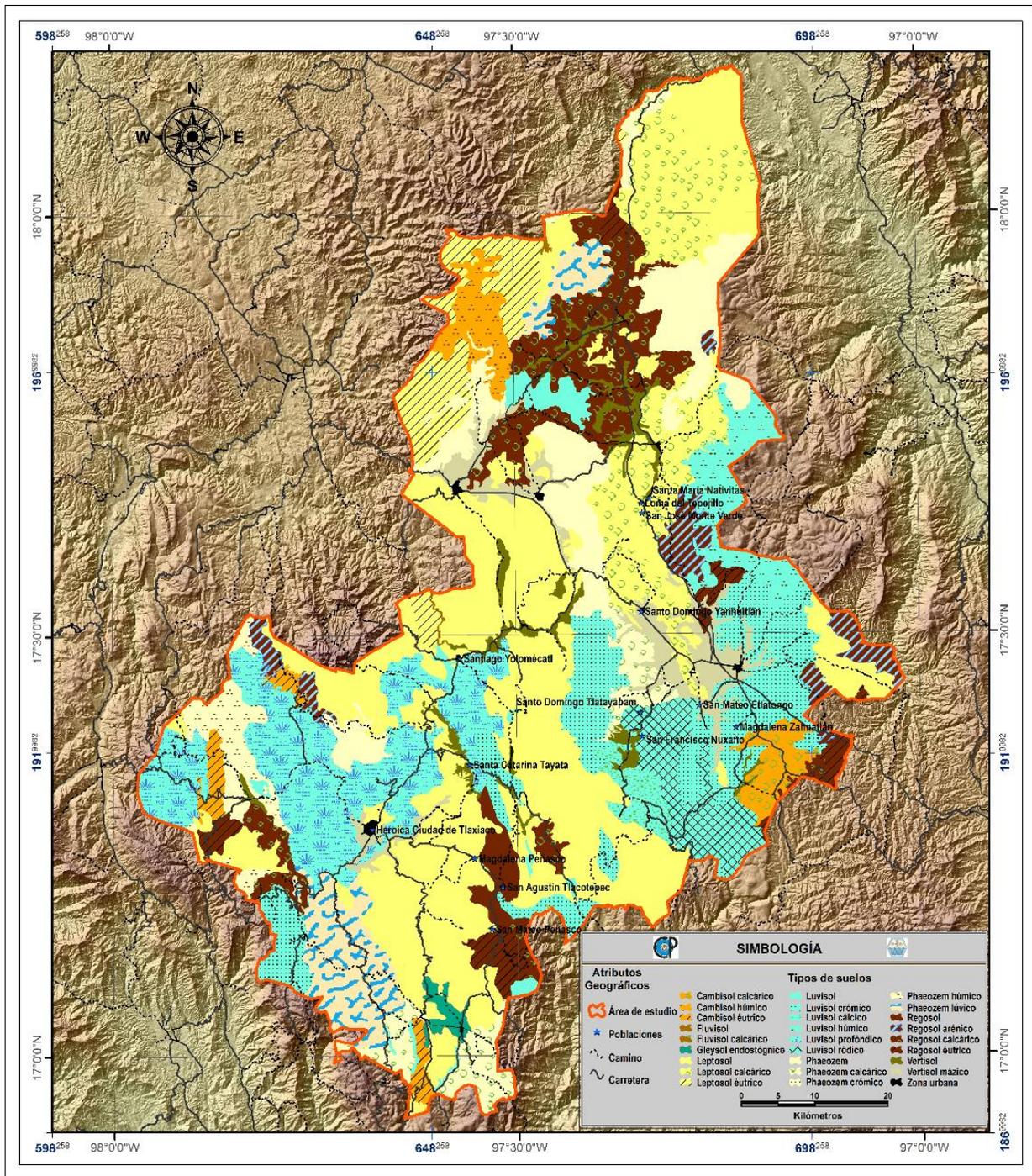


Figura 5. Tipos de suelos en el área de estudio (INEGI, 2006).

5.1.3.1. Descripción de los tipos de suelos

a) Cambisol

Son suelos jóvenes con poca evolución, en la mayoría de los casos la posición topográfica ha impedido su desarrollo, con una capa superficial obscura mayor a 25 cm, y el perfil presenta una capa donde se acumula arcilla. Es evidente la transformación del material parental, por la decoloración parduzca y la formación estructural, pueden tener pequeñas acumulaciones de arcillas, carbonatos de calcio, manganeso, potasio y sodio. Los suelos sobre roca ácida generan un perfil ligeramente ácido (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2006).

Cambisol Cálcico o calcárico: presenta una capa con espesor mayor a 15 cm, con más del 15% de carbonatos de calcio secundarios y concentraciones pequeñas (menor a 15%) y pulverulentas de carbonatos en los primeros 25 cm del perfil.

Cambisol éútrico: tiene una saturación de bases, calcio, magnesio, potasio y sodio, mayor o igual al 50% entre los 20 y 100 cm de la superficie del suelo o entre 20 cm partiendo de roca continua o una capa endurecida.

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

b) Fluvisoles

El fluvisol es un suelo joven formado con materiales acarreados por el agua. Son suelos muy pocos desarrollados, medianamente profundos y estructura débil o suelta. Se encuentra en los lechos de los ríos y presenta capas perturbadas de arena con piedra o gravas redondeadas por el efecto del acarreo del agua (IUSS, 2007).

Fluvisol calcárico: presenta enriquecimiento por carbonatos secundarios, menor al 15%, en una parte de los primeros 50 cm de profundidad del perfil.

c) Gleysol

Son suelos que están inundados la mayor parte del año a aproximadamente 50 cm de profundidad, constituido por materiales no consolidados, sedimentos fluviales y lacustres, se ubican en zonas bajas.

d) Leptosoles

Tiene profundidades menores a 25 cm, se encuentran en áreas montañosas teniendo como limitantes las elevadas pendientes y la facilidad a erosionarse lo que impide su formación.

Leptosol calcárico: Es calcáreo de la superficie hasta los 20 a 50 cm.

Leptosol éutrico: Son suelos jóvenes que no presentan ninguna característica especial en el perfil.

e) Luvisol

Los luvisol son suelos de zonas templadas o tropicales lluviosas, aunque se encuentran en climas más secos, cubiertos con vegetaciones de bosque o selva. Se caracteriza por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo y por sus colores rojos, amarillentos y pardos. Se ubican en zonas planas o suavemente inclinadas, son fértiles y apropiados para usos agrícolas; pero en lugares con pendientes fuertes presentan alto riesgo a la erosión. La limitante de este suelo es su alto contenido de limo ya que, al labrarse mojados, con maquinaria pesada, son susceptibles a destrucción de su estructura. (IUSS, 2007).

Luvisol cálcico: suelos con capa de color blanco, rico en carbonatos en forma de polvo blanco o caliche.

Luvisol crómico: Su color en húmedo es rojizo oscuro y pardo (7.5YR).

Luvisol húmico: La capa superficial es oscura y rica en materia orgánica.

Luvisol profúndico: En el horizonte árgico la distribución de arcilla es tal que su contenido no disminuye en más del 20 % del máximo, de forma relativa, dentro de los primeros 150 cm.

Luvisol ródico: El horizonte B es de color más fuerte que 5YR en su mayor parte, excluye horizontes de transición.

f) Phaeozem

Son suelos pardos, que se presentan en cualquier tipo de relieve excluyendo a sitios con climas tropicales o muy áridos. Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes (Ca, Mg, K, Na). La profundidad de estos es variable, los más profundos se ubican en lugares planos, los menos profundos en laderas o pendiente teniendo como limitante la roca o la segmentación de suelo para la producción agrícola (IUSS, 2007).

Phaeozem calcárico: presenta enriquecimiento secundario de carbonatos, menor al 15%, entre 20 y 50 cm de la superficie.

Phaeozem crómico: el horizonte B tiene es en su mayor parte de color rojo con un matiz 7.5YR.

Phaeozem húmico: Tiene una capa superficial oscura rica en materia orgánica.

Phaeozem lúvico: con un subsuelo más rico en arcilla que la capa superficial.

g) Regosol

Los regosol son suelos ubicados en diferentes tipos de climas, vegetación y relieve. Son suelos jóvenes, con capas poco diferenciables entre sí y muy someros. Son el resultado de depósitos recientes de roca y arenas acarreadas por el agua. Son de colores claros, pobres en materia orgánica y con parecido a la roca madre. Su fertilidad es variable y condicionada por la profundidad y pedregosidad (IUSS, 2007).

Regosol arénico: Con una textura arenosa-franca fina o más gruesa en la totalidad de los primeros 50 cm.

Regosol calcárico: tienen enriquecimiento secundario de carbonatos calcio, menor al 15 %, en al menos alguna parte de los primeros 50 cm de profundidad.

Regosol éutrico: rico o muy rico en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na) en los primeros 50 cm de profundidad.

h) Vertisol

Los vertisol se localizan en climas templados y cálidos, con marcada estación seca y lluviosa; en vegetaciones de selvas bajas, pastizales y matorrales; y en depresiones, áreas llanas u onduladas. Se caracterizan por una estructura masiva con alto contenido de arcilla, característica que provoca la expansión en húmedo formando superficies de deslizamiento nombradas facetas, en seco tienen a colapsarse por la formación de grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo. Los colores van de negro a grises, los hay de color café rojizo (IUSS, 2007).

Vertisol mázico: Presenta una estructura masiva con una consistencia dura o muy dura en los 20 cm superiores del suelo.

5.1.4. Fisiografía

De acuerdo con INEGI (2001), el área de estudio se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del sur, dentro de las subprovincias Mixteca Alta (68.53% de la superficie), Sierras Centrales de Oaxaca (27.64%) y un 3.83% de la Cordillera central del sur (Cuadro 3). En la Figura 6 se observa la distribución geográfica de las subprovincias; las sierras centrales se ubican principalmente al noreste, este y en una pequeña porción al noroeste; la cordillera costera del sur se observa principalmente al suroeste del área de estudio.

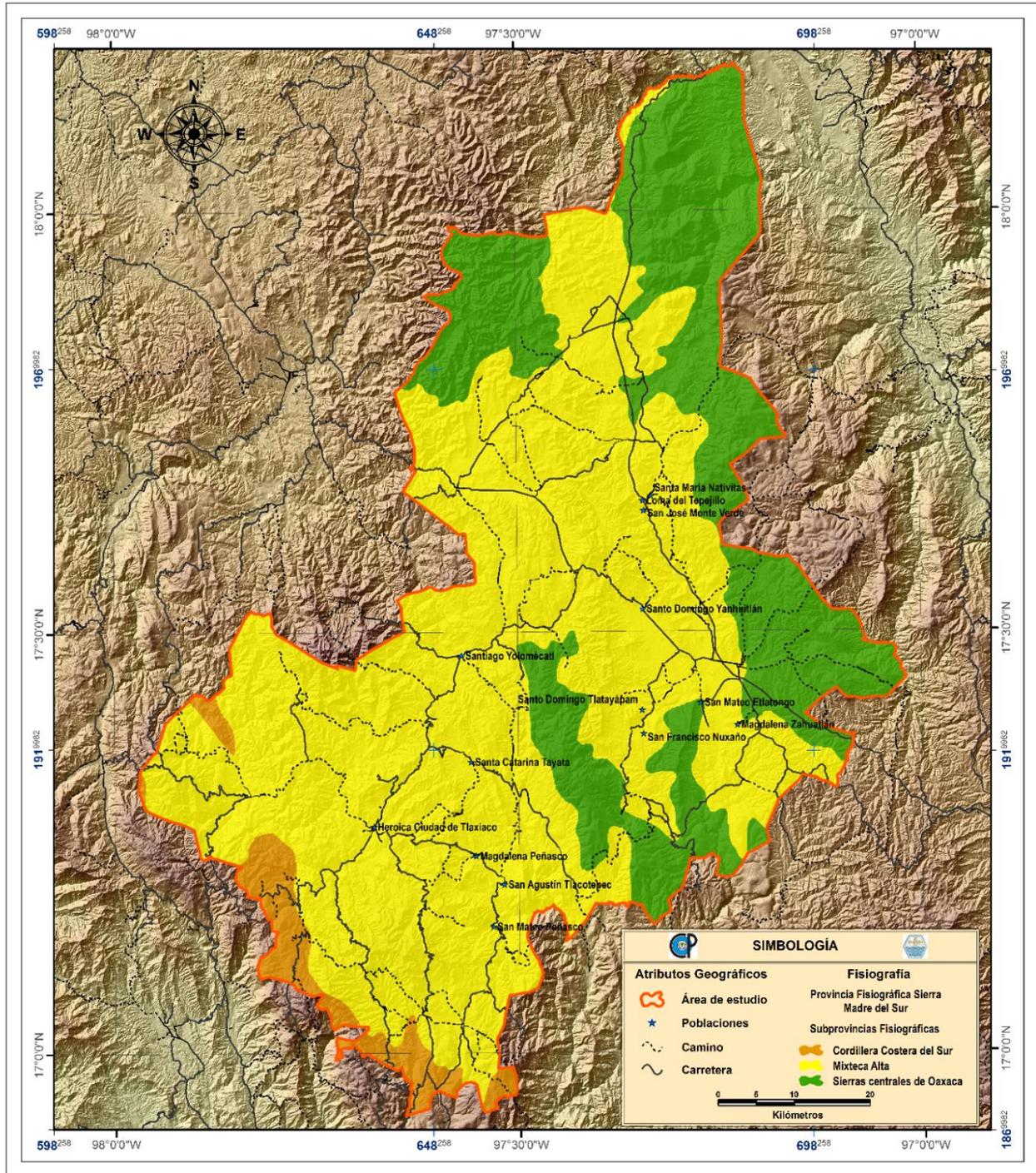


Figura 6. Fisiografía del área de estudio (INEGI, 2004).

5.1.4.1. *Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur*

Esta provincia se ubica de noreste a sureste, paralela y próxima a la costa del pacífico. Sus elevaciones son muy constantes, superiores a 2000 m, y sus corrientes escurren al océano Pacífico; sobresaliendo los ríos Balsas, Verde y Tehuantepec.

Esta provincia presenta una marcada complejidad geológica y su material geológico va de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. El origen de este sistema fisiográfico es producto del choque de las placas tectónicas de cocos con la de Norteamérica, generando el levantamiento de la sierra y su gran complejidad geológica.

Cuadro 3. Provincias fisiográficas.

Descripción	Área (km ²)	Área (%)
Cordillera Costera del Sur	236.50	3.83
Sierras Centrales de Oaxaca	1,704.71	27.64
Mixteca Alta	4,226.25	68.53
Total general	6,167.46	100.00

5.1.4.2. *Subprovincia Cordillera Costera del Sur*

Esta subprovincia la constituyen una serie de sierras que pasan por las costas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Se ubica sobre la subducción de la placa de cocos, lo que le confiere una geología compleja; con la presencia de calizas al oeste, ígneas intrusivas al norte, ígneas extrusivas e intrusivas al oriente y una importante cantidad de metamórficas al este. Entre la sierra se encuentran valles angostos, laderas escarpadas y algunas mesetas con aluvión antiguo. Los afluentes sobresalientes, en la porción oaxaqueña, son: el río Mixteco, al norte; el río verde (con tributarios como el Atoyac, Cuanana, río Grande y Atoyaquillo), al centro-sur; y el Colotepec, al sureste (INEGI, 2004).

5.1.4.3. *Subprovincia Mixteca Alta*

Las ciudades de Huajuapán de León, Tamazulápam del Progreso y Tlaxiaco se ubican en esta subprovincia. En el centro de esta subprovincia se ubica el complejo sierra baja, formado de calizas del cretácico. En la parte norte el paisaje lo componen mesetas, lomeríos (con aluviones antiguos) y pequeños valles. En la parte este se extiende el valle de Santo Domingo Yanhuatlán; compuesto de materiales arcillosos, de origen lacustre del terciario inferior, y afectado una erosión hídrica severa atribuida a procesos geológicos y mal manejo antropogénico (INEGI, 2004).

5.1.4.4. *Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca*

Esta subprovincia forma parte de los distritos de Huajuapán, Coixtlahuaca, Teotitlán, Cuicatlán, Teposcolula, Nochixtlán, ETLA, Zaachila, Zimatlán y pequeñas porciones de Tlaxiaco y Ejutla. En la parte norte y oeste, de la subprovincia, dominan las rocas sedimentarias del Cretácico y en la sur las rocas metamórficas del Precámbrico. En las inmediaciones de Nochixtlán, el paisaje se compone de sierras con cumbres tendidas y sierras bajas con cañadas complejas (INEGI, 2004).

5.1.5. Hidrología

En México, la Comisión Nacional del Agua ha delimitado el territorio nacional en 731 cuenca hidrológicas, agrupa en 37 regiones hidrológicas (RH) y en 13 regiones hidrológico Administrativo (RHA). Para el área de estudio (Figura 7 y Cuadro 4), el 37.72% se ubica en la región hidrológica Balsas (RH18), el 38.28% en la Costa Chica de Guerrero (RH20) y el 29% en la Región Papaloapan (RH28).

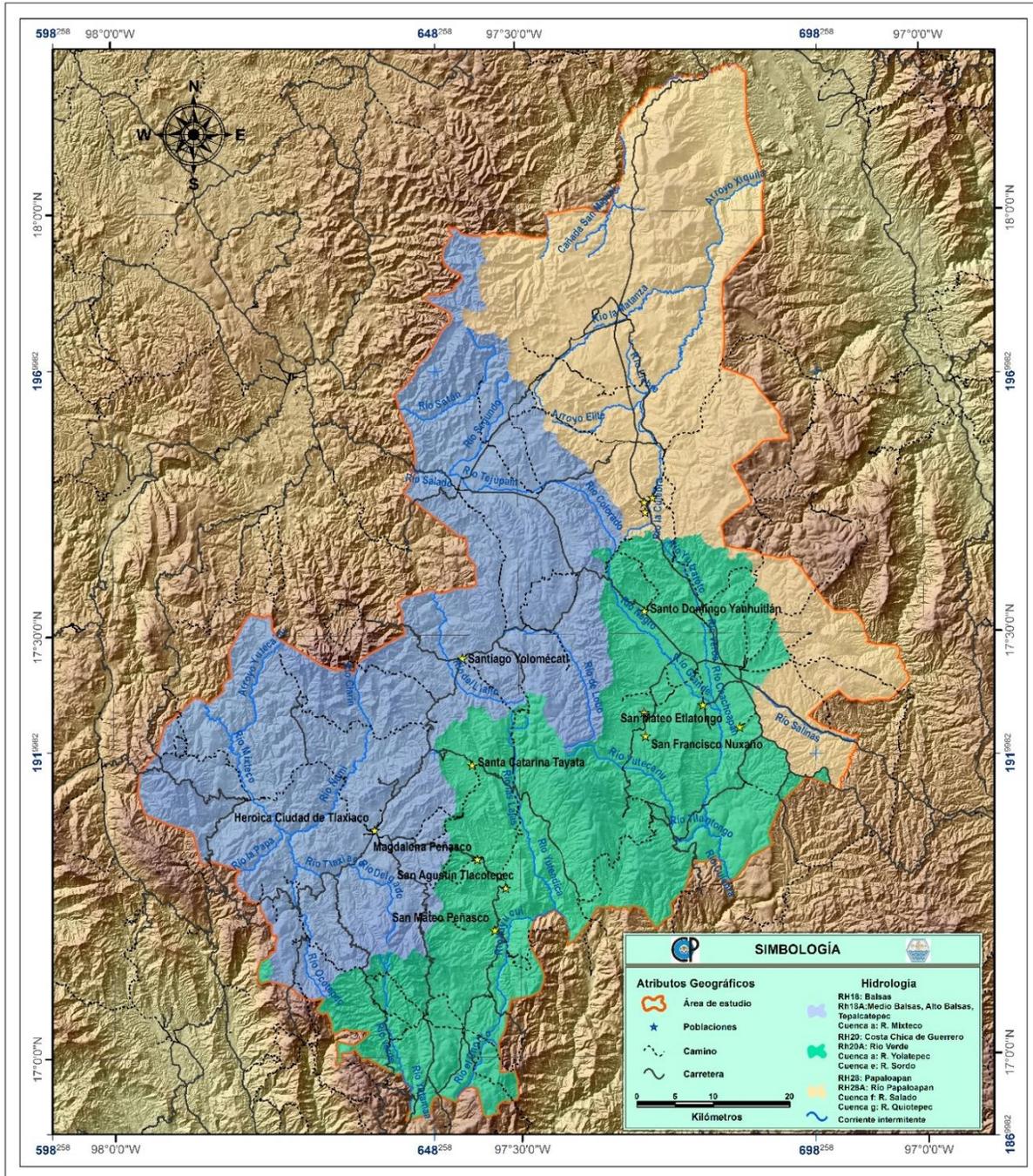


Figura 7. Hidrología del área de estudio (INEGI, 2010).

5.1.5.1. Regiones y cuencas hidrológicas

La RH18, Balsas, se conforma de cuencas cerradas y abiertas que drenan al océano Pacífico y se conforma por las subregiones, bajo Balsas, medio Balsas y alto Balsas (Cuadro 4). En esta última subregión se encuentra la zona de estudio, específicamente en la subcuenca del Río Mixteco con una superficie de 2387.74 km² del área de trabajo. La región se caracteriza por la presencia de lluvias estacionales (de mayo a octubre), pendientes fuertes, problemas de deforestación y precipitaciones torrenciales; lo cual propicia grandes avenidas, erosión severa y arrastre de grandes cantidades de sedimentos (CONAGUA. 2011).

La RH28, Papaloapan, cuyo río del mismo nombre, nace en la Mixteca Alta Oaxaqueña y recorre, antes de desembocar en el Golfo de México, los estados de Oaxaca y Veracruz. El área de estudio cubre 1788.73 km² de esta región hidrológica.

La RH20, Costa Chica de Guerrero, abarca 1990.99 km² del área estudio. Dentro de la subregión Río Verde, que desemboca en el Océano Pacífico, la mayoría de las corrientes fluviales son estacionales, a excepción del Río verde. La región hidrológica se caracteriza por la presencia de ciclones tropicales y un régimen de lluvia estacional. Estos eventos meteorológicos extremos al encontrar terrenos desprovistos de vegetación y pendientes pronunciadas generan importantes problemas de erosión hídrica.

Cuadro 4. Regiones hidrológicas en el área de estudio.

Región	Subregiones	Área (km ²)	Área (%)
Balsas	Alto Balsas, Bajo Balsas	2,387.74	38.72
Papaloapan	Río Papaloapan	1,788.73	29.00
Costa Chica de Guerrero	Río Verde	1,990.99	32.28
Total general		6,167.46	100.00

5.1.6. Geología

5.1.6.1. Tipos de rocas

De acuerdo con la cartografía de Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2000; SGM, 2001), en el Cuadro 5 y Figura 8, las rocas más antiguas en la zona son del Precámbrico y cubren el 4.3% de la superficie. Durante el Paleozoico se originaron litologías de conglomerados poligénicos de lutita-areniscas, areniscas-lutitas y caliza-lutitas, que cubren el 0.6% del área de estudio.

Cuadro 5. Geología del área de estudio.

Era	Periodo	Edad	Litología	Roca	Formación	Área (km ²)	
Cenoicoico	Cuaternario Terciario	Holoceno	0.011-0.020	Aluvial	Sedimentaria	No aplicable	403.74
				Toba andesítica- Andesita	Sedimentaria		1074.30
		Eoceno – Oligoceno	23-55.8	Toba andesítica- Arenisca Conglomerado	Híbrida	Huajuapán	7.25
Mesoicoico	Cretácico	Paleoceno – Eoceno	33.9-65.5	poligénico- Arenisca	Sedimentaria	Tamazulapán	2,449.58
		Albiano – Cenomaniano	93.5-112	Caliza	Sedimentaria	Miahuatepec	122.67
	Jurásico			Caliza-Dolomía		Teposcolula	910.59
		Turoniano - Maastrichtiano	65.5-93.5	Caliza-Lutita	Sedimentaria	Yucunama	1.88
				Marga-Limolita		Tilaltongo	106.41
		Neocomiano – Aptiano	99.6-146	Caliza-Lutita	Sedimentaria	Tlaxiaco	345.53
		Berriasiano Jurásico superior	125-130 146-161	Lutita-Caliza Caliza-Lutita	Sedimentaria Sedimentaria	Zapotitlán Chimeco- Sabinal	27.04 268.89
Jurásico medio	161-176	Arenisca-Lutita Arenisca-Toba andesítica	Sedimentaria Híbrida	Tecocoyunca Tecomzáchil	134.36 4.74		
Paleozoico- Mesoicoico	Pérmico- Triásico	Pérmico – Triásico	200-299	Conglomerado poligénico	Sedimentaria	Yododeñe	1.29
Paleozoico	Carbonífero- Pérmico	Carbonífero- Pérmico	251-359	Lutita-Arenisca		Ixcaltepec	13.09
				Arenisca-Lutita	Sedimentaria	Matzitzí	21.34
Precámbrico- Paleozoico	Cámbrico- Ordovícico- Proterozoico- Devónico	Cámbrico- Ordovícico- Proterozoico- Devónico	444-542 359-542	Caliza-Lutita	Sedimentaria	Tiñú	2.09
				Metasedimentario Complejo	metamórfica	Complejo Acatlán Complejo	208.01
Precámbrico	Proterozoico	Proterozoico medio	1200-1400	metamórfico	metamórfica	Oaxaqueño	54.59
No aplicable	No aplicable	No aplicable		No aplicable	No aplicable	No aplicable	10.08
Total general						6,167.46	

El 31.2% de la superficie bajo estudio corresponde al mesozoico, con materiales como caliza, calizas con dolomía, calizas-lutitas, marga-limolita, lutita-caliza, arenisca-lutita, arenisca y toba andesítica. Las primeras calizas, con una edad entre 93.5 a 112 millones de años, son las más recientes y corresponden al periodo cretácico.

Durante el periodo reciente (era cenozoica), se formó el 63.8% de la litología del área de estudio, resultando materiales producto de erupciones volcánicas y arrastres aluviales proveniente de toba andesítica-andesita, toba andesítica-arenisca y conglomerados poligénico-arenisca. Dichos conglomerados se componen de materiales gruesos que se han acumulado en las partes bajas producto de la erosión de las partes más altas.

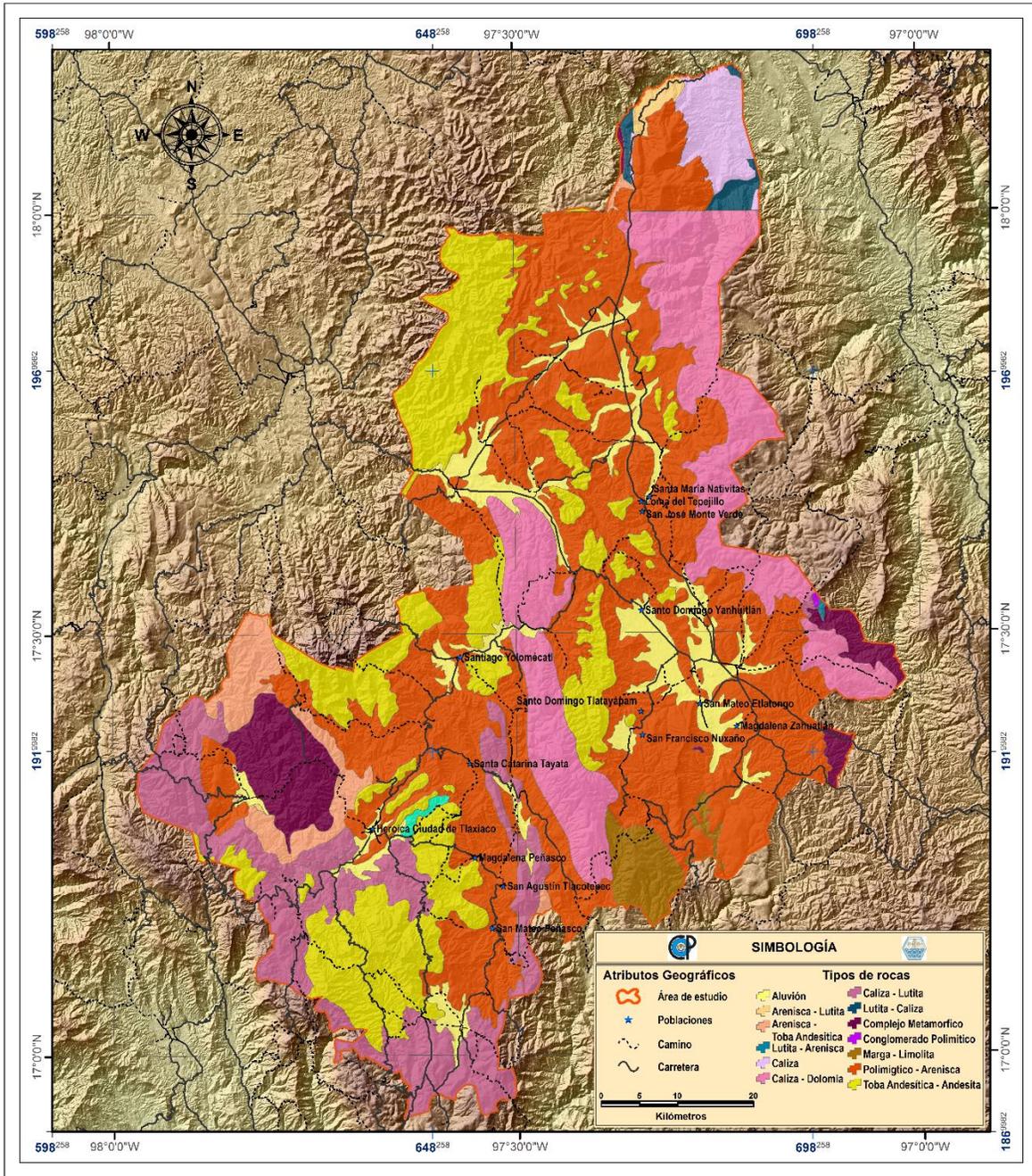


Figura 8. Geología del área de estudio (SGM, 2000; SGM 2001).

5.1.6.2. *Estratigrafía regional*

En el área de estudio, y sus cercanías, se presentan las siguientes formaciones estratigráficas: Tiñú, Tecomazuchitl, Matzitz, Ixtaltepec, Yododeñe, Tecocoyunca, Chimeco-Sabinal, Zapotitlán, Tlaxiaco, Tilaltongo, Yucunama, Teposcolula, Tamazulapam y Huajuapam (Figura 10).

La formación Tiñú es una secuencia de calizas, lutitas, limolitas y areniscas, que afloran al sureste de Nochixtlán, en el poblado de Santa María Tiñú y en la región de Santiago Ixtaltepec al noreste de Nochixtlán (Pantoja-Alor, 1970). La litología en el área de estudio es caliza-lutita con una edad de 445 a 542 millones de años de la era Paleozoica entre los periodos Cámbrico-Ordovícico.

La formación Tecomazuchitl se formó durante el Jurásico medio, es una secuencia continental nombrada lechos rojos, integrada por intercalaciones de arenisca, lutitas y conglomerados que cubren de forma discontinua las rocas metamórficas del terreno Mixteco, afloran en las cercanías de Texacalapa, Puebla en el río Tecomazúchil (Pérez-Ibargüengoitia *et al.*, 1965).

La formación Matzitz se localiza cerca del poblado de Xochiltepec, al sureste de Tehuacán Puebla, la cual es descrita como roca con una importante cantidad de plantas del jurásico, está formada por areniscas de color crema de grano medio a grueso, por estratos o paquetes de estratos de lutita, dolomita carbonosa, arenisca conglomerática y conglomerado, en menor cantidad existen capas de carbón. Por la presencia de restos fósiles de plantas se asume que esto ocurrieron en un ambiente sedimentario pantanoso costero (Silva, 1970). Las areniscas del área de estudio tienen una edad de 251-359 millones de años, perteneciente en la era paleozoica durante el periodo Carbonífero-Pérmico.

La formación Ixtaltepec aflora a aproximadamente a 16 km al noreste de Asunción Nochixtlán y a 500 m al norte del poblado de Santiago. Es formación presenta una secuencia de rocas clásicas marinas integrada por lutitas limolitas y areniscas, con intercalaciones de calizas (Pantoja-Alor, 1970), de la era paleozoica, edad Carbonífero-Pérmico, misisípicas, pensilvánicas.

La Formación Yododeñe se compone de una secuencia de conglomerados gruesos intercalados con areniscas y limolitas del Carbonífero temprano-tardío o del Pérmico medio, que afloran sobre el arroyo Yododeñe. La litología está integrada por rocas metamórficas y sedimentarias, conglomerado poligénicos, lutitas y arenisca de color rojo (Pantoja-Alor, 1970).

La formación Tecocoyunca está constituida por una secuencia de estratos, cuya parte inferior es de origen continental, la parte intermedia se presentan intercalaciones marinas y en la parte superior se observan estratos marinos. La litología se conforma por areniscas, limolitas y lutitas. En la parte superior son lutitas de color gris con abundante yeso secundario. Este grupo descansa sobre el conglomerado Cualac (Erben, 1956) del jurásico medio.

La formación Chimeco-Sabinal, está integrada por rocas calizas, lutita, limolita, y del Jurásico superior (López-Ticha, 1985). La formación Chimeco se formó en un ambiente lacustre, y la Sabinal en un ambiente marino profundo bajo condiciones reductoras.

La formación Zapotitlán corresponde a depósitos de ambiente marino, esto lo evidencia la presencia de horizontes areno-calcáreos. Su litología se integra por lutita, caliza, arenisca verdosa y algunos horizontes conglomeráticos, además de calcáreos alternados con lutita y arenisca (Hernández-Estévez, 1980).

La formación Tlaxiaco aflora en la porción sur y centro de la cuenca de Tlaxiaco. La litología consiste en calizas, areniscas calcáreas, lutitas calcáreas de color negro de la era cenozoica y periodo jurásico Barremiano-Aptiano considerado de origen marino (López-Ticha, 1985).

La formación Tilaltongo, propuesta por Salas en 1949, se compone de rocas calcáreas-arcillosas que afloran en la región de Tilantongo, Oaxaca. Su litología está compuesta por lutitas, arenisca y calizas arcillosas que datan de la era mesozoica del periodo jurásico Turoniano-Maestrichtiano, cuyo ambiente de depósito fue una cuenca marina (Ortega-González y Lambarria-Silva, 1991).

La formación Yucunama, propuesta por Ferrusquía-Villafranca (1976), se compone de calizas margosas de color crema que afloran en San Pedro Yucunama. Estos depósitos, formados en un ambiente de plataforma interna semiprofunda, son de roca calcáreo-arcillosas con aspecto conglomerático e intercalaciones de areniscas y lutitas, cuya edad data del Turoniano-Campaniano e incluso hasta el Maastrichtiano (Ferrusquía-Villafranca, 1976).

La formación Teposcolula, nombrada por Caballero-Miranda (1990), está formada por calizas carbonatadas con intercalaciones de estratos de dolomías y calizas arcillosas (Ortega-González y Lambarria-Silva, 1991). En esta formación se generan estructuras de erosión por disolución llamada lapiaz (erosión en canalillos por disolución de la roca). Se formó durante la era mesozoica, durante el cretácico en la edad del Albiano - Cenomaniano, en un ambiente de facies de plataforma.

La formación Tamazulapam se depositó en un ambiente continental sobre la formación Yanhuitlán y la cuenca formada en un flanco del anticlinal de Teposcolula. Aflora al noroeste del anticlinorio de Teposcolula (Ferrusquía-Villafranca, 1976) como un conglomerado integrado por fracciones de calizas con matriz arenosa de color rojizo. Esta formación tiene una edad que data de la era cenozoica, del periodo terciario del paleoceno – eoceno.

La formación Huajuapán fue nombrada por Salas en 1949 como Capas de Huajuapán debido a las capas interestratificadas de arenisca, cenizas volcánicas, arcillas, arena y capas de conglomerados. Fue en 1956 cuando Erben la denominó formación Huajuapán y la subdividió en tres partes. La primera matriz al norte de Chila de las Flores con calizas calcáreas y al oeste de Huajuapán de León sobre las barrancas de la Estancia. La segunda matriz conformada por depósitos vulcano-sedimentarios hacia Zapotitlán, en Palmas-Hujuapán con conglomerados calcáreos y en su cima con capas de limo-arenosas tobáceas de colores rojos, rosas y verdes. La tercera parte corresponde a una matriz arenosa de color rojizo bien cementada. La edad de esta formación es de la era Cenozoica terciaria del Eoceno – Oligoceno.

5.1.6.3. Falla Tamazulapam.

La estratigrafía del área de estudio es controlada principalmente por la falla de Tamazulapam que la cruza longitudinalmente entre rocas del cretácico y terciario (**¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**). Esta falla se localiza en el extremo oeste del anticlinal Tamazulapam, partiendo del poblado de Tamazulapam, hasta Santa María Yolotepec. Presenta un desarrollo de más de 100 km, rumbo promedio Norte- Sur, una inclinación de 20° hacia el poniente y presenta planos de falla con movimientos normal y lateral derecha (Figura 9). En su porción norte está en contacto con las formaciones Teposcolula y Tamazulapam; donde los depósitos de esta última formación se localizan en la cuenca formada a un lado del anticlinal (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008).

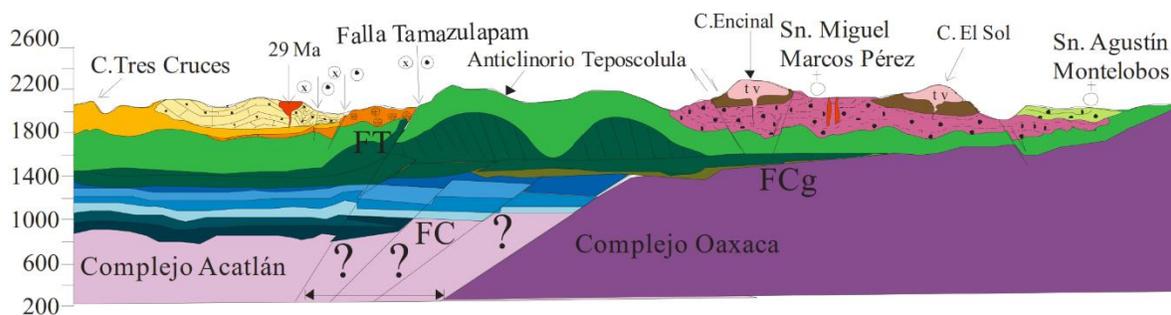


Figura 9. Perfil estratigráfico de la Mixteca Oaxaqueña (Santamaría - Díaz, 2009).

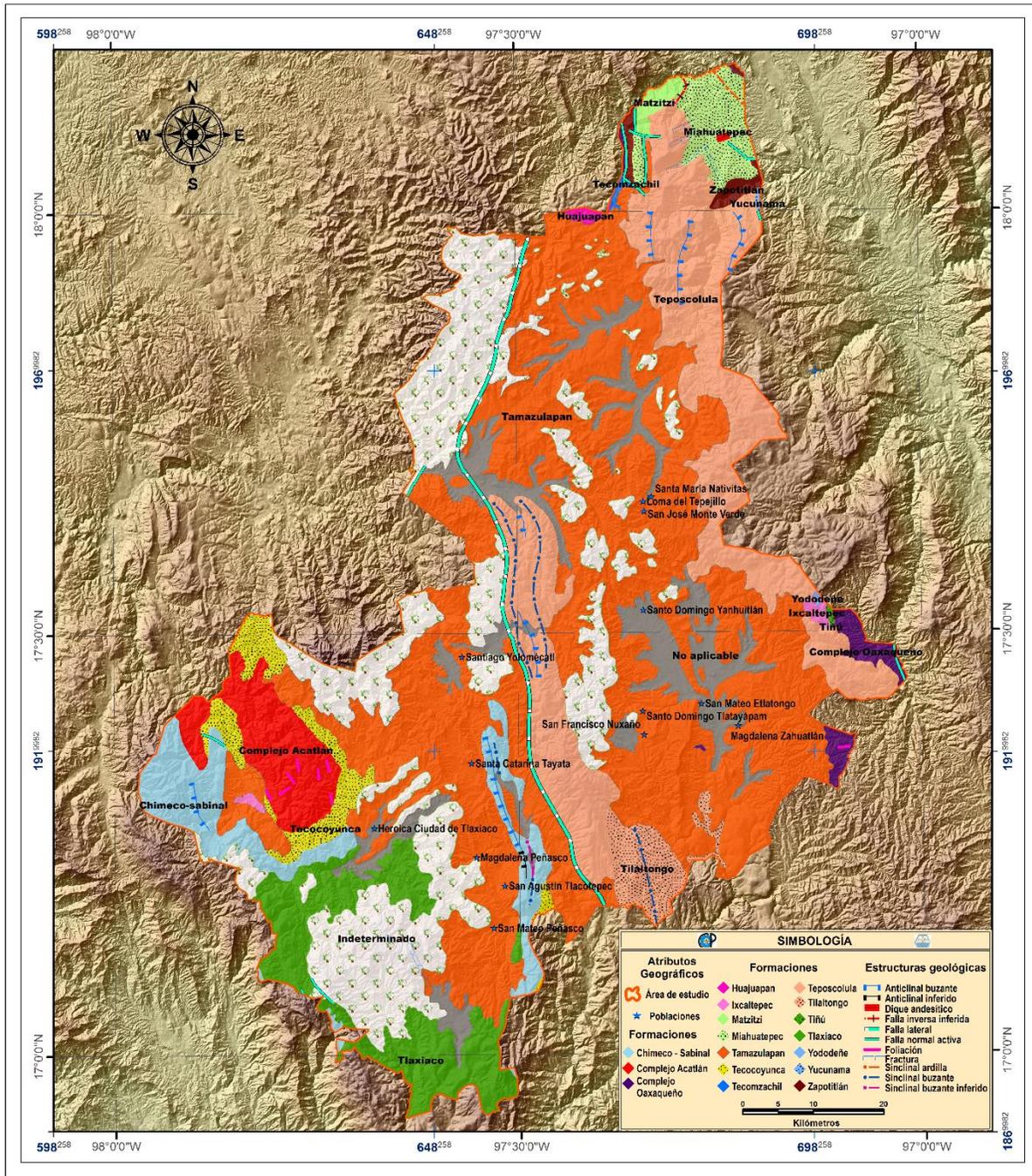


Figura 10. Formaciones y estructuras geológicas del área de estudio (SGM, 2000).

5.1.7. Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con uso de suelo y vegetación, realizado por la WWF (2014), la zona de estudio cuenta con 15 tipos de cubiertas. Los pastizales ocupan el primer lugar (20.99%), con importantes áreas con problema de cárcavas. El segundo lugar corresponde al bosque de encino (19.11%), seguido por bosque de pino–encino (incluyendo encino pino) con 16.60%), agrícola (12.92%), matorral (12.12%), el resto ocupa una proporción menor al 10% (Cuadro 6, Figura 11).

Cuadro 6. Uso de suelo y vegetación.

Uso de suelo y vegetación	Área (km ²)	Área (%)
Área Agrícola	796.55	12.92
Área Impactada por Incendio	0.84	0.01
Área sin Vegetación Aparente	70.52	1.14
Asentamientos Humanos	58.84	0.95
Bosque de coníferas	468.39	7.59
Bosque de encino	1,178.60	19.11
Bosque de Pino-Encino (incluye encino-pino)	1,023.78	16.60
Bosque mesófilo de montaña	4.25	0.07
Chaparral	92.09	1.49
Cuerpos de Agua	5.69	0.09
Matorral	747.27	12.12
Palmar	7.99	0.13
Pastizales	1,294.41	20.99
Plantación Forestal	2.11	0.03
Selva baja caducifolia	416.13	6.75
Total general	6,167.46	100.00

Es importante mencionar que la mayor parte del área afectada por cárcavas está ubicada en porciones de pastizales y matorrales, específicamente en las transiciones con bosque de encino y encino–pino.

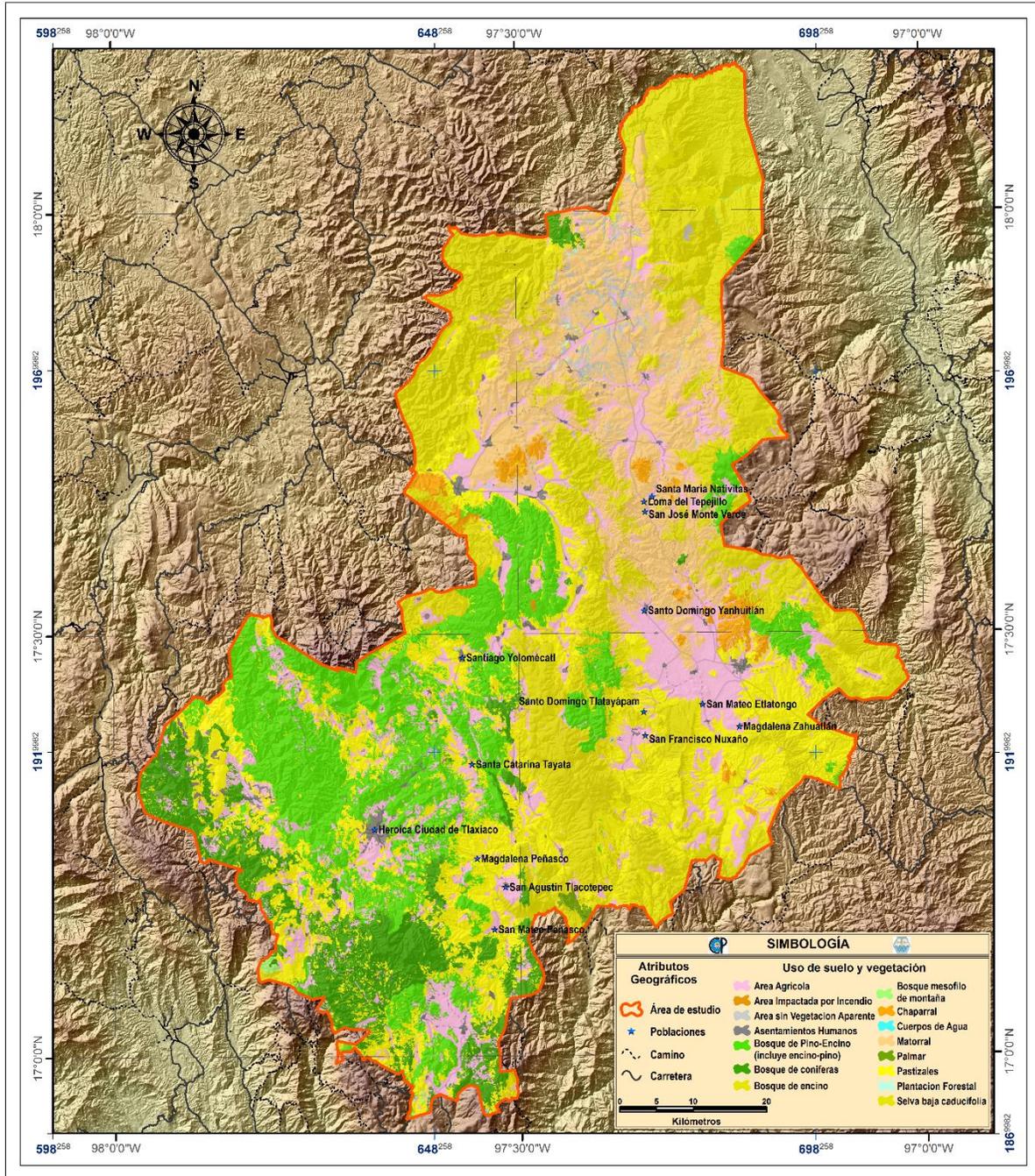


Figura 11. Uso de suelo y vegetación (WWF, 2014).

5.2. Materiales

Para la elaboración de esta investigación se utilizaron los siguientes materiales:

- Modelo de elevación digital, tamaño de pixel 15X15 (INEGI, 2012).
- Capa vectorial de suelos del área de estudio (INEGI, 2006).
- Capa vectorial con distribución regional de climas (INEGI, 2008).
- Capa vectorial de unidades fisiográficas (INEGI, 2001).
- Capa vectorial de uso de suelo y vegetación elaborada por (WWF, 2014).
- Cartas geológico-minera (E14-6, E14-9 y E14-12) del (SGM, 2000; SGM, 2001). Escala 1: 250 000.
- Imágenes multiespectrales Spot 6 Y 7, con una resolución 6X6m, fechas de toma 4/Nov/2015, 16/Feb/2015 y 29/Ene/2015, (CNES, 2015). (CNES, 2015).
- Información climatológica del área de estudio y sus inmediaciones (IMTA, 2009).
- Capa vectorial con localización de las estaciones climatológicas (CONAGUA, 2016).
- Software ArcGis 10 (ESRI, 2010)
- Software QGIS 2.8.1 (OSGeo, 2015)
- Software R-3.2.3 (GNU *General Public License*, 2015)
- Software Google Earth Pro (Gobierno de EE.UU)
- Computadora Gateway, modelo NV59C, procesador Intel® Core™ i5 CPU M480 @2.67GHz, sistema operativo 64bits.

5.3. Métodos

En la Figura 12 se ilustra, se ilustra, de manera general y en forma de diagrama de flujo, la metodología seguida en esta investigación. A continuación, se describen las diferentes etapas que se abordaron.

5.3.1. Recopilación y análisis

Se revisaron artículos científicos, folletos, tesis y otros documentos para integrar el marco teórico, la caracterización biofísica y selección de variables.

Se revisó la información cartográfica existente de las fuentes oficiales como Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Geológico Mexicano (SGM) y World Widllife Fund (WWF), con el fin integrar el sistema de información geográfica del área de estudio.

La información de suelos, en formato shapefile (shp), se obtuvo del INEGI (2006 con las siguientes características: sistema de proyección Cónica Conforme de Lambert, paralelo estándar 1: 17.5, paralelo estándar 2: 29.5, longitud del meridiano central: -102.0, latitud de origen de la proyección: 12, falso oeste: 2, 500 000 y falso norte: 0. La clasificación de suelos reportada se basa en el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2006).

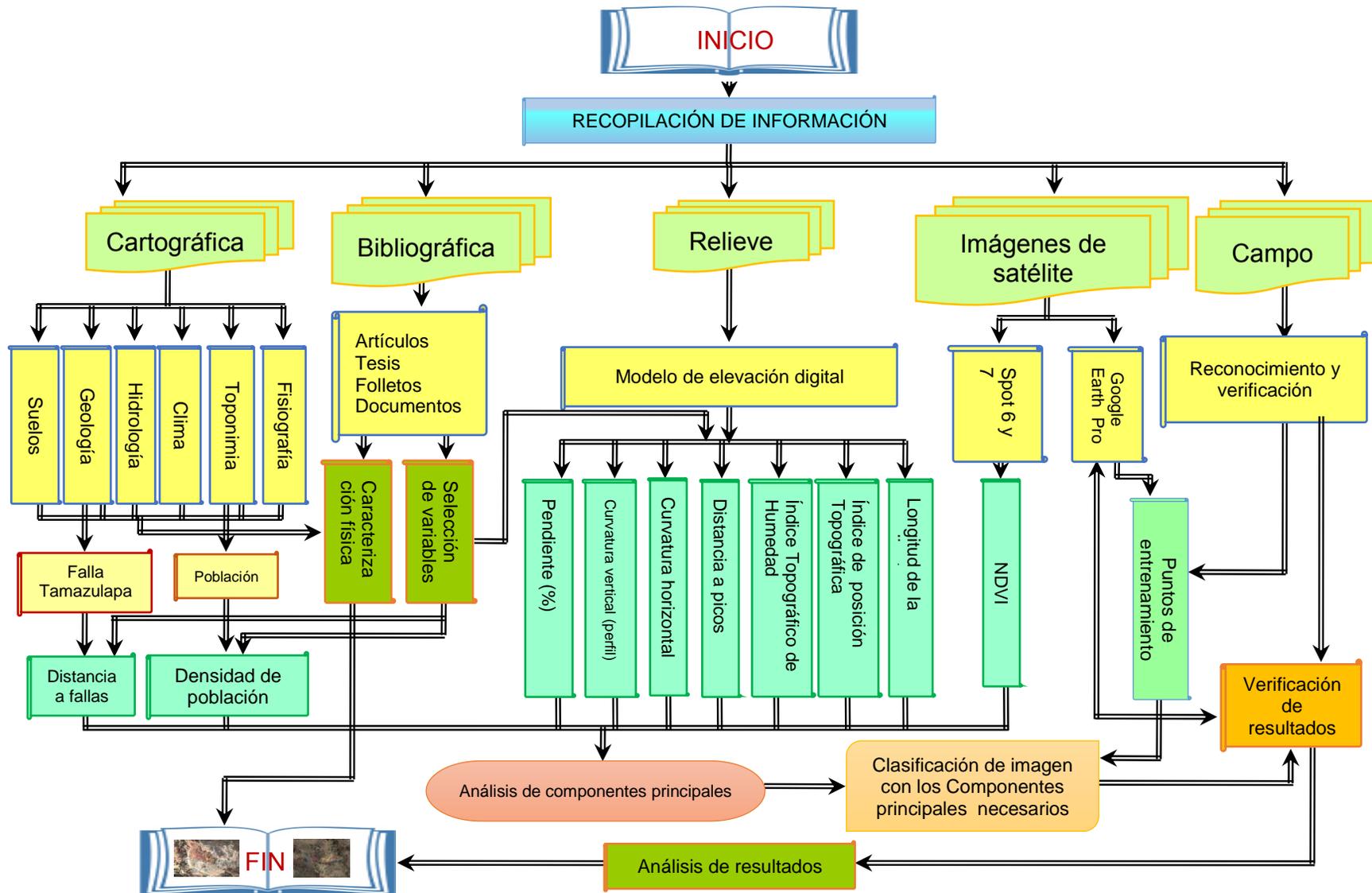


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

Las unidades climáticas se obtuvieron de los datos vectoriales del INEGI (2008) en proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) y formato shapefile. Las unidades de los climas reportadas se basan en la modificación propuesta por Enriqueta García al sistema de clasificación climática Köppen (García, 2004).

La fisiografía, basada en las formas del relieve, origen geológico y litología, se obtuvo de los datos vectoriales del INEGI (2001). Estos vectores se reportan en formato shapefile, sistema de proyección Cónica Conforme de Lambert, datum ITRF 92 y se agrupan por provincias fisiográficas, subprovincias y sistemas de topoformas.

El uso de suelo y vegetación se obtuvo de la capa vectorial de uso de suelo y vegetación realizado por la WWF (2014); elaborada a partir de la clasificación supervisada de imágenes de satélite Spot 5 del año 2010 y resolución de 5 m.

La geología se obtuvo de las cartas Geológico-minero del SGM (2000, 2001). Las cartas consultadas fueron la E14-6 (Orizaba, Veracruz), E14-9 (Oaxaca, Oaxaca) y E14-12 (Zaachila, Oaxaca). Estas cartas se pasaron de formato pdf (*Portable Document Format*) a tif (*Tagged Image File Format*) y la imagen resultante, para su digitalización en formato vectorial (shapefile), se referenció en el sistema de información Qgis.

5.3.2. Recopilación de información de relieve

El modelo de elevación digital de la superficie del terreno se obtuvo de INEGI (2012), con resolución de pixel de 15x15 m y valores de elevación en metros. La referencia geodésica de esta información es: ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80 y coordenadas geográficas. Esta información se transformó al sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) y esferoide WGS84 Zona 14, como se trata d raster³ con datos continuos, este se

³ Raster: Es una matriz de celdas organizadas en filas y columnas en la que cada celda representa un valor, estos pueden ser imágenes de satélite, fotografías aéreas, modelos de elevación digital e incluso mapas escaneados.

remuestreó con el procedimiento de convolución cúbica; el cual utiliza 16 centros, de las celdas más cercanas, para interpolar el valor de salida (Figura 13).

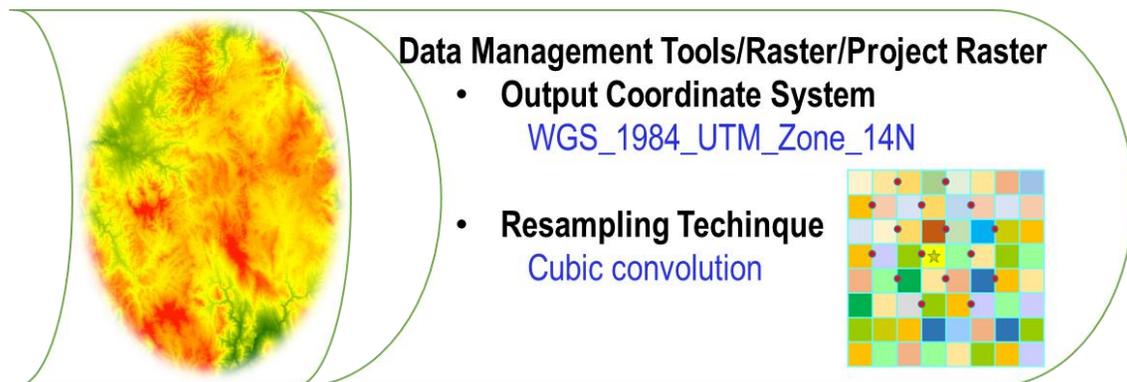


Figura 13. Remuestreo del modelo de elevación.

5.3.3. Recopilación de información satelital

Se usaron las imágenes Google Earth Pro para ubicar polígonos de reconocimiento en campo y generar polígonos, en formato shapefile, de cárcavas.

Al gestor autorizado del Colegio de Postgraduados se le solicitaron 24 imágenes de los satélites SPOT 6 y 7 provenientes de la Estación Receptora del sistema ERMEX, localizada en Santa María Rayón, México. Del total de imágenes solicitadas, 4 corresponden al sensor SPOT 6 y 20 al SPOT 7. Estas imágenes multiespectrales, en formato JP2, tienen una resolución 6 metros y se conforman por cuatro bandas; donde la banda 0 corresponde al espectro azul, la 1 al verde, la 2 al rojo y la 3 al infrarrojo cercano.

Se seleccionaron las imágenes de la estación seca y con las fechas de toma más cercanas. Con estos criterios, se seleccionaron 3 imágenes del Spot 7 (dos del 29 de enero del 2015 y una del 4 de noviembre de 2015) y 3 del Spot 6, con la fecha de toma del 16 de febrero de 2015 (Figura 14).

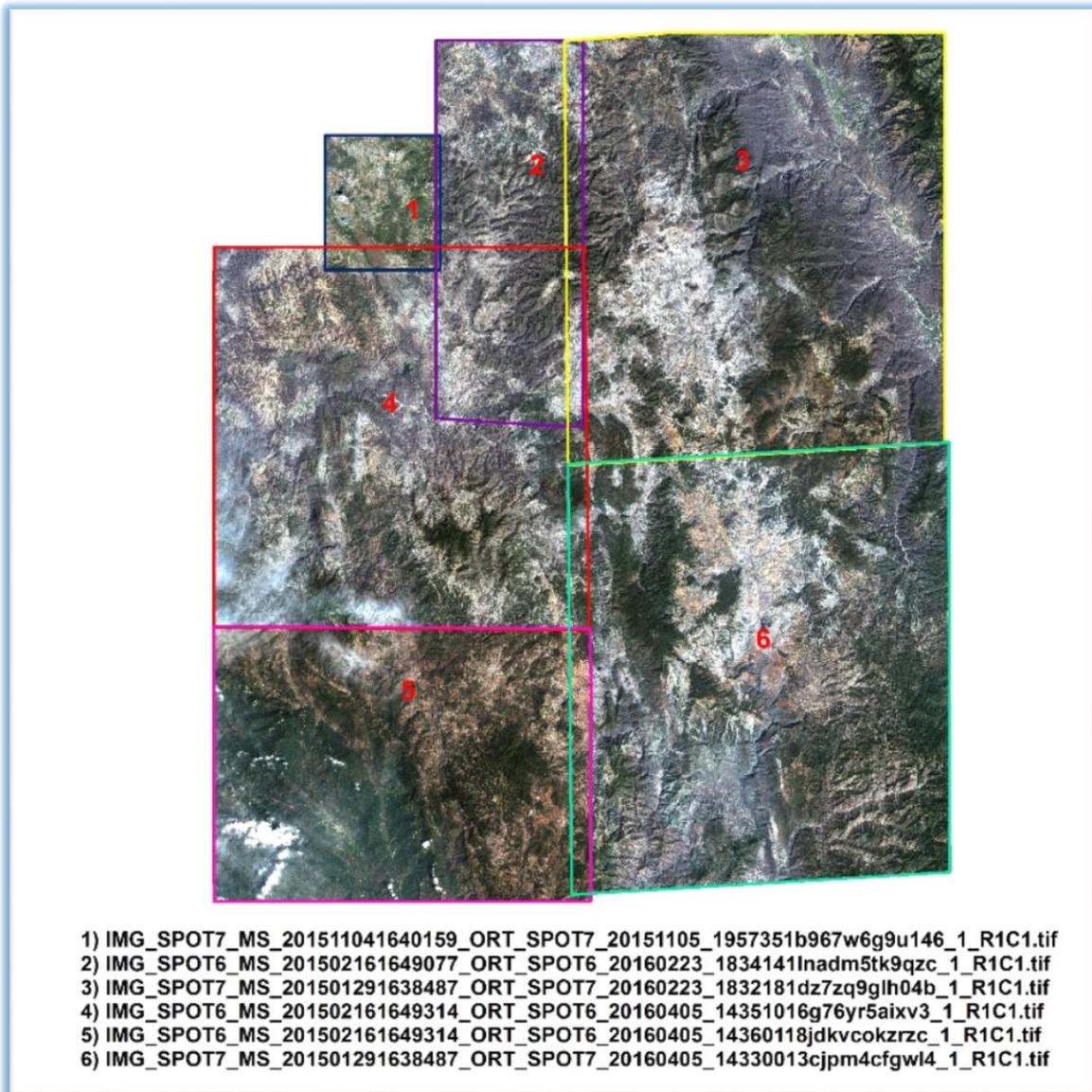


Figura 14. Imágenes Spot usadas.

5.3.4. Recopilación de información de campo

Se realizaron recorridos de campo para el reconocimiento del área de estudio. Con las coordenadas de las cárcavas, identificadas en campo, se ingresó a las imágenes de Google Earth y se capturaron los polígonos con presencia de cárcavas; los cuales se usaron posteriormente para asistir la clasificación supervisada.

En total se visitaron 17 puntos en campo, entre el 8 y 10 de diciembre de 2015, para observar los controles ambientales e identificar el material geológico donde se generan las cárcavas (Figura 15 y Cuadro 7).

Cuadro 7. Ubicación de los sitios visitados en campo.

Sitio	Nombre	Latitud	Longitud
1	Dos Corazones	17°32'28.34"N	97°22'10.32"W
2	Yanhuitlán Parte Alta	17°32'49.73"N	97°19'36.46"W
3	Yanhuitlán	17°31'53.32"N	97°20'10.07"W
4	Santo Domingo Tlatayacapan 1	17°25'7.25"N	97°19'59.58"W
5	Santo Domingo Tlatayacapan 2	17°23'32.45"N	97°20'54.77"W
6	San Francisco Nuxaño	17°21'57.30"N	97°21'7.44"W
7	Desviación Tlaxiaco	17°34'27.52"N	97°25'22.55"W
8	Santa Catarina Tayata	17°21'44.46"N	97°34'53.73"W
9	San Agustín Tlacotepec	17°12'49.15"N	97°30'20.37"W
10	San Mateo Peñasco	17°10'30.70"N	97°32'9.36"W
11	Magdalena Peñasco	17°13'16.75"N	97°32'26.55"W
12	Santiago Yolomecatl	17°27'27.98"N	97°34'29.47"W
13	Magdalena Zahuatlán 1	17°23'59.05"N	97°13'12.59"W
14	Magdalena Zahuatlán 2	17°24'8.27"N	97°12'24.26"W
15	Etlatongo	17°25'56.55"N	97°12'42.76"W
16	San José Monteverde	17°38'24.60"N	97°20'0.09"W
17	San José Monteverde	17°38'50.80"N	97°20'57.94"W

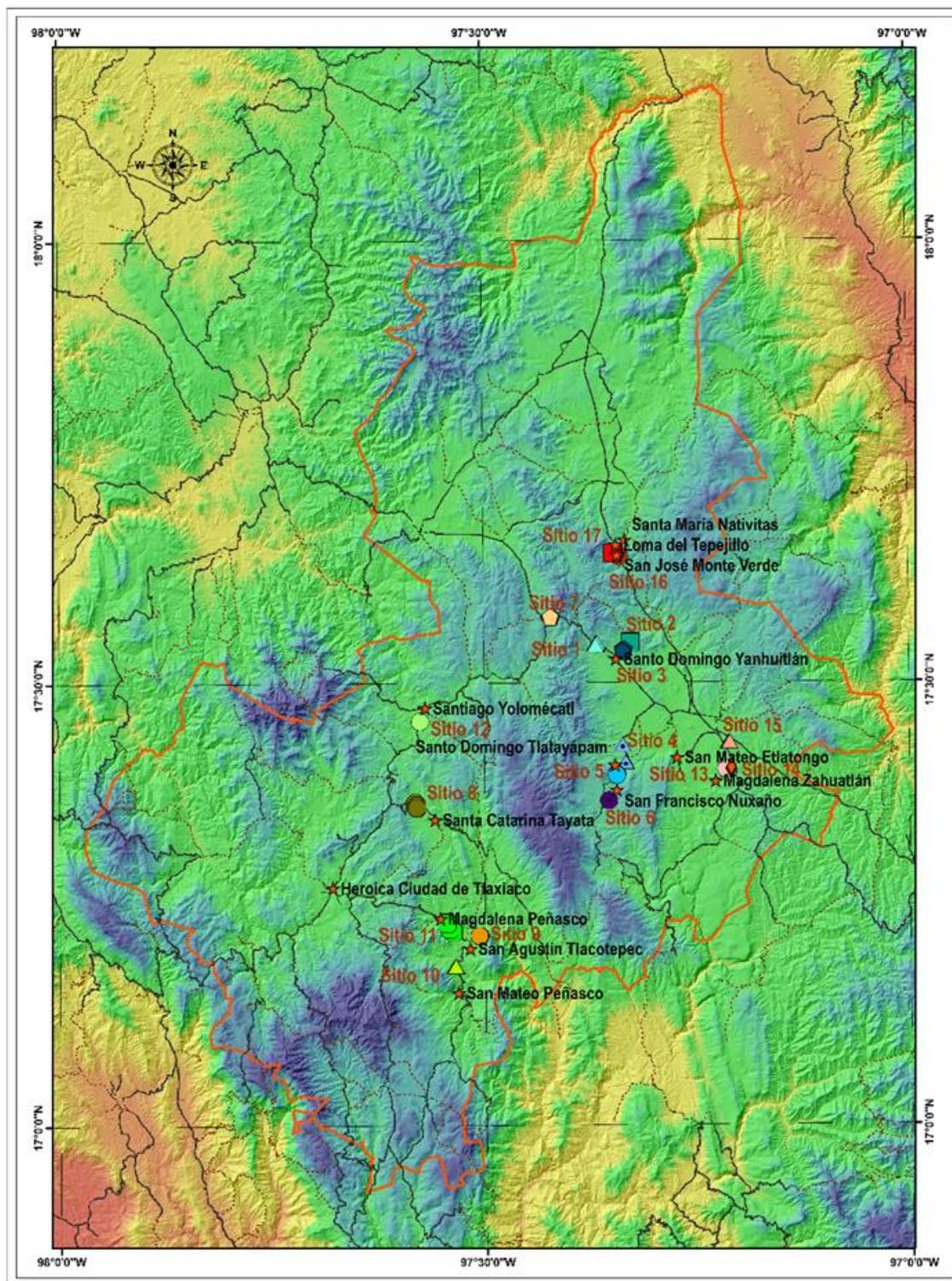


Figura 15. Sitios de reconocimiento en campo.

A continuación, se describe brevemente las condiciones biofísicas que presenta cada uno de los sitios visitados y que fueron utilizados como áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada.

Sitio 1. “Dos Corazones”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se puede el suelo leptosol calcárico con textura fina, con sistemas de topofomas valles de laderas tendidas con lomerío, el uso de suelo es una transición entre bosque de encino y matorral.

En la Figura 16, se ilustran las dos cárcavas más importantes, por parecer dos corazones se le denominada de este modo. Las personas de este lugar comentan que los desgajamientos de los taludes se vienen dando de forma muy lenta de manera natural. Para contrarrestar la formación de cárcavas, en las partes bajas, los habitantes han acomodado piedra en estas y practicado la técnica de lama bordo.



Figura 16. Fotografías del sitio 1.

Sitio 2. “Yanhuitlán Parte Alta”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico- arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se observa suelo leptosol calcárico con textura fina, con sistemas de topoformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo matorral xerófilo (Figura 17).

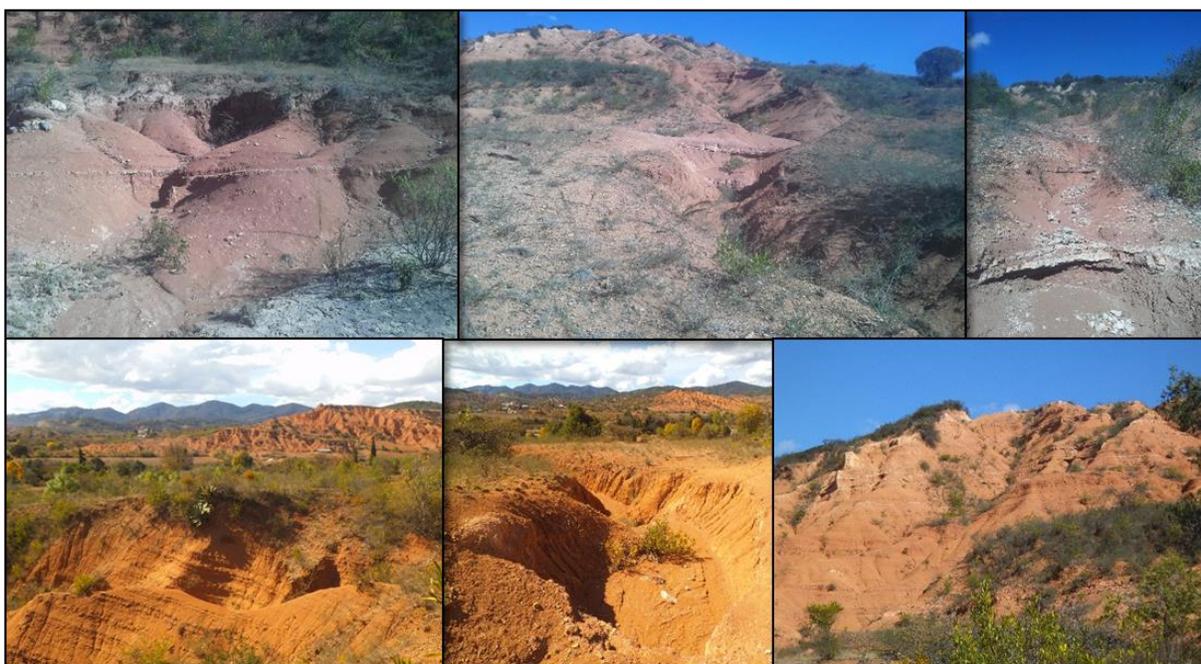


Figura 17. Fotografías del sitio 2.

Sitio 3. “Yanhuitlán”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica cuaternario, materiales aluviales sedimentarios, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se observa suelo vertisol mázico con textura media, con sistemas de topoformas valles de laderas tendidas con lomerío, el uso de suelo es matorral xerófilo (Figura 18).



Figura 18. Fotografías del sitio 3.

Sitio 4. “Santo Domingo Tlatayacapan 1”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico - arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se observa el suelo Phaeozem calcárico con textura fina, con sistemas de topoformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal (Figura 19).



Figura 19. Fotografías del sitio 4.

Sitio 5. “Santo Domingo Tlatayacapan 2”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región 20, hidrológica Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico - arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas el suelo es luvisol ródico con textura fina, con sistemas de tofoformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal (Figura 20).



Figura 20. Fotografías del sitio 5.

Sitio 6. “San Francisco Nuxaño”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, el suelo en las áreas aledañas es luvisol ródico con textura fina, con sistemas de toposformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal (Figura 21).



Figura 21. Fotografías del sitio 6.

Sitio 7. “Desviación Tlaxiaco”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 18, Balsas, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Mixteco. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico- arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se encuentran Leptosoles con textura fina, con sistemas de topofomas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es área sin vegetación aparente. Los tipos de materiales parentales que el sitio se ilustra en la Figura 22.



Figura 22. Fotografías del sitio 7.

Sitio 8. “Santa Catarina Tayata”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, el suelo en las áreas aledañas es leptosol con textura fina, con sistemas de topoformas lomerío con cañadas, el uso de suelo es pastizal (Figura 23).



Figura 23. Fotografías del sitio 8.

Sitio 9. “San Agustín Tlacotepec”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas se encuentran regosoles de textura media y fase física pedregosa, con sistemas de topofomas sierra alta compleja, el uso de suelo es pastizal. La variación de colores de los materiales geológicos se precia en la Figura 24.



Figura 24. Fotografías del sitio 9.

Sitio 10. “San Mateo Peñasco”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, los suelos en las áreas aledañas son regosoles de textura media y fase física pedregosa, con sistemas de topoformas sierra alta compleja, el uso de suelo es pastizal. La Figura 25 se observa la acumulación de materiales calcáreos en el perfil del material residual expuesto.



Figura 25. Fotografías del sitio 10.

Sitio 11. “Magdalena Peñasco”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciaria, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, el suelo en las áreas aledañas es Leptosol de textura fina, con sistemas de topoformas sierra alta compleja, el uso de suelo es pastizal. El sitio 11 es uno de los paisajes donde sería complicado introducir obras mecánicas de conservación de suelos ya que las dimensiones de las cárcavas son profundas y los flujos de agua alcanzan altas velocidades (Figura 26).



Figura 26. Fotografías del sitio 11.

Sitio 12. “Santiago Yolomecatl”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca Alta, en la región hidrológica 18, Balsas, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Mixteco. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica cuaternaria, con rocas sedimentarias de litología, material aluvial, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas el suelo es un Luvisol profundo con textura fina, con sistemas de topofomas lomerío con cañadas, el uso de suelo es pastizal. En la Figura 27, se aprecia que son materiales acumulados, en forma fluvial, ahora están siendo expuestos a un nuevo proceso erosivo.



Figura 27. Fotografías del sitio 12.

Sitio 13. “Magdalena Zahuatlan 1”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Sierras centrales de Oaxaca, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciario, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico- arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual semiseco templado, el suelo en las áreas aledañas es el Luvisol crómico de textura media, con sistemas de topofomas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal. En la Figura 28 se aprecian materiales parentales derivados de cenizas volcánicas, que pertenecen a diferentes periodos de acumulación.



Figura 28. Fotografías del sitio 13.

Sitio 14. “Magdalena Zahuatlan 2”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Sierras centrales de Oaxaca, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciario, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico- arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual semiseco templado, en las áreas aledañas el suelo es el Luvisol crómico de textura media, con sistemas de topofomas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal. La Figura 29, muestra alguna de las cárcavas típicas de este sitio.



Figura 29. Fotografías del sitio 14.

Sitio 15. “Etlatongo”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Sierras centrales de Oaxaca, en la región hidrológica 20, Costa Chica – Río verde, en la cuenca Atoyac y subcuenca Río Sordo. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciario, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual semiseco templado, en las áreas aledañas el suelo es el Luvisol crómico de textura media, con sistemas de topofomas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es pastizal. En la Figura 30 se observa que el agente erosivo es el agua, en algunos casos forma túneles que posteriormente se desprenden estos materiales de las cabeceras.



Figura 30. Fotografías del sitio 15.

Sitio 16. “San José Monteverde”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca alta, en la región hidrológica 28, Papaloapan, en la cuenca Papaloapan y subcuenca Río Salado. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciario, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas el suelo es leptosol calcárico de textura fina, con sistemas de toposformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es matorral xerófilo. En la parte donde no hay presencia de cárcavas, la superficie está protegida por

una capa delgada de materiales carbonatados. Se observa que la formación de las cárcavas es producto de cambios geológicos y climáticos que poco a poco han ido desgastando esta capa hasta formar cárcavas como las mostradas en la Figura 31.



Figura 31. Fotografías del sitio 16.

Sitio 17. “San José Monteverde”, se ubica en la provincia Sierra Madre del Sur, en la subprovincia Mixteca alta, en la región hidrológica 28, Papaloapan, en la cuenca Papaloapan y subcuenca Río Salado. Los materiales geológicos datan de la era Cenozoica terciario, con rocas sedimentarias de litología, conglomerado poligénico-arenisca, perteneciente a la Formación Tamazulapan, con un clima actual templado subhúmedo, en las áreas aledañas el suelo es leptosol calcárico con textura fina, con sistemas de toposformas sierra baja compleja con cañadas, el uso de suelo es matorral xerófilo. En la Figura 32, se aprecian que los materiales tienen una fragilidad alta a la degradación causada por movimientos tectónicos y agentes hidroclimáticos.



Figura 32. Fotografías del sitio 17.

5.3.5. Obtención de variables

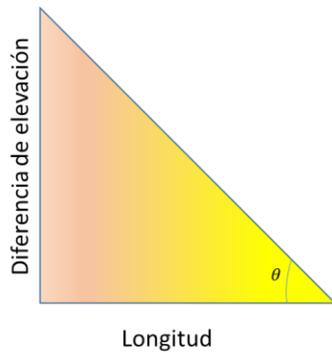
La selección de variables se hizo en función de lo que reporta la bibliografía y las escalas de la información. Inicialmente se planteó trabajar 25 variables, sin embargo, la identificación de las cárcavas se realizó con las 10 variables que mostraron mayor correlación. Las variables relacionadas con el suelo, como conductividad hidráulica, factor K, tipo de suelo y textura fueron descartadas porque la información disponible

corresponde a la carta edafológica de INEGI (2006) escala 1:250 000. Las variables climáticas como tipo de clima, precipitación, temperatura anual, índice de Fournier, índice de Fournier modificado e índice de concentración de la precipitación no se usaron debido a que no mostraron una tendencia clara con la distribución de cárcavas. Las variables geológicas como tipo de roca, edad del material parental y dureza del material parental tampoco se consideraron ya que esta información solo está disponible en mapas con escala 1:250 000. Variables de cobertura vegetal como porcentaje de cobertura vegetal, no se usó debido a que era redundante con el NDVI, ya que porcentaje se generó a partir de NDVI. La información de uso de suelo y vegetación, aun cuando está disponible a escala 1:50 000 (WWF, 2014) no fue útil ya que los terrenos con cárcavas fueron clasificados como pastizales. Otras variables no consideradas, pues no mostraron relación con la presencia de cárcavas fue la densidad de corrientes y orientación topográfica. A continuación, se describen las variables que muestran mayor correlación con la presencia de cárcavas.

5.3.5.1. *Variables topográficas*

(a) Pendiente

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie, en ese punto, y la vertical. La pendiente se puede obtener en grados o porcentaje. Su estimación se realiza a partir del MDE y se calcula con la pendiente de un plano de ajuste para cada punto o celda del modelo. La pendiente se obtuvo en porcentaje con el comando *3D Analyst Tools>Raster Surface>Slope* de ArcGis 10, la cual es calculada mediante la técnica del promedio máximo (Burrough *et al.*, 1998). Así, entre mayor es la diferencia de elevaciones el valor de la pendiente es más escarpada y cuando más pequeña, la superficie es más plana (Figura 33).



$$\text{Pendiente en grados} = \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Diferencia de elevación}}{\text{Longitud}} \right)$$

Ecuación 1.

$$\text{Pendiente en porcentaje} = \left(\frac{\text{Diferencia de elevación}}{\text{Longitud}} \right) \times 100$$

Ecuación 2.

Cuando la pendiente es 45° en porcentaje es 100

Figura 33. Representación gráfica de la pendiente.

La pendiente se puede clasificar de diferentes maneras, uno de los criterios más utilizados en la geomorfología es el umbral geomorfológico citado por Ferrando (1993), el cual se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Clasificación de pendientes (Ferrando, 1993).

Pendientes		Tipo de pendiente	Umbral geomorfológico
Grados (°)	Porcentaje (%)		
0 - 2	0- 4.5	Plana	Erosión nula a leve
2 - 5	4.5 - 11.0	Suave	Erosión débil, difusa. Erosión laminar
5 - 10	11.0 - 22.0	Moderada	Erosión moderada a fuerte. Inicio de erosión lineal. Erosión en surcos
10 - 20	22.0 - 44.5	Fuerte	Erosión intensa. Erosión lineal frecuente. Cárcavas incipientes.
20 - 30	44.5 - 67.0	Muy fuerte a Moderadamente Escarpada	Cárcavas frecuentes. Movimiento en masa. Deslizamiento de materiales
30 -45	67.0 – 100	Escarpada	Deslizamientos. Inicio de derrumbes
>45	>100	Muy Escarpada a Acantilada	Desprendiendo y derrumbes. Corredores de Derrumbes frecuentes

En la Figura 34 se muestra la distribución de la pendiente del terreno según el umbral geomorfológico propuesto por Araya y Börgel (1972), Young (1975) y citado por Ferrando (1993). Así, para la zona de estudio el 30.14% de la superficie se encuentra en pendientes suaves (4.5 -11%), seguido de moderadas, fuerte, planas, modernamente escarpada, escapada y muy escarpada; Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación de pendientes del área de estudio.

Porcentaje (%)	Tipo	Área (km²)	Área (%)
0- 4.5	Horizontal	1,046.06	16.96
4.5 - 11.0	Suave	1,858.88	30.14
11.0 - 22.0	Moderada	1,849.08	29.98
22.0 - 44.5	Fuerte	1,153.78	18.71
44.5 - 67.0	Muy fuerte a Moderadamente escarpada	206.49	3.35
67.0 – 100	Escarpada	49.54	0.80
>100	Muy Escarpada a Acantilada	3.63	0.06
Total general		6,167.46	100.00

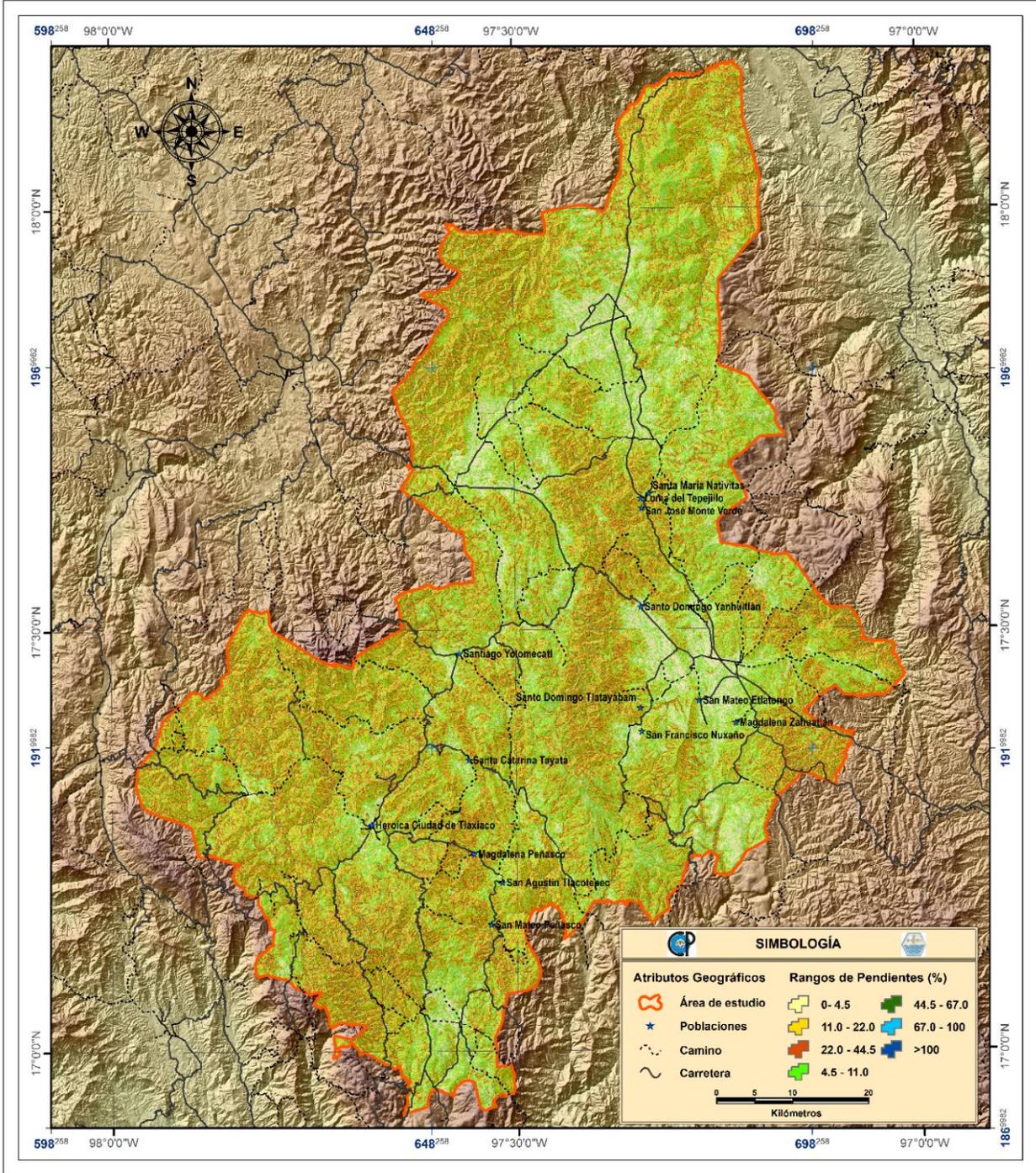


Figura 34. Rangos de pendientes del área de estudio.

(b) Curvatura

La curvatura es la tasa de cambio en pendiente, su objetivo es representar la forma que toma la pendiente, puede ser cóncava o convexa (Wilson y Gallant, 2000; Zevenbergen *et al.*, 1987). La curvatura es el producto de la curvatura plana y de perfil y es una variable indispensable para el modelaje de los procesos de erosión y esorrentía (Kienzie, 2004).

Los valores de curvatura en un área accidentada (relieve moderado) pueden variar de -0.5 a 0.5, mientras que en montañas escarpadas (relieve extremo) los valores pueden variar entre -4 y 4.

(c) Curvatura de perfil o vertical

Indica la magnitud de cambio de la pendiente máxima, en sentido vertical al relieve (Moore *et al.*, 1991). Infiuye en la aceleración o desaceleración del flujo en el terreno; valores negativos, en el pixel analizado, indican que la superficie es convexa, por lo tanto, la corriente se desacelera; valores positivos de la curvatura corresponden a celdas cóncavas y corriente se acelera; un valor igual a 0 indica una superficie lineal sin cambios en las condiciones de erosión o depositación (Figura 35).

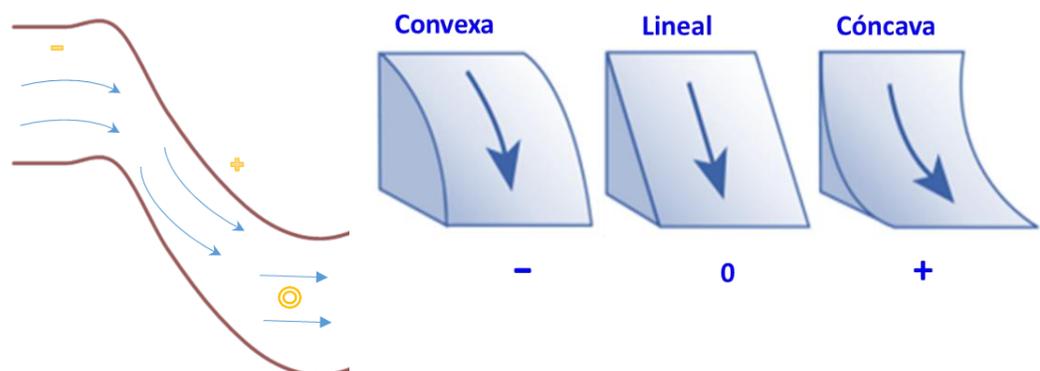


Figura 35. Tipos de curvatura de perfil o vertical.

Con base en la Figura 36, en el Cuadro 10 se observa que el 44.22% de la Mixteca Alta se encuentra con un grado de erosión acelerada al presentar una curvatura lateralmente convexa, indicativo de la presencia de corrientes con altas velocidades. Por otro parte, el 39.34% se ubica en curvatura lateralmente cóncava que representa áreas donde se da una desaceleración de flujo y por lo tanto ocurren zonas de depositación de sedimentos. Por último, el 16.44% son zonas estables donde no se observa erosión ni depositación.

Cuadro 10. Clasificación de curvatura vertical.

Valores	Tipo	Área (km ²)	Área (%)
<0	Lateralmente cóncava (Erosión desacelerada)	2,426.15	39.34
0	Superficie lineal (Estable)	1,014.07	16.44
>0	Lateralmente convexa (Erosión acelerada)	2,727.24	44.22
Total general		6,167.46	100.00

Los diferentes rangos de curvatura vertical se aprecian en la parte estable corresponde a áreas con valores iguales a 0 por lo que es considerada como una superficie estable, la parte de color rojo son lateralmente convexa, en esta se genera una erosión acelerada.

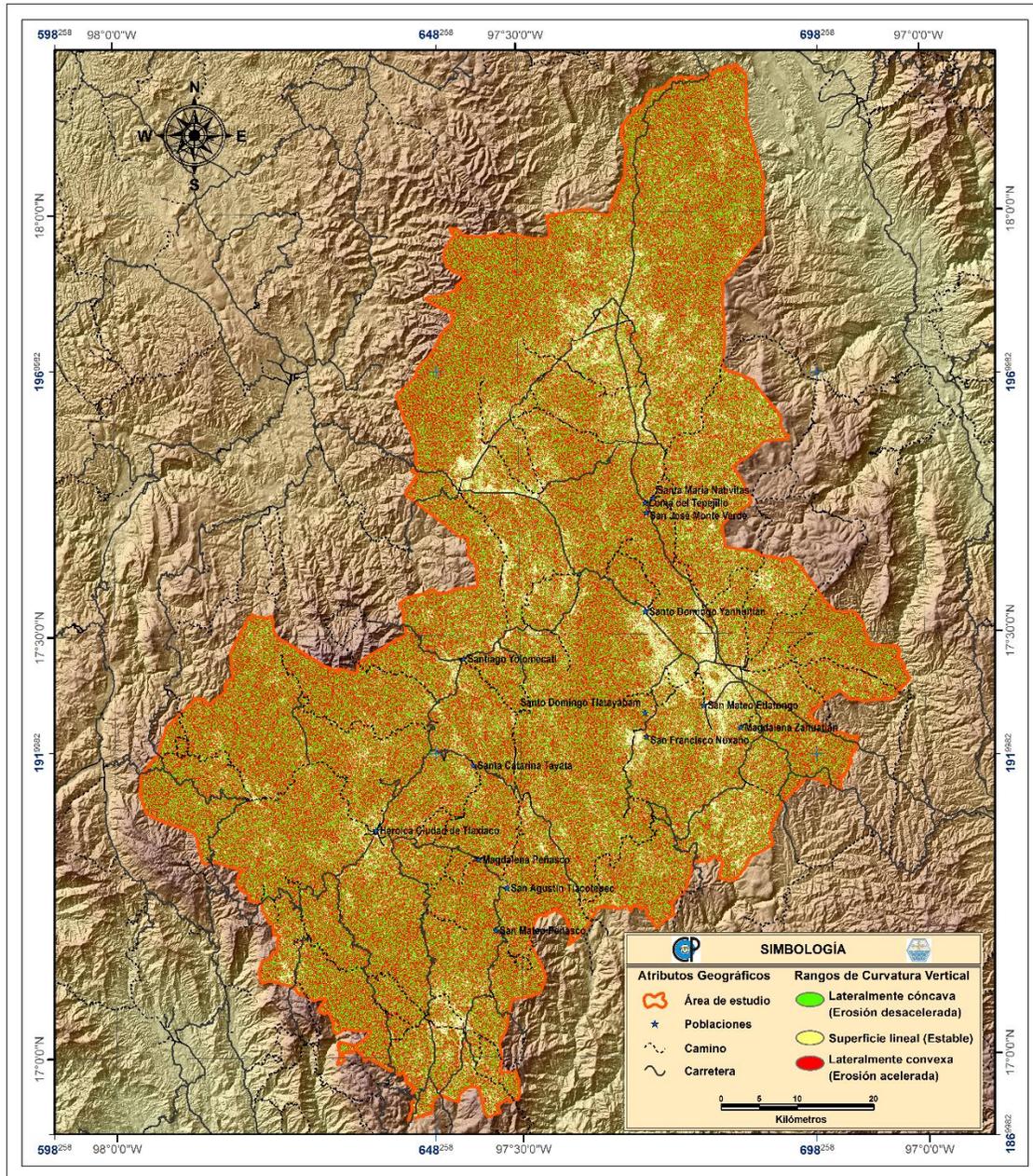


Figura 36. Curvatura vertical del área de estudio.

(d) Curvatura plana u horizontal.

Esta curvatura es perpendicular a la pendiente máxima y está relacionada con la convergencia o divergencia de los escurrimientos superficiales (Moore *et al.*, 1991). Es un indicador del grado de cambio de las condiciones topográficas, en forma horizontal o lateral, de una ladera; valores positivos indican una condición lateral, siguiendo una curva de nivel, convexa; donde los escurrimientos superficiales tienden a dispersarse a lo largo

de la ladera; los valores negativos indican que la superficie es lateralmente cóncava y por tanto el escurrimiento superficial se concentra a lo largo de una ladera. Un valor cero indica que lateralmente la curva de nivel es lineal y por tanto los escurrimientos superficiales bajan paralelos a lo largo de la ladera (Figura 37).

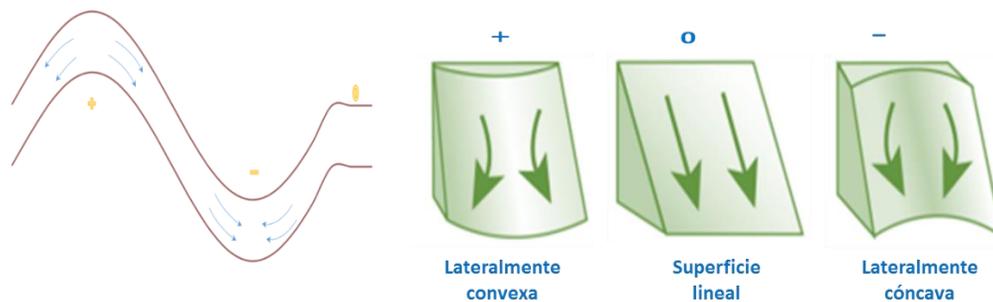


Figura 37. Tipos de curvatura plana u horizontal.

En el Cuadro 11, se observa que más del 40% del área de estudio tiene curvaturas cóncavas, es decir sus escurrimientos son convergentes y sus laderas tienden a producir flujos concentrados que incrementan el riesgo de formación de cárcavas. Por otra parte, el 38.27% representan una forma convexa y en sus laderas no presentan riesgos de acumulación de escurrimientos. El 20.84% restante corresponde a áreas donde las corrientes discurren paralelamente.

Cuadro 11. Clasificación de curvatura horizontal.

Porcentaje (%)	Tipo	Área (km ²)	Área (%)
<0	Convexa (Flujo divergente, corriente desacelerada)	2,360.01	38.27
0	Plana (Corriente estable)	1,285.22	20.84
>0	Cóncava (Flujo convergente, corriente acelerada)	2,522.23	40.90
Total general		6,167.46	100.00

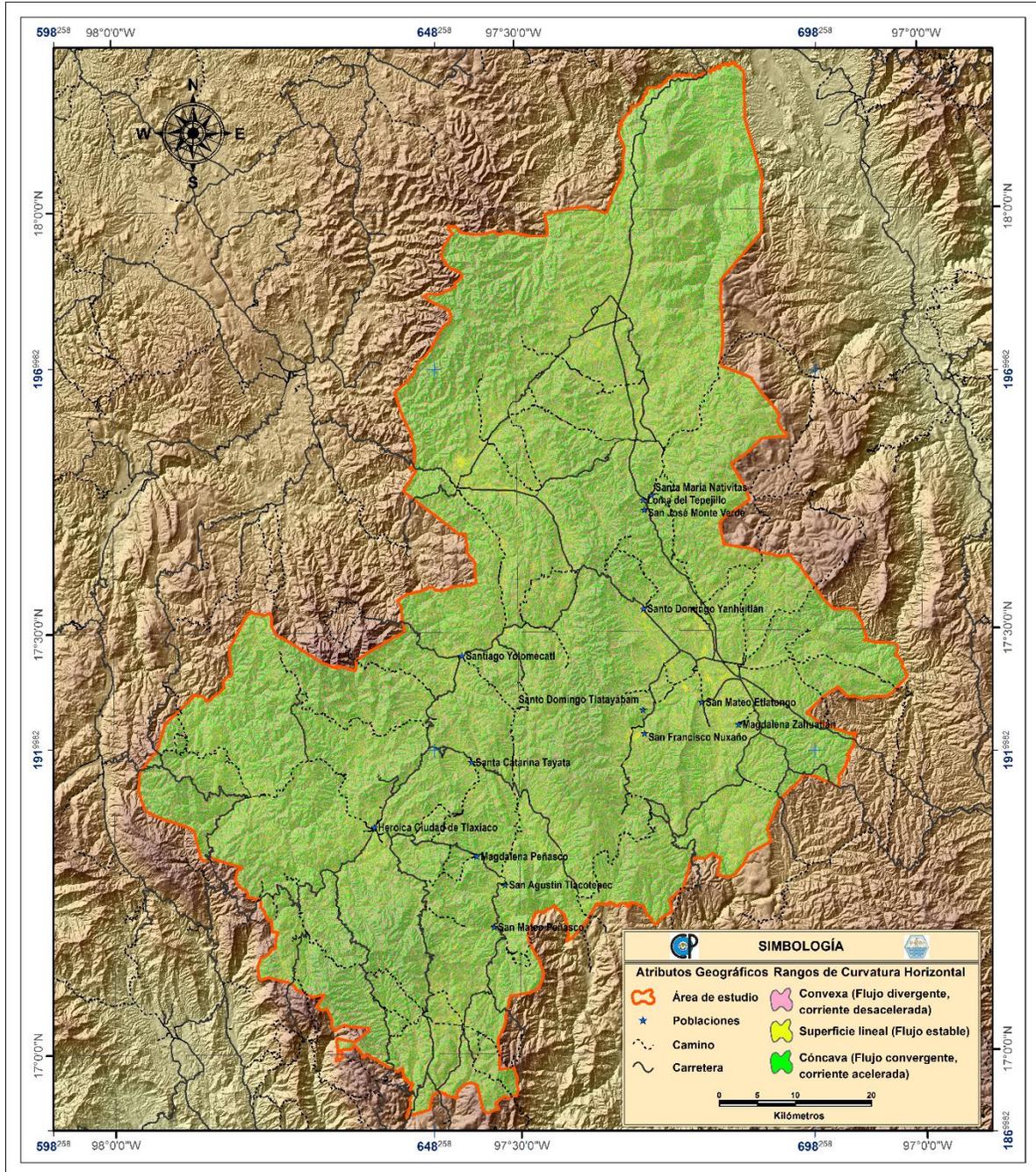


Figura 38. Curvatura horizontal del área de estudio.

(e) Longitud de la pendiente (λ)

La longitud de la pendiente (λ) es la distancia entre el punto más alto, de caída de una gota de lluvia, y el punto en el cual la pendiente disminuye hasta dar comienzo la depositación de sedimentos (Delgado, 2010), es decir, corresponde a la parte donde la curvatura vertical de la ladera es convexa (Figura 39).

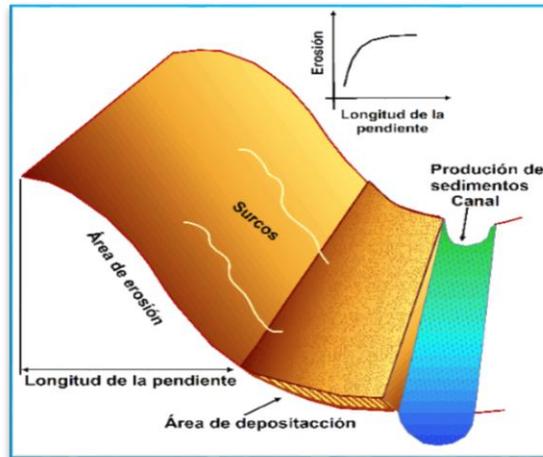


Figura 39. Longitud de la pendiente.

Este factor se estimó tomando como base el modelo de elevación de 15X15, con el uso de Longitud de la pendiente en SAGA GIS del algoritmo Moore *et al.* (1991), ubicado en *Terrain Analysis - Hydrology* → *Slope Length* (Figura 40) del Sistema de Información Qgis 2.8.1.

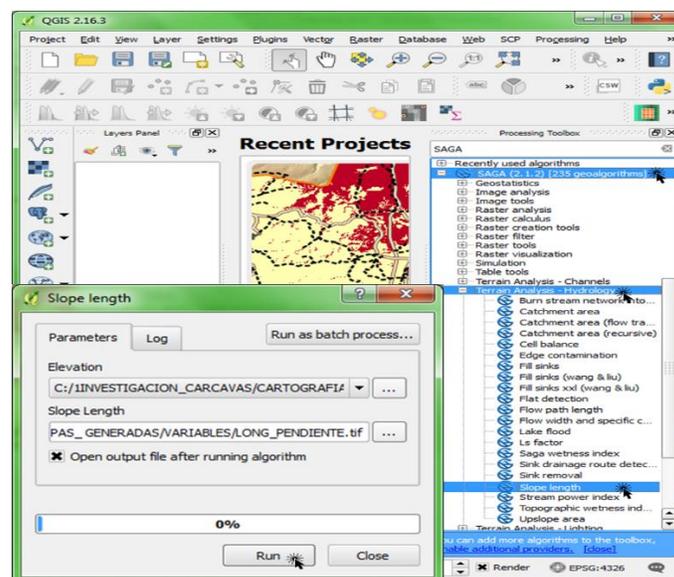


Figura 40. Comando para el cálculo de longitud de la pendiente en Qgis.

En el área de estudio se tienen longitudes de pendientes que van de 0 a 4395 m, siendo más frecuentes los rangos 20-100, 0-20, 100-200, 200-500, (Cuadro 12).

Cuadro 12. Longitud de la pendiente del área de estudio.

Longitud de la pendiente (m)	Área (km²)	Área (%)
0 – 20	1,705.45	27.65
20 – 100	2,351.76	38.13
100 – 200	1,178.22	19.10
200 – 500	776.56	12.59
500 – 1000	130.02	2.11
1000 – 2000	22.97	0.37
2000 – 3000	2.17	0.04
3000 – 4000	0.31	0.01
4000 – 4395	0.02	0.00
Total general	6,167.46	100.00

En la Figura 41 se muestran las longitudes de pendientes; con rangos perceptibles entre 0 y 500 m, siendo los valores más altos para áreas con pendientes escarpadas y los más bajos para zonas de depositación, en lomeríos y áreas planas

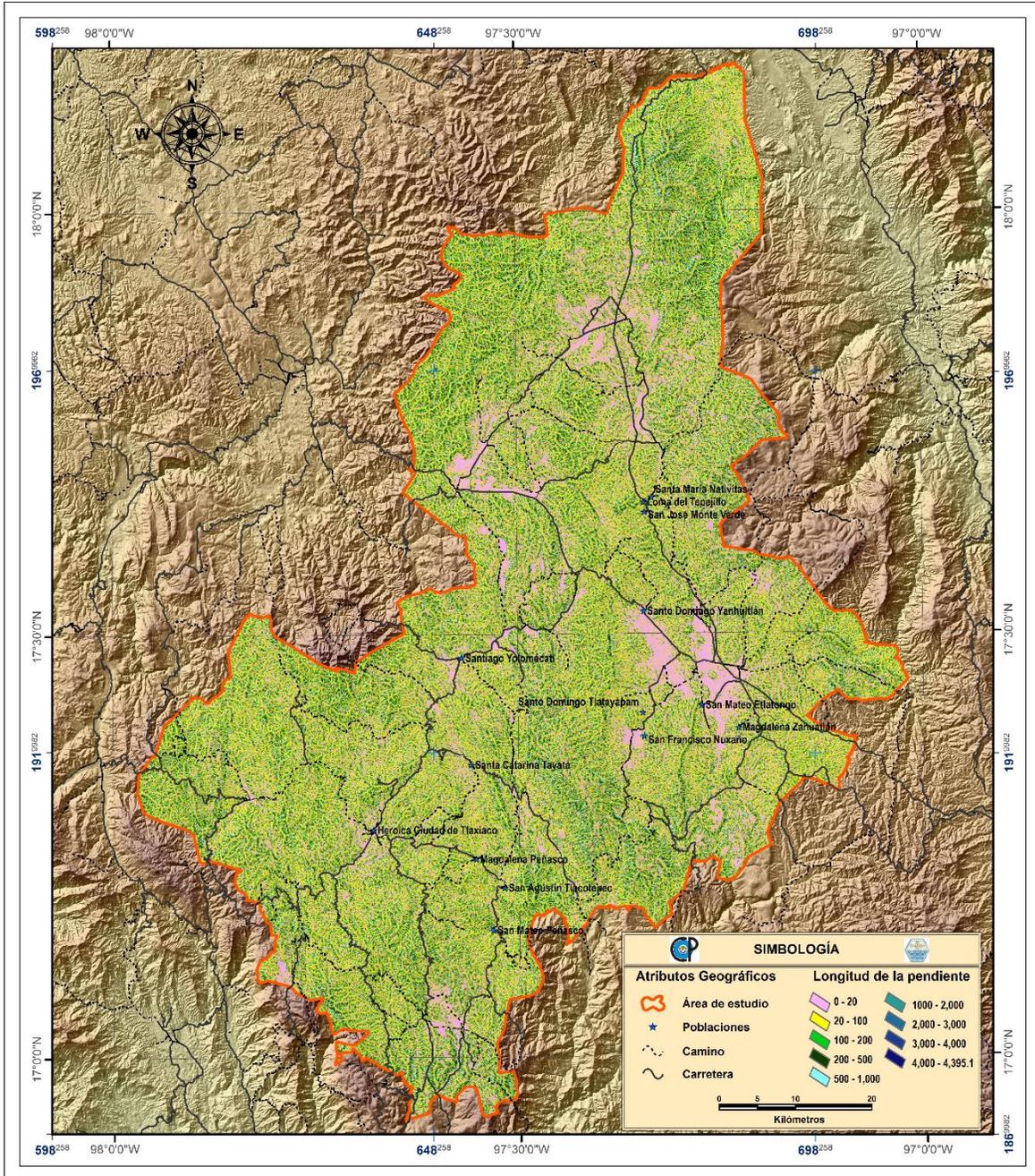


Figura 41. Clasificación de longitud de la pendiente.

(f) Índice de posición topográfica (IPT)

El IPT se usa para identificar los sistemas de topoformas, su cálculo se basa en el modelo elevación digital, a partir de la comparación de la elevación de una celda de interés con respecto al promedio de sus adyacentes (Weiss, 2001). Cuando el cálculo de IPT es de forma circular se emplea la siguiente ecuación:

$$IPT_{fe} = \overline{E}_a - E_c \quad \text{Ecuación 6.}$$

donde:

IPT_{ef} : índice de posición topográfica para un radio de vecindad establecido.

\overline{E}_a : elevación media del área, en m.

E_c : elevación media de la celda, en m.

Valores positivos indican regiones con mayores elevaciones, serranías, lomeríos, crestas (Figura 42). Los IPT negativos corresponden a áreas bajas como valles (Weiss, 2001). Valores cercanos a 0 representan zonas planas.

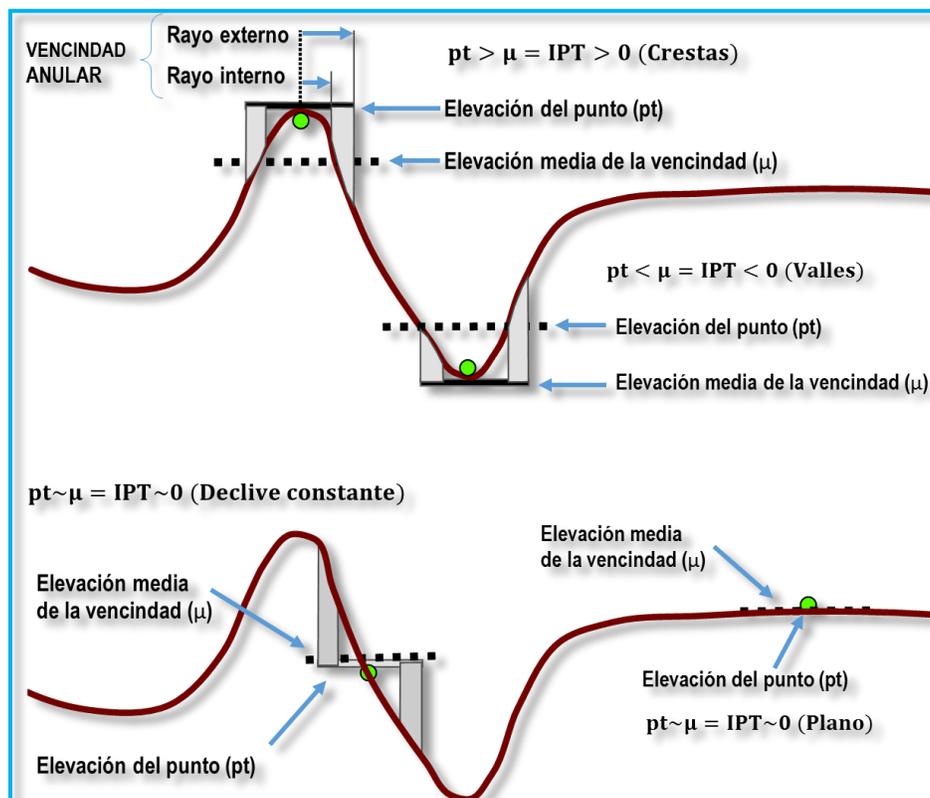


Figura 42. IPT adaptado de Weiss, 2001 (Silveira y Silveira, 2014).

Este índice se calculó, para un radio de 30 m, con la extensión *Land Facet Corridor Designer*^A para ArcGIS 10 (Figura 43). La clasificación de los sistemas de topoformas, con base en los rangos de IPT y pendiente, se muestra en el Cuadro 13.

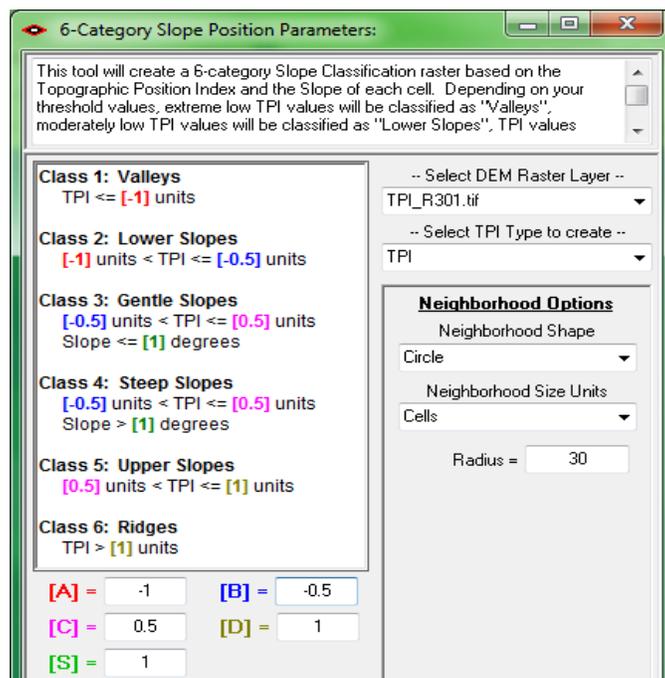


Figura 43. Clasificación del relieve en función del IPT.

Cuadro 13. Clasificación del relieve en función del IPT.

Nombre	IPT	Pendientes
Valles	≤ -1	
Pendientes bajas	$-1 < TPI \leq -0.5$	
Pendientes suaves	$-0.5 < TPI \leq 0.5$	$\leq 5^\circ$
Pendientes medias	$-0.5 < TPI \leq 0.5$	$> 5^\circ$
Pendientes altas	$0.5 < TPI \leq 1$	
Picos y crestas	> 1	

La clasificación del IPT se realizó de acuerdo con lo propuesto por Jenness *et al.*, (2013), para distinguir los sistemas de topoformas. El área de estudio, de acuerdo con esta categorización, se encuentra un 46.77% en crestas, seguido por valles intermontanos (41.67%), lomeríos con pendientes suaves, lomeríos con pendientes moderadas y laderas escarpadas (Cuadro 14).

Cuadro 14. . Índice de posición topográfica.

IPT	Descripción	Área (km²)	Área (%)
<-1	Valles intermontanos	2,569.72	41.67
-1 a -0.5	Lomeríos o laderas suaves	535.42	8.68
-0.5 a 0.5	Lomeríos con laderas moderadas y pronunciadas	120.11	1.95
0.5 a 1	Laderas con pendientes escarpadas	57.42	0.93
>1	Crestas	2,884.80	46.77
Total general		6,167.46	100.00

La distribución geográficas (Figura 44), según su IPT, muestran que los valores negativos corresponden a zonas con poca pendiente (valles intermontanos y lomeríos bajos), los valores cercanos a 0 a zonas planas, valores superiores a 1 corresponden a lomeríos medios a sierras con pendientes fuertes y escarpadas.

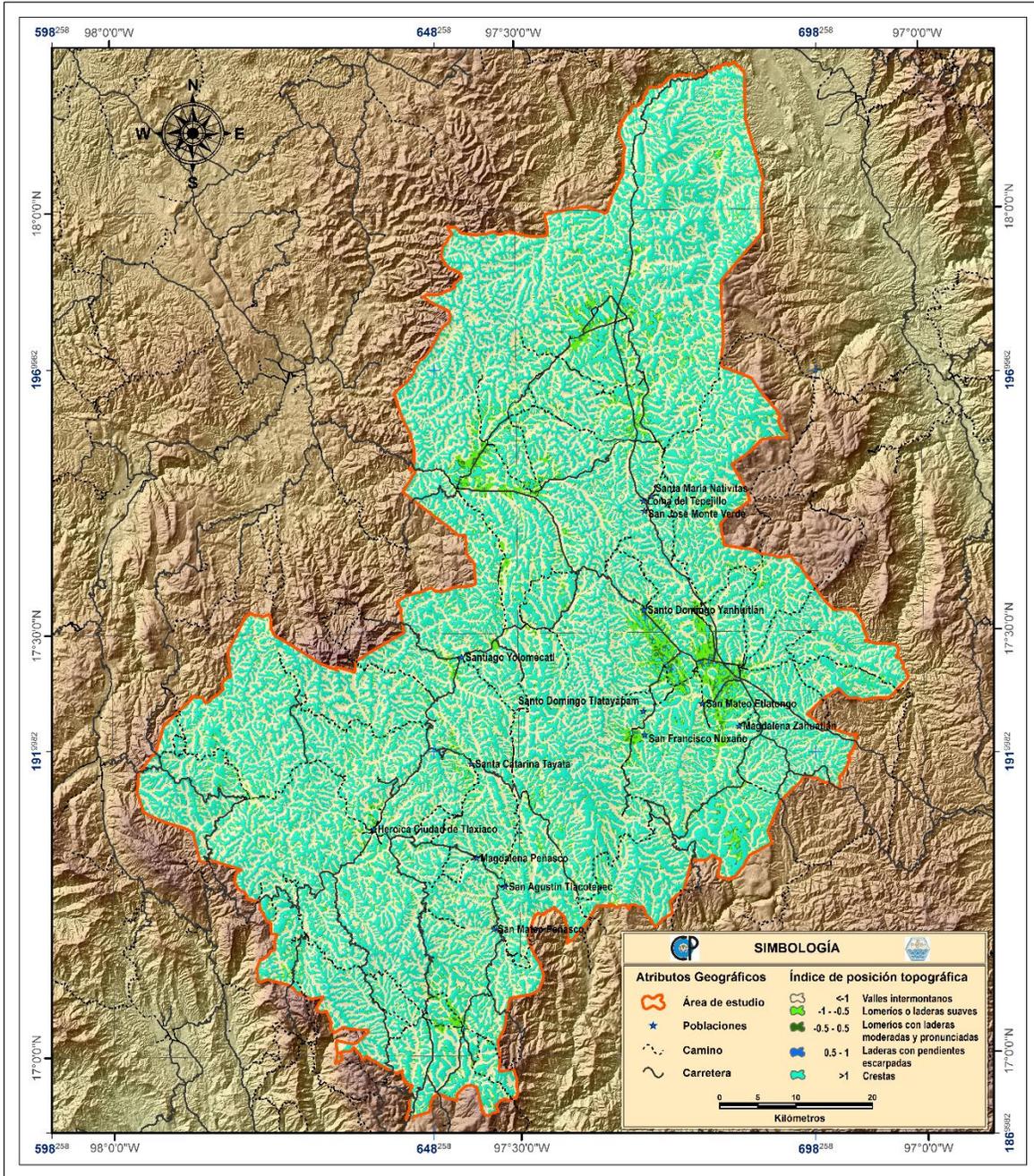


Figura 44. Clasificación del Índice de Posición Topográfica.

5.3.5.2. Variables hidrológicas

(a) Índice Topográfico de humedad (ITH)

El índice de humedad fue diseñado para inferir, a través de datos topográficos, la distribución espacial de la humedad del suelo, la saturación superficial, la recarga de acuíferos, las áreas de descarga y el potencial de escorrentía (Kienzle, 2004). Su característica de concentrar la humedad lo hace útil en estudios de hidrología, agricultura, geomorfología y uso de suelo y vegetación.

Barling *et al.* (1994) lo usa para caracterizar el régimen de humedad de los suelos, mientras que De Bruin *et al.* (1998) para ver la relación suelo-paisaje e identificar áreas de erosión y depositación. Este índice parte de la siguiente ecuación:

$$ITH = \ln\left(\frac{As}{\tan \beta}\right)$$

Ecuación 7.

donde:

ITH: índice topográfico de humedad, en $m^2 m^{-1} \circ$

As: área de drenaje específica de un punto, es decir, superficie que drena por unidad de longitud de la curva de nivel, en m^2/m

β : ángulo de la pendiente local, en \circ .

Para obtener esta variable (Figura 45) se partió del modelo de elevación digital y su procesamiento para rellenar imperfecciones con la herramienta *Fill*; la cual se ubica en la caja de herramientas de ArcGis, *Spatial Analyst Tools>Hydrology>Fill*. Una vez corregido el MDE se obtuvo la dirección de flujo (*Spatial Analyst Tools>Hydrology> Flow Direction*), la acumulación de flujo (*Spatial Analyst Tools>Hydrology> Flow Accumulation*) y la pendiente en grados (*3D Analyst Tools> Raster Surface>Slope> Degree*).

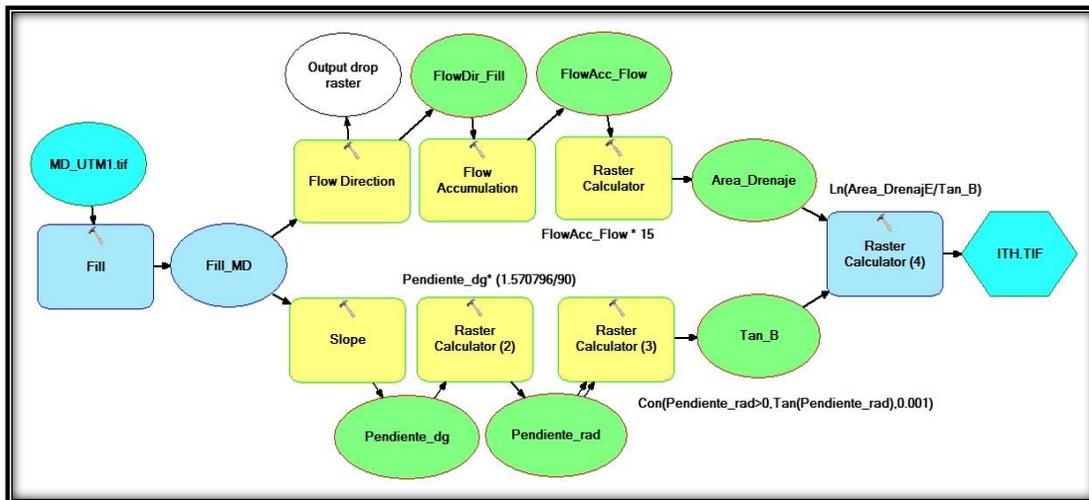


Figura 45. Modelo para obtener el ITH.

El área de drenaje específica (A_s), que representa la acumulación de flujo multiplicado por el tamaño del pixel del raster (15 m), se obtuvo con la calculadora de álgebra de mapas de ArcMap 10 (*Spatial Analyst Tools>Map Algebra>Raster Calculator*).

El ángulo de la pendiente local ($\tan \beta$) se transformó de grados a radianes (pendiente*1.570796/90), con el uso de a la calculadora de ArcMap 10, y aplicando la siguiente condicionante: si la pendiente es mayor que 0, entonces calcula la tangente de esta, si no, colocar el valor de 0.001 (La instrucción en ArcGis $\rightarrow \text{Con}(\text{Pendiente_rad} > 0, \text{Tan}(\text{Pendiente_rad}), 0.001)$).

El Índice Topográfico de humedad se calculó, usando álgebra de mapas, con el logaritmo natural del cociente entre área de drenaje específico y ángulo de la pendiente. Para evitar valores nulos o negativos, al usar el logaritmo natural, primero se dividió $A_s/\tan B$ y se aplicó la siguiente condicionante: si el valor resultante es menor a igual a 1, entonces asigne al cociente 1.

Para el área de estudio resultó un índice de humedad que va de 0 a 24, este rango se clasificó cada $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$ resultando que el 39.61% se ubica de 2 a $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$, el 37.03%, de 0 a $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$, el 15.66% de 4 a $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$, el resto de las categorías tienen menos del 5% (Cuadro 15).

Cuadro 15. Índice topográfico de humedad.

ITH	Área (km²)	Área (%)
0 - 2	2,283.92	37.03
2 - 4	2,442.74	39.61
4 - 6	965.54	15.66
6 - 8	265.85	4.31
8 - 10	110.57	1.79
10 - 12	57.56	0.93
12 - 14	23.63	0.38
14 - 16	10.47	0.17
16 - 18	4.96	0.08
18 - 20	1.75	0.03
20 - 22	0.45	0.01
22 - 24	0.03	0.00
Total general	6,167.46	100.00

En la Figura 46 se muestran la distribución de los rangos del índice topográfico de humedad. Los valores de mayor rango se ubican en los bajos fisiográficos y en donde se encuentran obstáculos como los caminos.

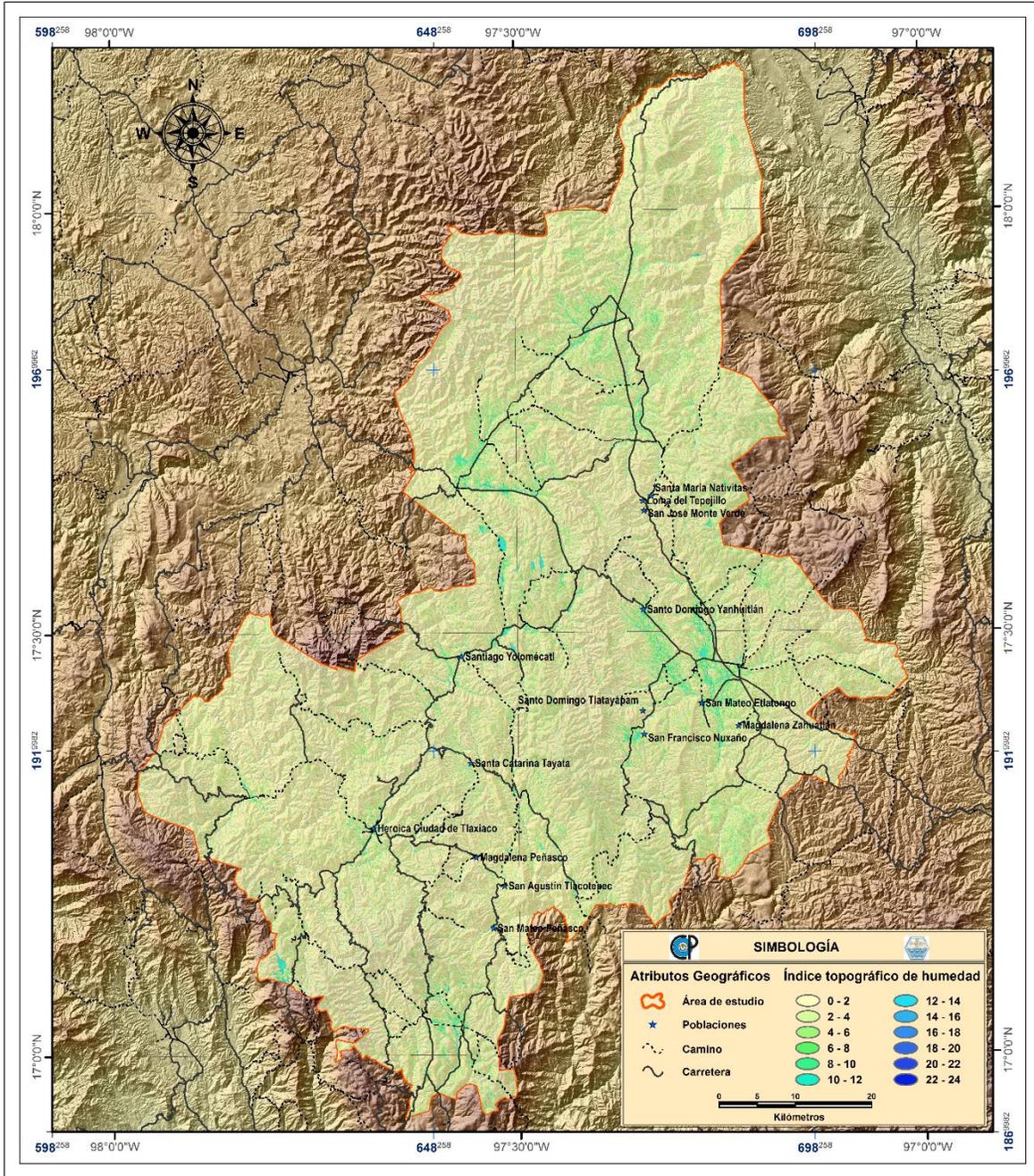


Figura 46. Distribución geográfica del Índice topográfico de humedad.

5.3.5.3. Variables geológicas

(a) Distancia a picos (estructuras volcánicas)

Son las distancias que existen entre las crestas o picos y el resto de los sistemas de topoformas. La distancia entre picos condiciona el espesor de las cenizas volcánicas depositadas que, tras el intemperismo químico, contribuyen en la formación de algunos suelos de origen volcánico (Lizcano *et al.*, 2006).

Los picos se obtuvieron de la clasificación estandarizada del índice de posición topográfica, correspondiente a las áreas identificadas como crestas. Posteriormente, usando la herramienta de ArcGis *Conversion Tools>From Raster>Raster To Polygon*, se convirtieron estas áreas a formato vector. Enseguida, se generó un raster con la máxima altitud de las crestas con la herramienta *Zonal Statistics*, se asignó al tipo de estadísticas el máximo, y con álgebra de mapas se extrajeron las celdas con las máximas elevaciones. Posteriormente, estos píxeles⁵, con los puntos más altos, se pasaron a polígonos usando *Conversion Tools>From Raster>Raster To Polygon*. Para obtener la posición de los picos, de este polígono, se le generó su centroide con *Data Management Tools>Features>Feature to Point*. Finalmente, a partir del vector con los picos resultante, se generó un raster de distancia euclidianas usando la herramienta *Spatial Analyst Tools>Distance> Euclidean Distance*.

Las distancias de depositación de cenizas dependerá de la dirección de los vientos, para zona de estudio (Figura 47) las distancias a picos varían de 0 a 2509.5 m. Al clasificar las distancias, en rangos de 100 m, resulta que la distancia entre 300 y 400 m concentra el 16.74% del área, seguida por los rangos 400 - 500 m, 200 - 300 m, 500 - 600 m, 100 - 200 m, 600 – 700 m, 700 – 800 m, el resto de los rangos se ubican con una superficie porcentual menor a 5 (Cuadro 16).

⁵ Pixel: Superficie homogénea más pequeña de las que componen una imagen, que se define por su brillo y color.

Cuadro 16. Rangos de distancia a picos (m).

Distancia a Picos (m)	Área (km²)	Área (%)
0 - 100	230.27	3.73
100 - 200	645.93	10.47
200 - 300	950.59	15.41
300 - 400	1,032.60	16.74
400 - 500	950.14	15.41
500 - 600	745.61	12.09
600 - 700	552.87	8.96
700 - 800	374.65	6.07
800 - 900	241.99	3.92
900 - 1000	159.78	2.59
1000 - 1200	166.98	2.71
1200 - 1400	68.39	1.11
1400 - 1600	27.71	0.45
1600 - 1800	11.53	0.19
1800 - 2000	5.30	0.09
2000 - 2200	2.25	0.04
2200 - 2400	0.76	0.01
2400 - 2509.5	0.11	0.00
Total general	6,167.47	100.00

En la Figura 47 se observa que la porción noreste cuenta con una importante cantidad de picos y su concentración disminuye en las partes bajas del área de estudio.

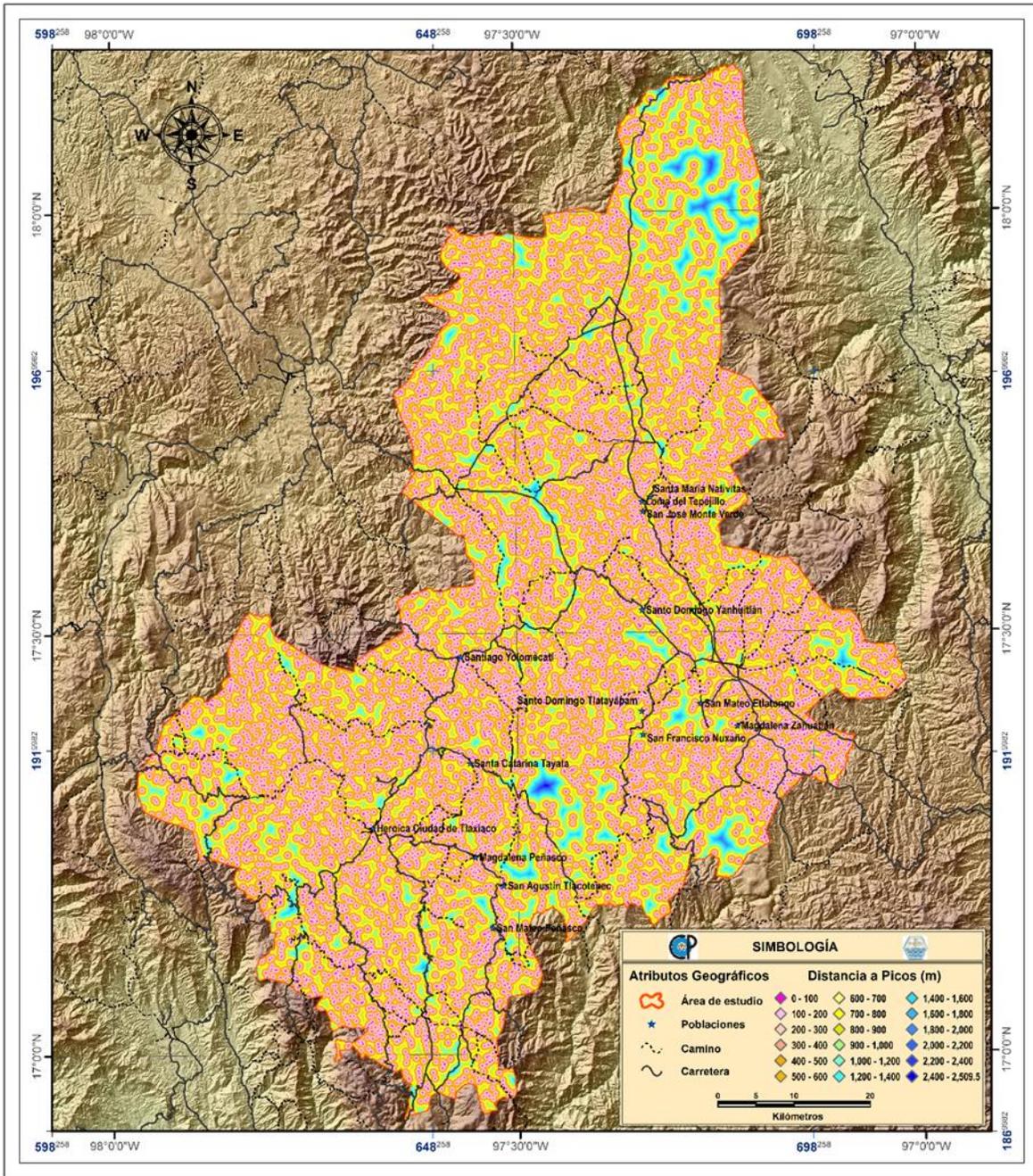


Figura 47. Clasificación de Distancia a picos.

(b) **Distancia a Fallas**

De las cartas E14-9 y E14-12 del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2000; SGM, 2001), se digitalizaron las fallas geológicas. Al analizar las fallas mayores se observó que la falla de Tamazulapam tiene gran influencia en la orografía regional, por lo que se seleccionó como base para obtener, a partir de esta, la distancia euclidiana. Para ello, se usó la herramienta *Spatial Analyst Tools>Distance> Euclidean Distance*.

Para analizar esta variable se clasificaron las distancias a la falla de Tamazulapam en rangos de 2000 m, encontrándose distancias que van de 0 a 51,662 m. Los rangos con mayor frecuencia en el área de estudio son de 15,000 - 20,000, 20,000 - 25,000, 25,000 - 30,000 y 30,000 - 35,000 (Cuadro 17).

Cuadro 17. Distancias a la Falla Tamazulapam.

Distancia a falla Tamazulapam (m)	Área (km²)	Área (%)
0 - 2,000	379.37	6.15
2,000 - 4,000	385.51	6.25
4,000 - 6,000	380.21	6.16
6,000 - 8,000	349.26	5.66
8,000 - 10,000	311.51	5.05
10,000 - 12,000	289.92	4.70
12,000 - 15,000	439.81	7.13
15,000 - 20,000	760.44	12.33
20,000 - 25,000	788.80	12.79
25,000 - 30,000	785.16	12.73
30,000 - 35,000	627.94	10.18
35,000 - 40,000	388.57	6.30
40,000 - 45,000	187.81	3.05
45,000 - 50,000	84.61	1.37
50,000 - 51,662	8.55	0.14
Total general	6,167.46	100.00

La representación de las distancias se encuentra en la Figura 48, se observa que la interpolación de distancias parte del área central del área de estudio que es donde se ubica la falla Tamazulapam, por lo que las zonas más alejadas a la falla son la parte este y suroeste.

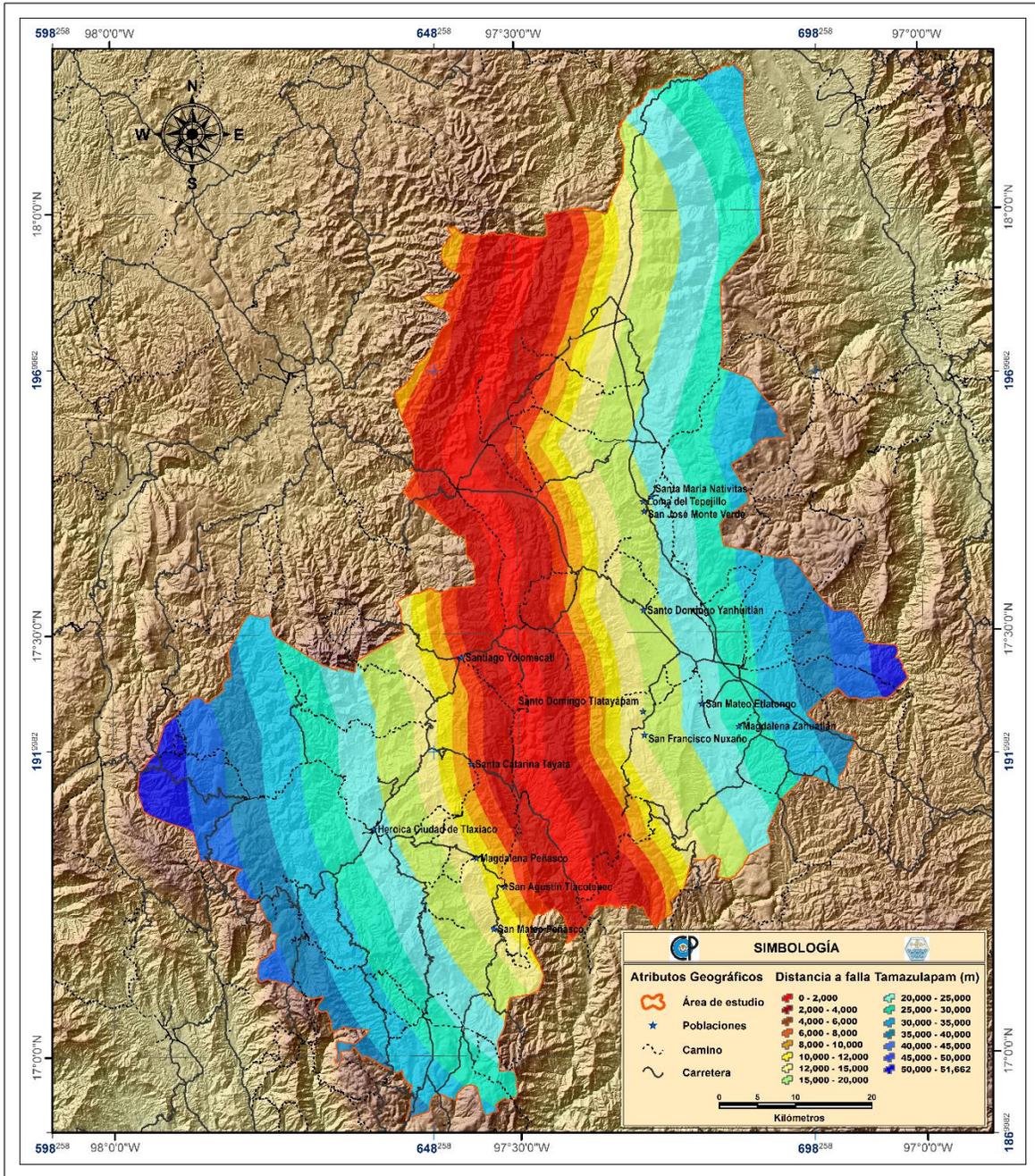


Figura 48. Clasificación de Distancia a fallas.

5.3.5.4. Variables Cobertura vegetal

Estas son aquellas que proporcionan protección al suelo para evitar que el suelo comience a erosionarse.

(a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Dado que las imágenes seleccionadas se tomaron en diferentes fechas, estas corrigieron de manera independiente con base en su radianza y reflectancia, usando el criterio al Tope de la Atmosfera (TOA). La corrección topográfica no se realizó debido a que el modelo de elevación empleado tiene un tamaño de pixel de 15 m y no ayuda a quitar las sombras generadas por la topografía.

El software utilizado para la corrección de las imágenes fue QGIS 2.16., para esto se extrajeron de los metadatos la siguiente información (Cuadro 18): B0= Banda azul, B1= Banda verde, B2= Banda roja, B3= Banda infrarroja cercana, DJ= Día juliano, Az= Angulo azimutal ($^{\circ}$), d^2 = distancia cuadrada de la tierra al sol (UA), GAIN(p)=ganancias, BIAS(p)= Sesgo, $E_0(b)$ = Irradianza solar($W/m^2/\mu m$), θ_s = Angulo cenital ($^{\circ}$) con la siguiente herramienta.

Cuadro 18. Características de las imágenes de satélite.

Imagen	Fecha y DJ	Banda	GAIN (p)	BIAS (p)	Az	Elevación solar	θ_s	d^2	$E_0(b)$
IMG_SPOT7_MS_2015	4/Nov/2015	B0	9.49	0	143.411	49.719	40.281	0.982	7.945
11041640159_ORT_SP	310	B1	10.075	0					6.026
OT7_20151105_195735		B2	10.86	0					8.730
1b967w6g9u146_1_R1		B3	15.388	0					10.210
C1									
IMG_SPOT6_MS_2015	16/Feb/2015	B0	8.26	0	135.407	47.622	42.166	0.976	8.131
02161649077_ORT_SP	47	B1	9.53	0					3.511
OT6_20160223_183414		B2	10.44	0					7.915
1lnadm5tk9qzc_1_R1C1		B3	14	0					9.092
IMG_SPOT6_MS_2015	16/Feb/2015	B0	8.26	0	134.853	47.686	42.105	0.976	8.131
02161649314_ORT_SP	47	B1	9.53	0					3.511
OT6_20160405_143510		B2	10.44	0					7.915
16g76yr5aixv3_1_R1C1		B3	14	0					9.092

Imagen	Fecha y DJ	Banda	GAIN (p)	BIAS (p)	Az	Elevación solar	θ_s	d^2	$E_0(b)$
IMG_SPOT6_MS_2015	16/Feb/2015	B0	8.26	0	134.427	48.119	41.668	0.976	8.131
02161649314_ORT_SP	47	B1	9.53	0					3.511
OT6_20160405_143601		B2	10.44	0					7.915
18jdkvcokzrzc_1_R1C1		B3	14	0					9.092
IMG_SPOT7_MS_2015	29/Enero/20	B0	9.49	0	138.428	42.428	47.374	0.970	7.945
01291638487_ORT_SP	15	B1	10.48	0					6.026
OT7_20160223_183218	29	B2	11.3	0					8.730
1dz7zq9glh04b_1_R1C1		B3	16.93	0					10.210
IMG_SPOT7_MS_2015	29/Ene/2015	B0	9.49	0	138.074	42.941	46.860	0.970	7.945
01291638487_ORT_SP	29	B1	10.48	0					6.026
OT7_20160405_143300		B2	11.3	0					8.730
13cjpgm4cfgwl4_1_R1C1		B3	16.93	0					10.210

B0= Banda azul, B1= Banda verde, B2= Banda roja, B3= Banda infrarroja cercana, DJ= Día juliano, Az= Angulo azimutal (°) d^2 = distancia cuadrada de la tierra al sol (UA), GAIN(p)=ganancias, BIAS(p)= Sesgo, $E_0(b)$ = Irradianza solar ($W/m^2/\mu m$), θ_s = Angulo cenital (°)

➤ Corrección Radiométrica

Para convertir los valores digitales de las imágenes, aplicando el método de Radianza a TOA, se aplicó la Ecuación 8 en función de los coeficientes GAIN y BIAS.

$$L_b(p) = \frac{DC(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b) \quad \text{Ecuación 8.}$$

donde:

$L_b(p)$: radianza al tope de la atmosfera, en $W \text{ sr}^{-1} \cdot m^{-2} \mu m^{-1}$.

DC(p): números digitales.

GAIN(p): ganancias.

BIAS(p): sesgo.

La corrección radiométrica se efectuó en el software Qgis 2.16.3 con la siguiente herramienta Raster>Raster Calculator> Se aplica la Ecuación 8, los comandos se ilustran en la Figura 49.

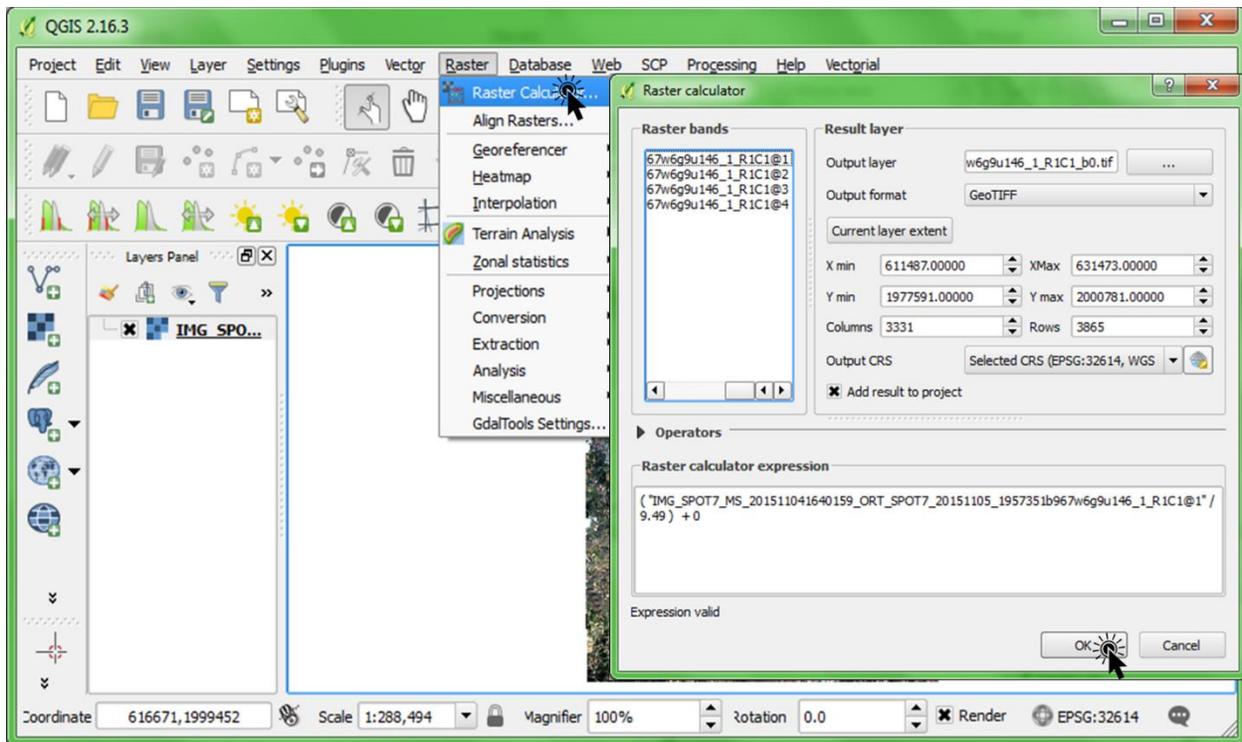


Figura 49. Comandos para el cálculo de radianza en Qgis.

➤ Corrección Reflectancia

Para la corrección reflectancia se empleó la Ecuación 9, para el método de TOA, en función de la radiación normalizada y la irradiación entrante.

$$\rho_b(p) = \frac{\pi L_b(p) \cdot d^2}{E_0(b) \cdot \cos(\theta_s)} \quad \text{Ecuación 9.}$$

donde:

$\rho_b(p)$: reflectancia al tope de la atmosfera

$L_b(p)$: radianza al tope de la atmosfera, en $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

d^2 : distancia de la tierra al sol al cuadrado, en unidades astronómicas.

$$d^2 = 1 + \frac{0.01674 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (DJ - 93.5))}{365} \quad \text{Ecuación 10.}$$

DJ: día Juliano de la toma de la imagen

$E_0(b)$: irradianza solar, en $W m^{-2} \mu m^{-1}$

θ_s : ángulo zenital, en radianes

$$\theta_s = 90^\circ - \text{Ángulo de elevación del sol}$$

Ecuación 12.

La corrección de reflectancia se realizó en el software Qgis 2.16.3 con la siguiente herramienta *Raster>Raster Calculator>* Se aplica la Ecuación 9, los datos que alimentan a esta, los comandos se ilustran en la Figura 50.

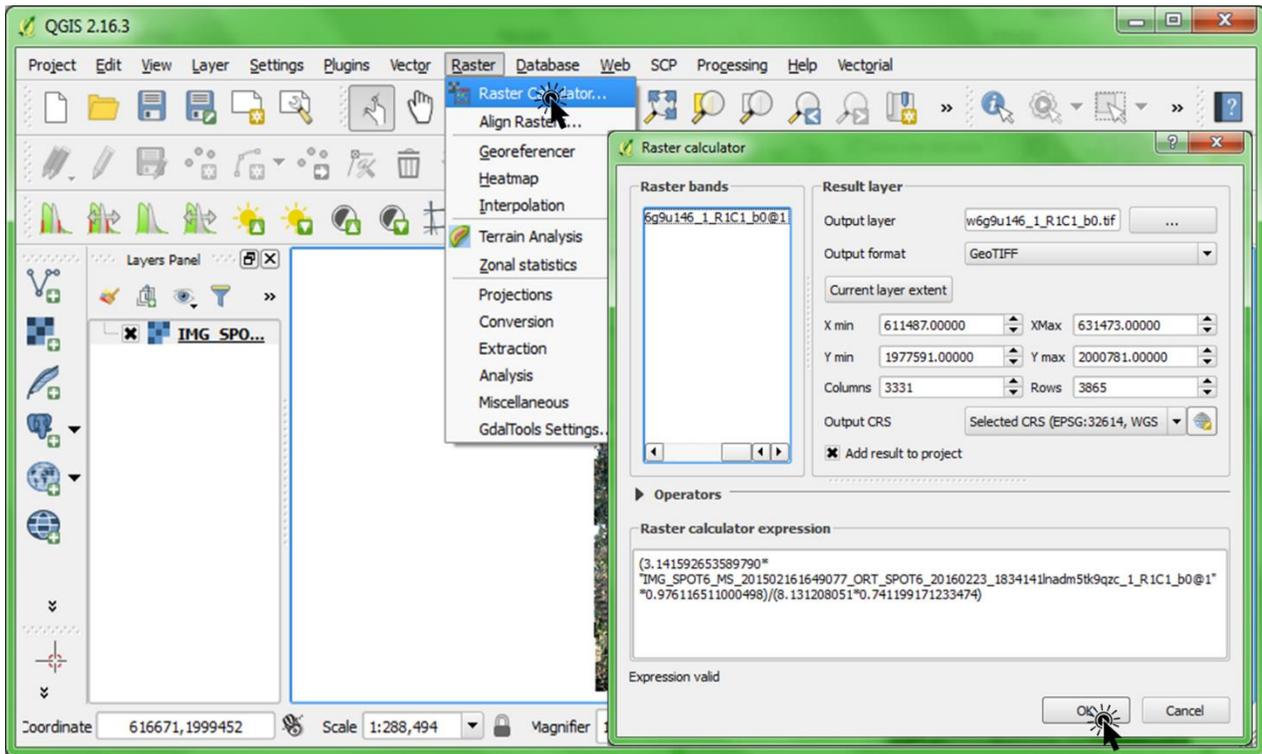


Figura 50. Comandos para el cálculo de reflectancia en Qgis.

➤ Obtención del NDVI

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) fue creado por Rouse *et al.* (1974) y rango varía de -1 a 1. Este índice se calculó con la Ecuación 11.

$$NDVI = \frac{IC-R}{IC+R}$$

Ecuación 11.

donde:

IC: banda del Infrarrojo cercano (banda 3)

R: banda del Rojo (banda 2)

Una vez calculado NDVI se transformó la imagen a un raster con resolución de 15 m.

El área de estudio el NDVI se clasificó en cuatro rangos de -0.88 a 0.15, de 0.15 a 0.20, 0.20 a 0.40 y de 0.40 a 0.66 (Cuadro 19). El primer rango representa sitios con poca o nula vegetación (suelo desnudo), el segundo representa suelos con vegetación baja como matorrales, pastizales xerófilos, el tercer rango corresponde a suelos cubiertos por vegetación mediana, y el último rango pertenece a suelos con vegetación alta. Más del 70% de la zona se encuentra en la porción clasificada como suelo desnudo, seguido por áreas con vegetación mediana, vegetación baja y vegetación alta.

Cuadro 19. Rangos del Índice de Vegetación Normalizada.

Rangos de NDVI	Descripción	Área (km ²)	Área (%)
-0.88 - 0.15	Suelo desnudo	4,847.19	78.59
0.10 - 0.20	Vegetación baja	525.53	8.52
0.20 - 0.40	Vegetación mediana	773.05	12.53
0.4 - 0.66	Vegetación alta	21.69	0.35
Total general		6,167.46	100.00

La Figura 51 muestra la distribución geográfica de los valores de NDVI en el área de estudio. Se observa que la parte sur se concentran los sitios con mejor cobertura vegetal, mientras que la porción norte se tienen amplias zonas sin vegetación.

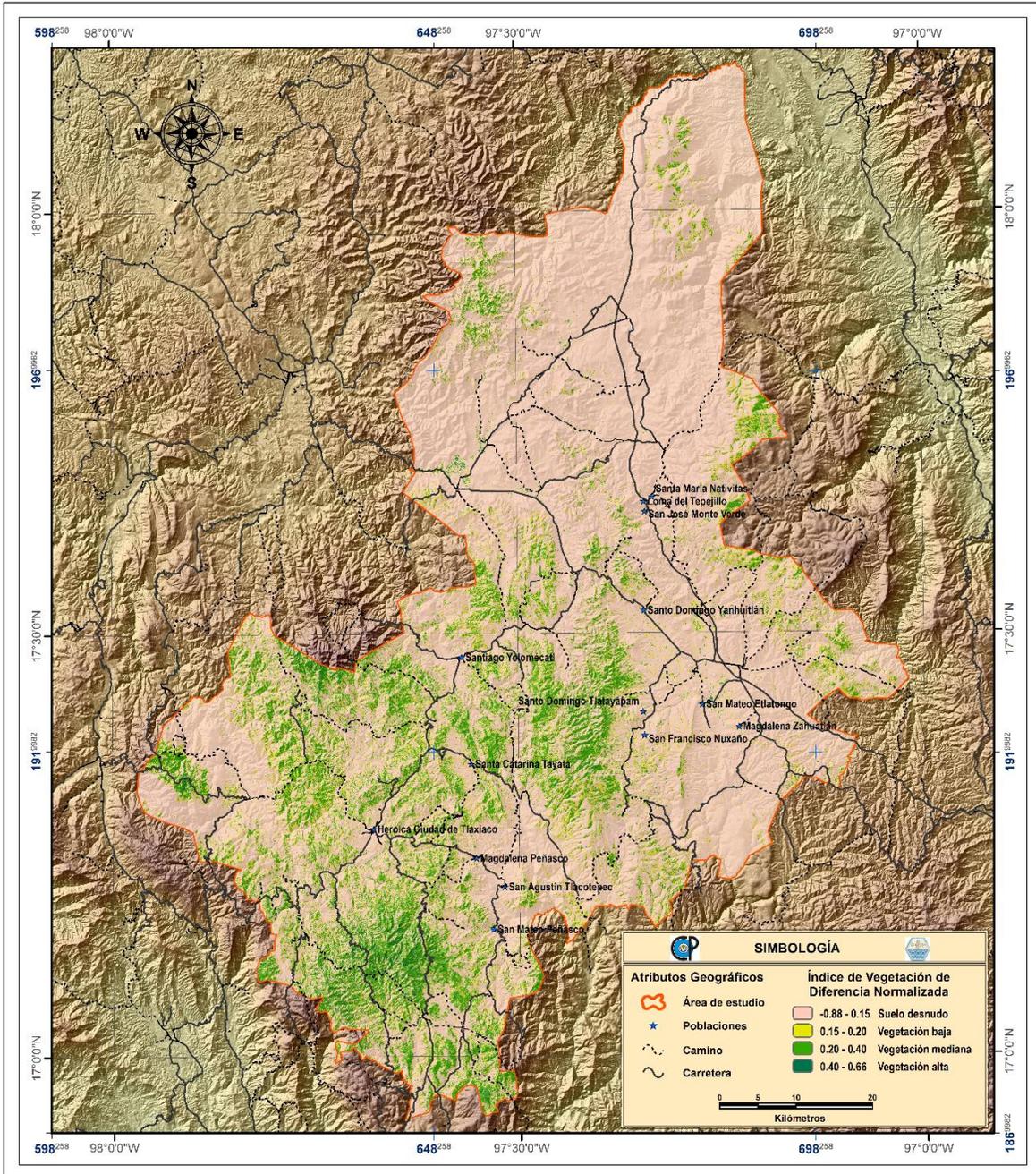


Figura 51. Clasificación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

5.3.5.5. Variable antropogénica

Las actividades antrópicas como la agricultura, la ganadería, minería, construcción, son detonadoras de la degradación física del suelo. Así, la densidad de población en el medio rural es indicador indirecto de la presión sobre los recursos naturales y en particular sobre el recurso suelo.

(a) Densidad de población

Las densidades de población tienen una influencia importante en la degradación física causada por erosión hídrica al ir incrementado las fronteras agrícolas y pecuarias. La elevada densidad de población produce alta degradación física, química y biológica de los suelos.

La densidad de población se obtuvo con la función de Kernel, la cual se fundamenta en una función de cuarto grado descrita por Silverman (1986). En esta función calcula una magnitud, por unidad de área, a partir de la población de cada punto para generar una superficie ajustada uniformemente a cada punto. Esta variable se obtuvo con el software ArcGis con los comandos Spatial Analyst Tools>Density> Kernel Density (Figura 52).

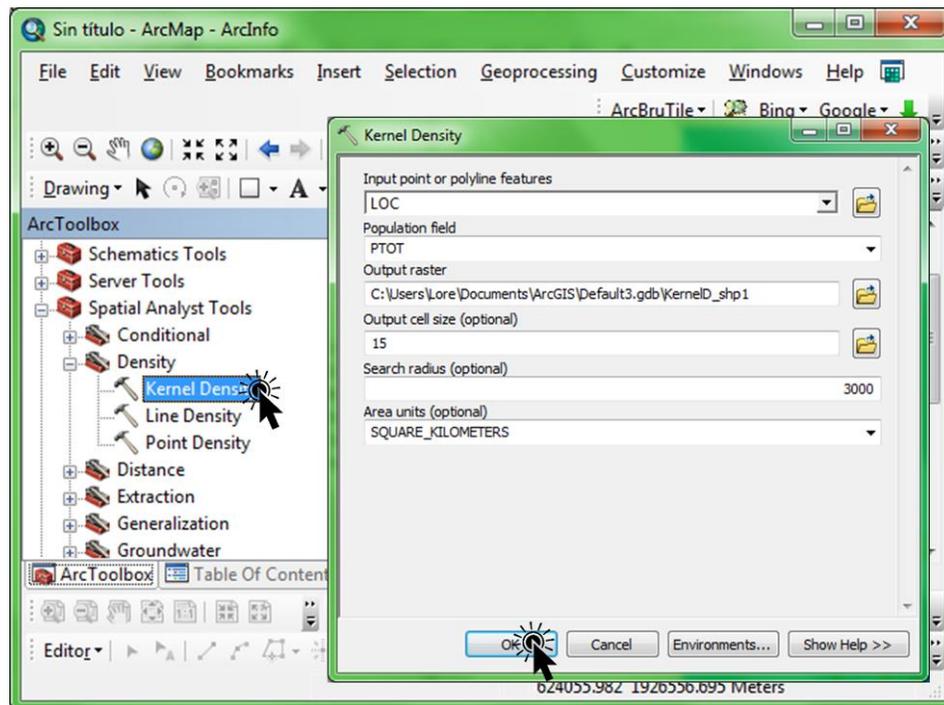


Figura 52. Calculo de densidad de población con Kernel.

En el área de estudio el 51.33% de la superficie tiene una densidad de población de 0 a 10 hab/km², el 23.48% presenta una densidad media baja (10 a 25hab/km²), el 14.34% se considera como media (25 a 50hab/km²), el 8.38% es media alta (50 a 100hab/km²) y solo el 2.47% se considera como alta (Cuadro 20).

Cuadro 20. Rangos de densidad de población.

Densidad de población (hab/km ²)	Descripción	Área (km ²)	Área (%)
0 - 10	Baja	3,166.01	51.33
10 - 25	Media baja	1,447.90	23.48
25 - 50	Media	884.43	14.34
50 - 100	Media alta	516.83	8.38
>100	Alta	152.29	2.47
Total general		6,167.46	100.00

La distribución de los rangos de población, se muestra en la Figura 53, se observa que las altas densidades de población se concentran en los grandes centros de población y al norte es donde se tiene la menor concentración de población.

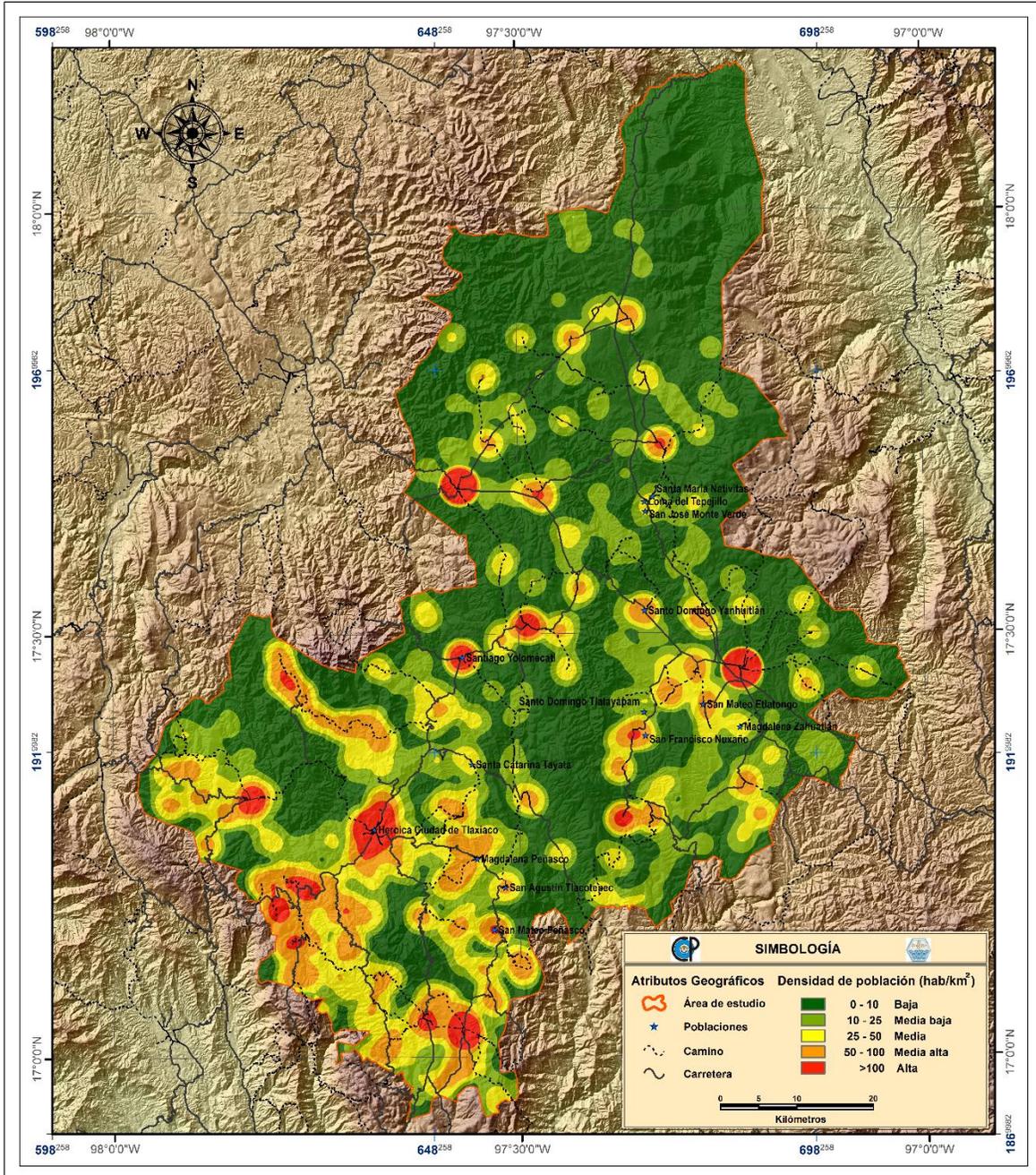


Figura 53. Clasificación de Densidad de Población.

5.3.6. Escalamiento de variables

Para realizar la corrida del Análisis de Componentes Principales, fue necesario escalar las variables a un rango de 0 – 250 con el propósito de homogenizar la información de cada variable (Figura 54).

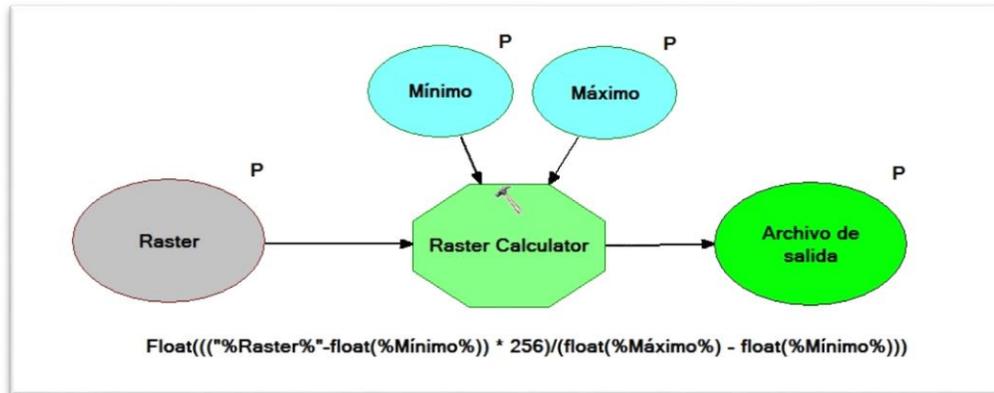


Figura 54. Model builder para escalar las variables.

5.3.7. Análisis de componentes principales

Para las variables seleccionadas, través de ArcGis 10, se realizó el análisis de componentes principales (ACP). Como resultado del ACP se obtuvo la matriz de covarianza, la matriz de correlación de datos, los valores propios y el peso de la variable de acuerdo con la proporción que explica (Figura 55).

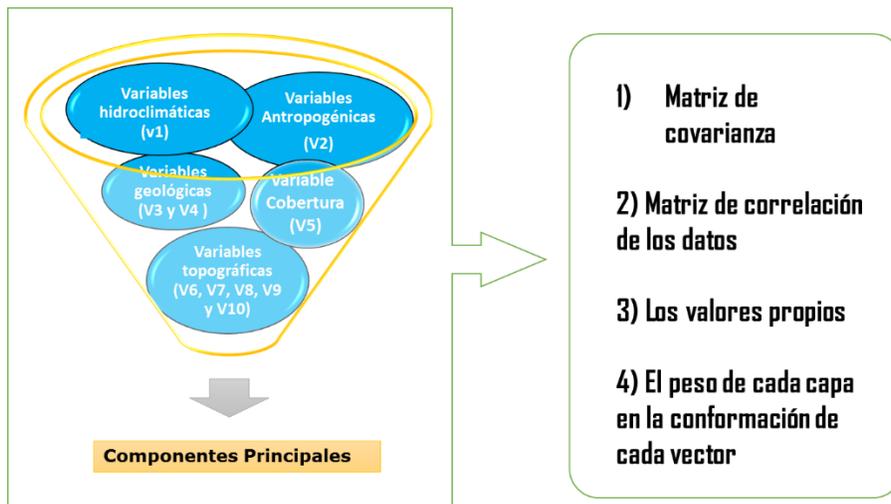


Figura 55. Proceso de Análisis de Componentes Principales.

Las matrices, los valores propios y los porcentajes de variación se utilizaron para definir las variables que más influyen en la formación de cárcavas.

5.3.8. Clasificación supervisada para determinar la susceptibilidad a la formación de cárcavas

Una vez seleccionados los componentes que concentran mayor cantidad de información se integró una imagen multibanda y sobre esta se definió, a partir de las áreas de entrenamiento, la posibilidad de cada pixel para generar cárcavas.

5.3.8.1. Áreas de entrenamiento

A partir de los sitios visitados en campo y las imágenes de satélite de Google Earth Pro se digitalizaron los polígonos de las cárcavas observadas. Para las áreas delimitadas se extrajo información de las siguientes capas raster: curvatura vertical, curvatura horizontal, pendientes, TPI, ITH, NDVI, densidad de población, longitud de la pendiente, distancia a picos, distancia a fallas, altitud, densidad de corrientes, clima, orientación de la pendiente y porcentaje de cobertura vegetal. A estos datos se les realizó un análisis de frecuencias a fin de identificar las variables con tendencia clara y los rangos que mejor explican la presencia de cárcavas. Así, a los rangos seleccionados se asignó el valor de 1, con el propósito de realizar un algebra de mapas booleana y retomar solo aquellos pixeles con una influencia definida. Es decir, se consideraron los pixeles que se encontraban dentro de los polígonos digitalizados. El raster resultante, con los rangos de mayor influencia, se convirtió a capa vector a fin de establecer estos pixeles como áreas de entrenamiento para fines de clasificación (Figura 56).

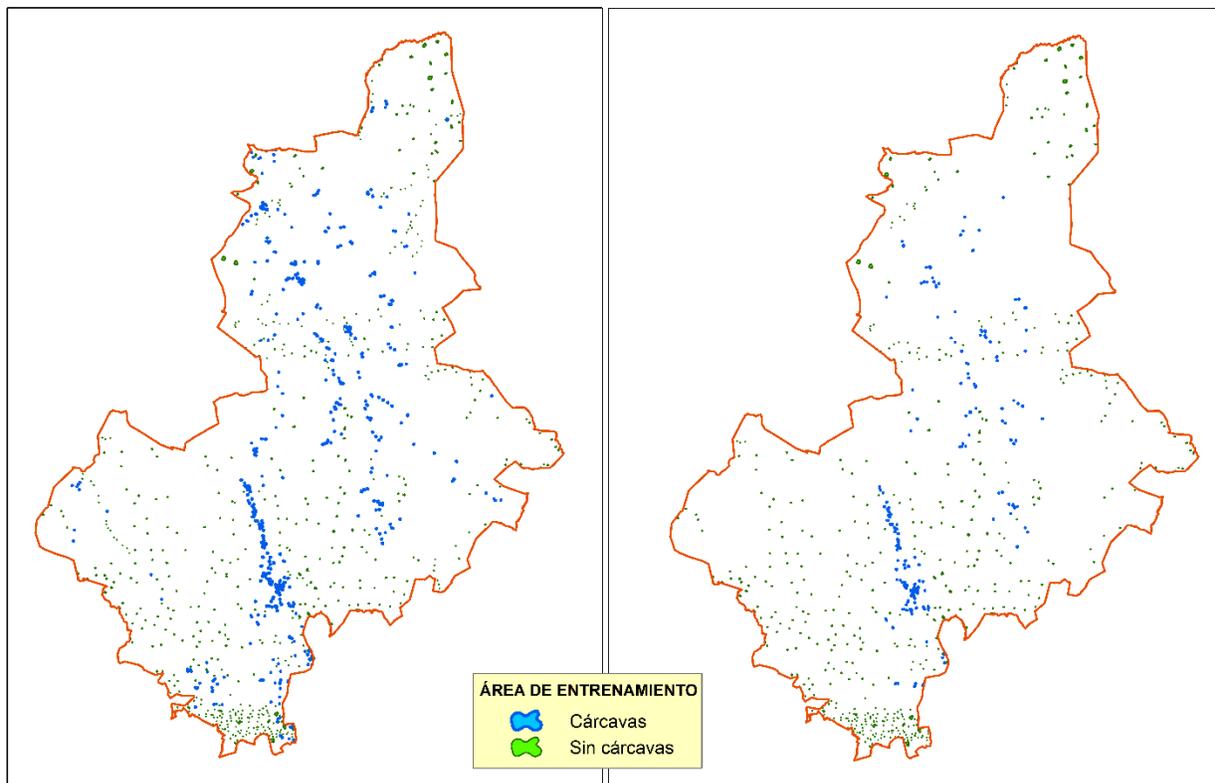


Figura 56. Áreas de entrenamiento.

Se realizó un análisis de frecuencias de las siguientes capas curvatura de perfil, curvatura horizontal, pendientes, IPT, ITH, NDVI, densidad de población, longitud de pendiente, distancia a picos, distancia a fallas, altitud, densidad de corrientes, climas, orientación, y porcentaje de cobertura.

5.3.8.2. Creación de firmas ambientales⁶

Para la creación de las firmas ambientales se usó la herramienta *Spatial Analyst Tools>Multivariate> Create Signatures* de Arc Gis. Este procedimiento genera, en un archivo gsg, los valores estadísticos (matrices de medias y covarianzas) de las áreas de entrenamiento correspondientes a la imagen multicapa.

⁶ Firmas ambientales: Valores de luz reflejada por las variables ambientales o los matices de estas.

5.3.8.3. Clasificación supervisada

La clasificación se realizó con el método de máxima probabilidad o máxima verosimilitud. Este método asume que las muestras se ajustan a una distribución normal, lo que permite, a partir de las firmas ambientales (medias, varianzas-covarianzas), determinar la probabilidad de un pixel para desarrollar una cárcava.

5.3.8.4. Puntos de inspección

De acuerdo Rossiter *et al.* (2002) la intensidad de levantamiento de suelos se basa en la escala en que se publica, la intensidad de inspección y el objetivo del estudio. Para una escala de trabajo 1:50 000, considerando una intensidad de inspección medio (semidetallado) y un objetivo con fines de evaluar las tierras (planear), la densidad es de recomendada es de 1 a 5 sitios por km². Con el rango anterior se propuso 1.1 puntos de inspección por km².

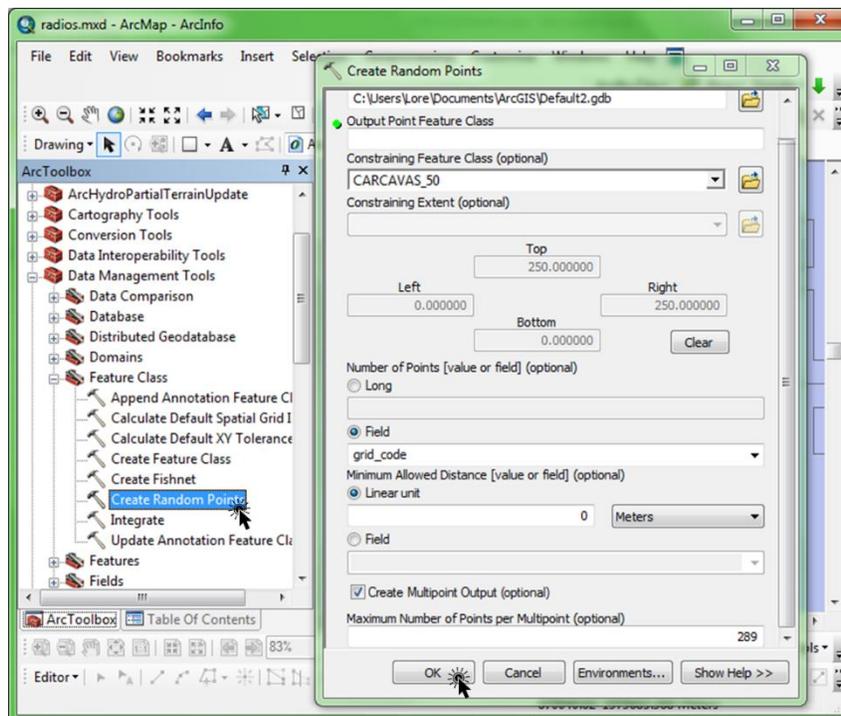


Figura 57. Procedimiento para crear puntos al azar.

De ese modo, en ArcGis se generaron 289 puntos al azar sobre la cobertura clasificada como cárcavas. Los comandos para crear los puntos fue *Data Management Tools>Feature class> Create Random Points* (Figura 57). Para cada uno de los puntos

de inspección se marcaron 3 radios de curvatura: 50, 100 y 150m. El radio máximo se estableció de tal manera que el área a evaluar, por punto, cubriera aproximadamente 7 ha. Para verificar los resultados se realizó sobre imágenes de Google Earth Pro, se midió para cada radio de curvatura el porcentaje de cobertura con cárcavas. En la Figura 58 se muestra, a nivel de ejemplo, los radios evaluados y sus correspondientes porcentajes de afectación por cárcavas.

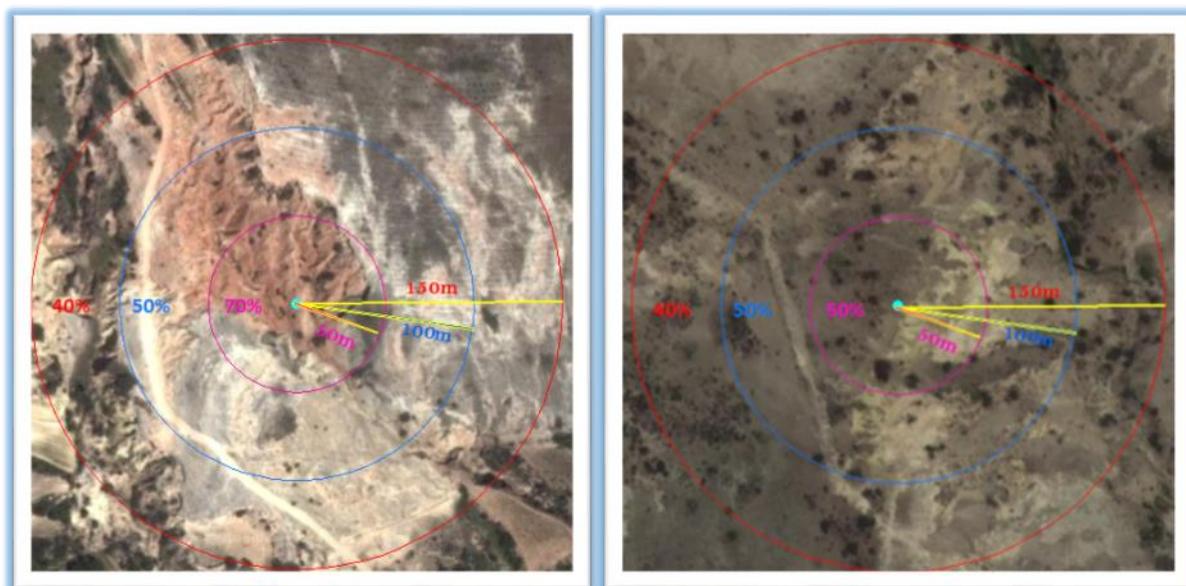


Figura 58. Ejemplos de inspección en Google earth.

5.3.8.5. *Confiabilidad de la clasificación*

Para medir la confiabilidad de la capa de cárcavas, se contabilizó la cantidad de radios de curvatura con un porcentaje de afectación superior al 50% y se analizó con cual radio se obtienen los mejores resultados.

6. RESULTADOS

6.1. Variables seleccionadas

6.1.1. Pendiente topográfica

Al analizar la distribución de la pendiente, sobre los polígonos utilizados como semillas para clasificación supervisada, se observa las cárcavas se presentan con mayor frecuencia en el rango 2.5 a 6.5% (29.16%) y en el intervalo 7.5 a 22.5% (51.57%) (Figura 59). Las pendiente más bajas se asocian a atrincheramientos en las inmediaciones de valles intermontanos y las más altas a cárcavas ubicadas en lomeríos compuestos de materiales residuales. Aun cuando en pendientes superiores existe mayor riesgo de erosión, es menos común su presencia ya que generalmente estos terrenos son someros y cubiertos con vegetación.

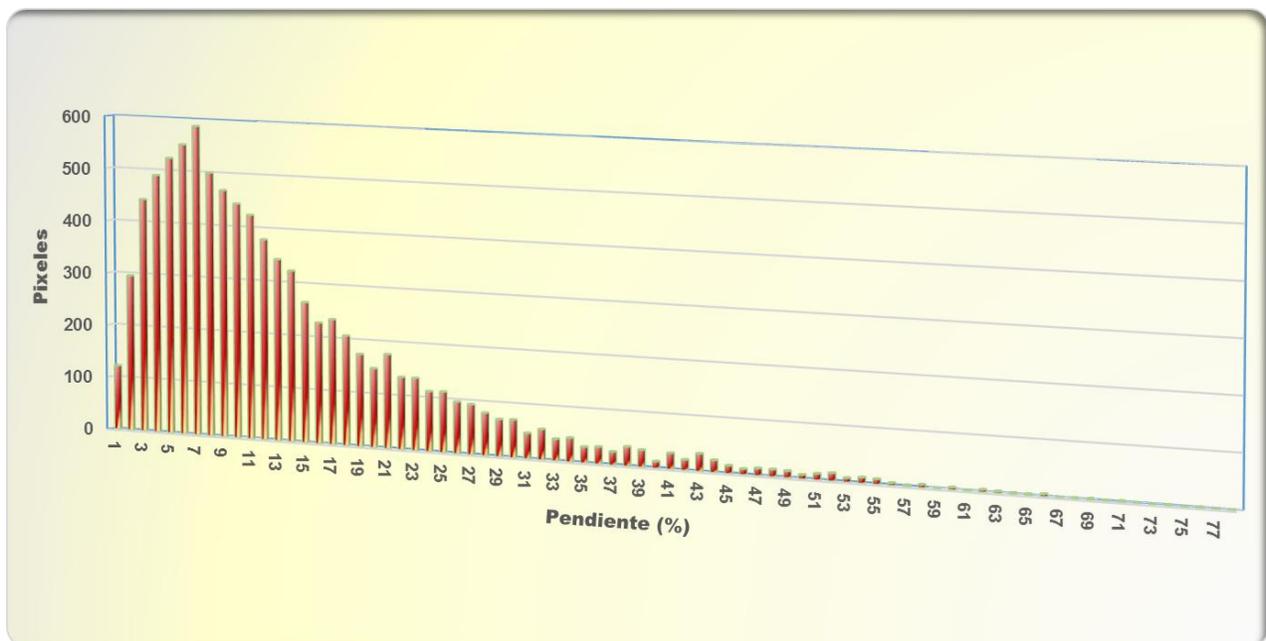


Figura 59. Distribución de las cárcavas en función de la pendiente del terreno (áreas de entrenamiento).

Para la zona centro de México se encontró que las mayoría de las cárcavas se desarrollan en rangos que va n de 0 a 18% ubicándose la mayor parte entre 2 y 8% (Palacios, 1990), en el área de estudio se ubican en pendientes 1 a 77%, pero la mayoría están en rangos de 2 a 20%. Los riegos a erosión severa en pendientes mayores al 20%

son altos, sin embargo, en la mayoría de los casos existe la protección de la vegetación que evita la pérdida de suelo.

6.1.2. Curvatura vertical o de perfil (CV)

Según Klingseisen *et al.* (2008), la velocidad de la corriente varía a largo de una ladera de acuerdo con su curvatura vertical. Al analizar las cárcavas, dentro de los polígonos de entrenamiento, las cárcavas en el área de estudio se presentan en curvaturas verticales entre -3.4 y 3.45; principalmente en el rango -0.75 y -0.05 (27.15%) y 0.05 y 1.05 (68.49%) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El rango negativo indica que la velocidad de la corriente se incrementa conforme desciende, lo que genera flujos con mayor potencial para causar erosión en materiales residuales consolidados en los lechos de las cárcavas. Por otra parte, los valores positivos se relacionan con cárcavas localizadas en zonas donde la sedimentación es el proceso dominante, es decir, estas se localizan en las inmediaciones de los valles aluviales.

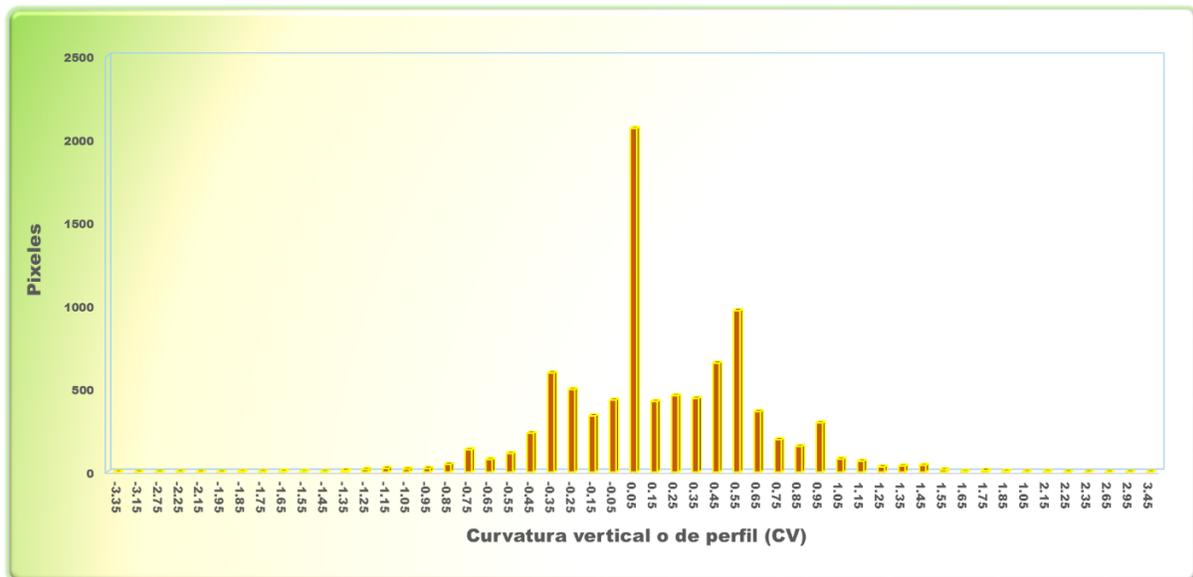


Figura 60. Distribución de las cárcavas en función de la curvatura vertical (áreas de entrenamiento).

La mayor parte de las cárcavas se ubicaron en curvaturas cóncavas (valores positivos) que representa flujo acelerado que provoca el desprendimiento del suelo provocando una erosión acelerada.

6.1.3. Curvatura Horizontal o plana (CH)

La curvatura horizontal indica si el escurrimiento es convergente o divergente. Con base en la Figura 61, las cárcavas en la zona se localizan principalmente entre -4.75 y 5.65 (adim.) y con mayor frecuencia en los rangos -1.75 a -0.45 (32.7%) y entre 0.05 y 1.75 (64.5%). En general, el rango negativo corresponde a flujos convergentes asociados a topografías cercanas a valles donde se generan corrientes con mayor acumulación de caudal y potencial erosivo, por otro lado, las curvaturas positivas se vinculan a flujos divergentes, como ocurre en topografías cónicas (volcánicas) con pendientes más pronunciadas.

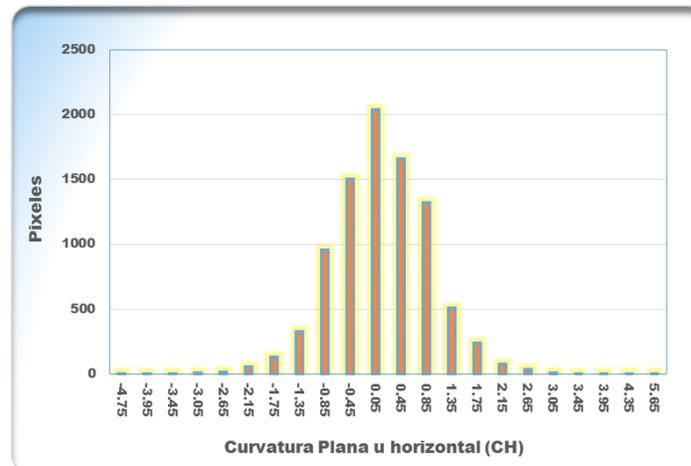


Figura 61. Distribución de las cárcavas en función de la curvatura horizontal (áreas de entrenamiento).

Las cárcavas con curvatura horizontal superior a 0 son sitios donde el flujo converge formando parte de una corriente acelerada que genera flujos concentrados aumentando el riesgo a erosión.

6.1.4. Longitud de la pendiente

La longitud de la pendiente es un factor topográfico que describe la longitud de la ladera, su importancia en la erosión hídrica de suelos radica en que es la distancia horizontal del punto donde comienza el escurrimiento hasta donde disminuye el grado de la pendiente al punto que se da la sedimentación (Oñate-Valdivieso, 2004). Conforme incrementa la longitud de la pendiente, aumenta la velocidad de escorrentía y la capacidad de arrastre

de sedimentos, en laderas con mayor longitud es más frecuente la aparición de canalillos que con el paso del tiempo se convierten en cárcavas.

Las cárcava en el área de estudio se presentan en laderas con longitudes entre 0 y 1300 m, pero principalmente en longitudes entre 10 y 30 m (22.18%) y en longitudes de 35-110m (33.52%). En general se observa que el rango más bajo corresponde a áreas de depósitos aluviales y mientras las longitudes mayores a terrenos de ladera baja. (Figura 62).

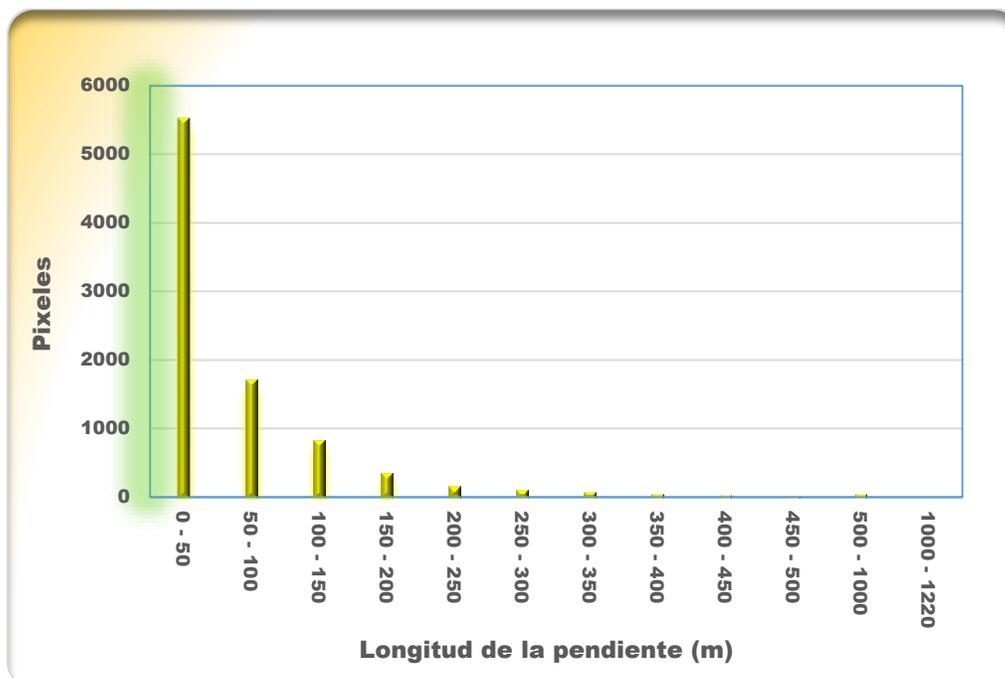


Figura 62. Distribución de las cárcavas en función de la longitud de la pendiente (áreas de entrenamiento).

6.1.5. Índice de posición topográfica

Dentro de los límites de los polígonos de entrenamiento se observa la mayoría de las cárcavas se ubican en $TPI > 1$ y $TPI < 1$, es decir, en crestas (49.69%) y en valles intermontanos (42.22%), respectivamente. Esto indica que las cárcavas ocurren principalmente en las crestas con presencia de materiales residuales de toba volcánica y en las inmediaciones de los valles intermontanos donde los escurrimientos producen, en los materiales aluviales depositados con anterioridad, atrincheramientos. (Figura 63).

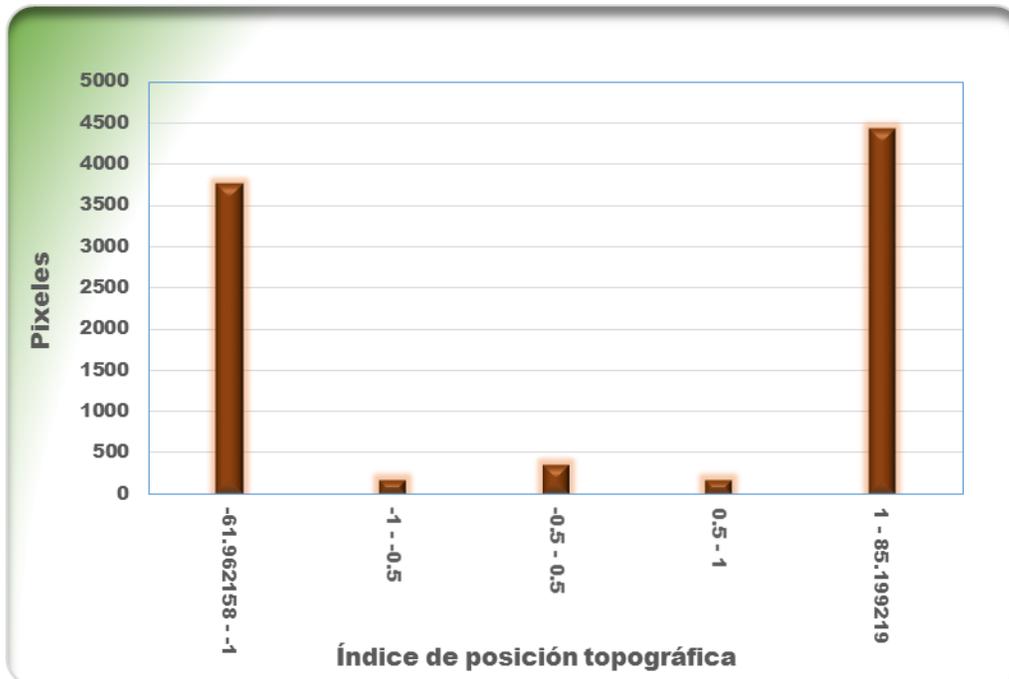


Figura 63. Distribución de las cárcavas en función del Índice de posición topográfica (áreas de entrenamiento).

6.1.6. Índice topográfico de humedad

El ITH es utilizado para identificar sitios donde se concentra la humedad en el suelo. Su valoración permite, por ejemplo, en correlacionar el deslizamiento en taludes con la humedad del suelo. Al analizar el índice topográfico de humedad, en los límites de los polígonos de entrenamiento, se encontró que las cárcavas se distribuyen entre 0 y 14 $m^2 m^{-1} \circ$; pero ocurren principalmente entre 0.0 y 2.0 $m^2 m^{-1} \circ$ (42.43%), que se relacionan a acumulaciones medias de humedad, de pendiente moderada y materiales residuales de toba volcánica; también estas ocurren entre 2.0 y 7.0 $m^2 m^{-1} \circ$ (56.64%) que corresponden a áreas con las mayores acumulaciones de agua, pendientes bajas y materiales aluviales, características que se conjugan en las inmediaciones de los valles intermontanos. (Figura 64).

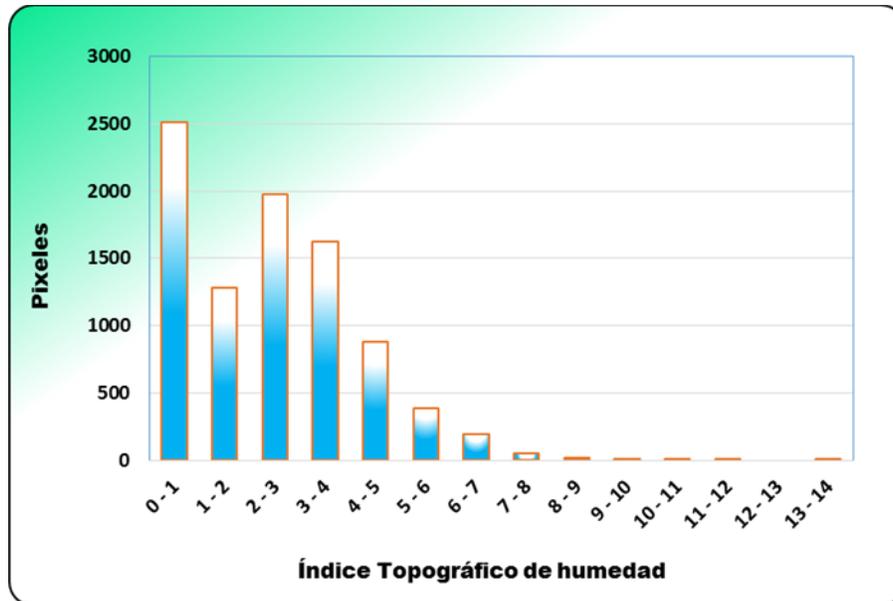


Figura 64. Distribución de las cárcavas en función del Índice Topográfico de humedad (áreas de entrenamiento).

Como este índice representa la distribución de la humedad en el suelo y depende la geomorfología, los valores superiores se ubican en zonas planas y los más bajos se ubican en laderas pronunciadas y lomeríos, la mayoría de las cárcavas en el área de estudio se ubican en geformas diferentes a zonas planas por lo que las escorrentías tienden a acelerarse y transportar importantes cantidades de sedimentos.

6.1.7. Distancia a picos

La distancia a picos topográficos, identificados muchos de ellos como volcanes, es una variable importante ya que de esta dependen los sitios donde se depositaron las cenizas volcánicas y tobas, las cuales son materiales con alta susceptibilidad a la erosión.

Al analizar el histograma de frecuencias de distancia a picos, para los polígonos de entrenamiento, en la Figura 65 las cárcavas se distribuyen a una distancia, a los picos topográficos más cercanos, de 0 a 1 300 m, pero se concentran a distancias entre 100 y 400 m (46.91%) y entre 500 y 900 m (29.66%). Las cárcavas más cercanas a picos se inscriben a materiales volcánicos residuales, que circundan antiguas estructuras volcánicas, y las más alejadas a depósitos aluviales perimetrales a los valles intermontanos.

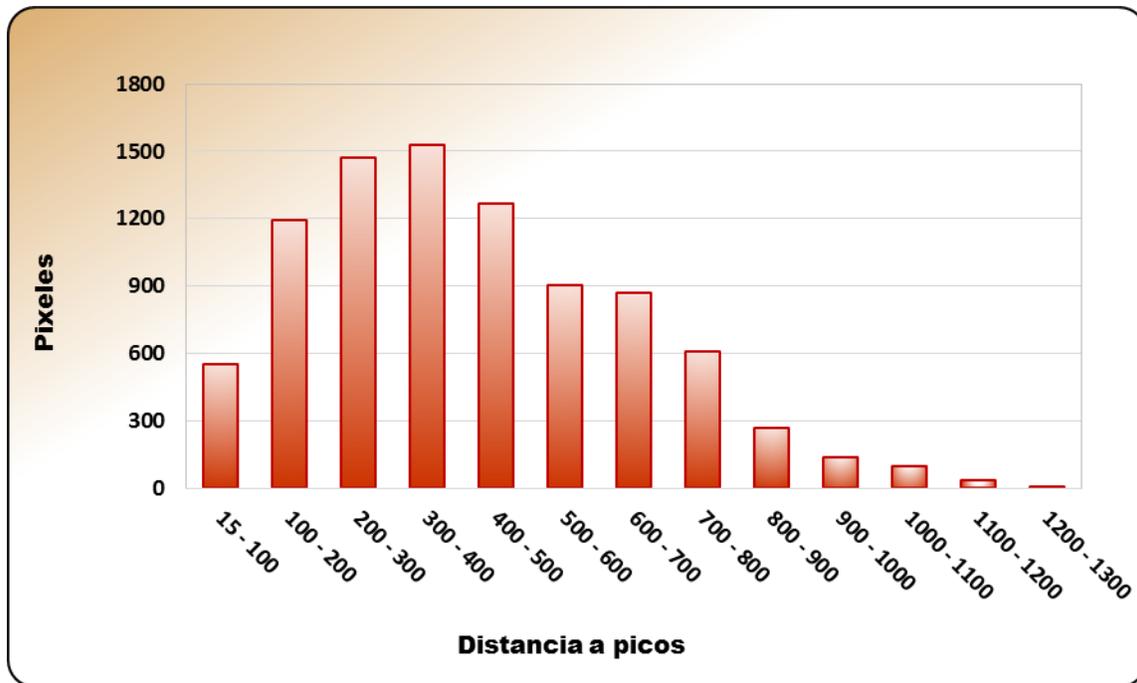


Figura 65. Distribución de las cárcavas en función de la distancia a picos (áreas de entrenamiento).

6.1.8. Distancia a fallas

Según los polígonos de entrenamiento, la zona con cárcavas se ubican a una distancia entre 0 y 12 000 m de la falla Tamazulapam, la mayor frecuencia ocurre de 0 a 4 000 m (49.87%), seguido del rango 4 000 a 10 000 m (45.87%). Así, las cárcavas más cercanas a la falla están asociadas a una mayor actividad volcánica y las más alejadas a la formación de valles aluviales. En este sentido, Irigaray y Chacón (2002) mencionan que la distancia a fallas es una variable que contribuye a la inestabilidad de las masas de suelo. (Figura 66).

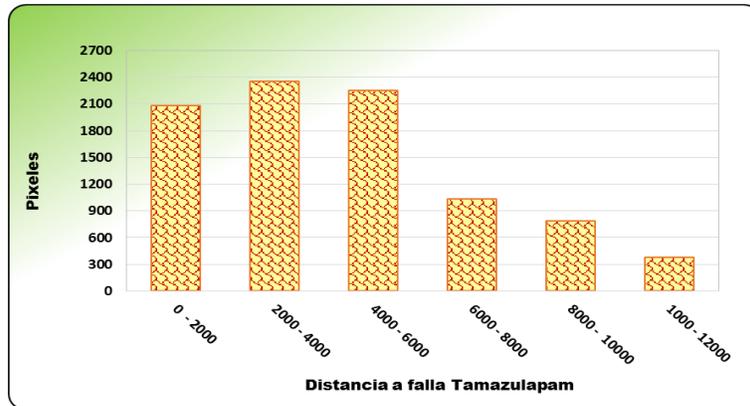


Figura 66. Distribución de las cárcavas en función de la distancia a fallas (áreas de entrenamiento).

6.1.9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El índice de vegetación de diferencia normaliza es una variable importante en la formación de cárcavas por el aporte de datos que proporciona sobre la existencia de vegetación en un determinado lugar. Los valores de NDVI bajos representan sitios con escasa cobertura vegetal, dato importante para identificar sitios con probables problemas de erosión. Las cárcavas en el área de estudio presentan valores de NDVI entre -0.54 y 0.29 concentrándose estas en el rango entre -0.16 y 0.2 (99.02%), es decir se concentran en suelo desnudos y vegetación baja (López-Perez *et al.*, 2015). Esto concuerda con los resultados de Alatorre y Bequería (2009), quien menciona que las cárcavas se establecen principalmente en zonas marginales donde es difícil que se establezca la vegetación en pendientes superiores al 15%. (Figura 67).

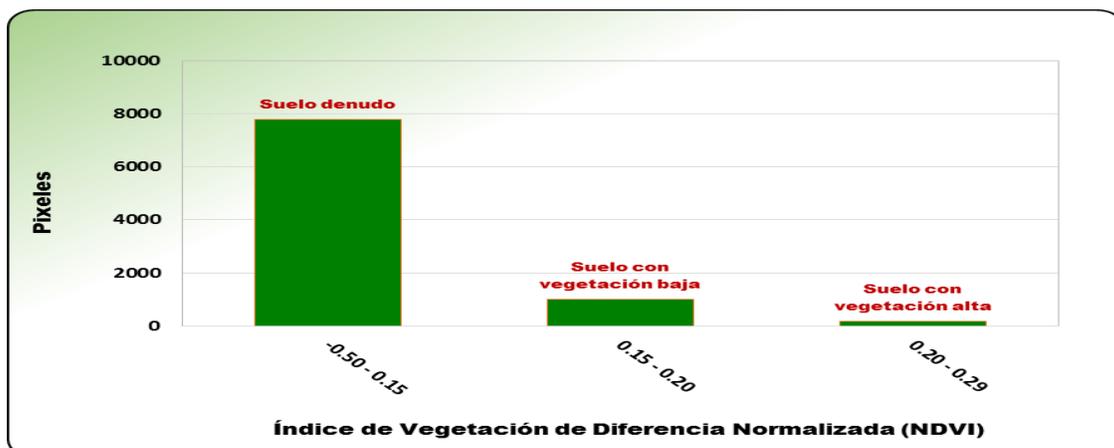


Figura 67. Distribución de las cárcavas en función del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. (Áreas de entrenamiento).

6.1.10. Densidad de Población

Para los polígonos de las áreas de entrenamiento, en el área analizada se encontró que las cárcavas se ubican en sitios con densidades entre 0 a 170 hab km⁻², distribuidas principalmente los rangos 5 - 30 hab km⁻² (60.91%) y 30 - 70 hab km⁻² (31.40%). Las densidades bajas de población corresponden a cárcavas localizadas en sitios de difícil acceso y escaso potencial agrícola mientras que las cárcavas localizadas en lugares con densidades medias corresponden a entornos con mayor actividad agrícola, como ocurre en las inmediaciones de los valles aluviales. (Figura 68). Esto indica que las poblaciones grandes realizan sus actividades agropecuarias principalmente en áreas planas y a kilómetros de los centros de población, lo que explica la menor cantidad de cárcavas en áreas cercanas a los centros de población.

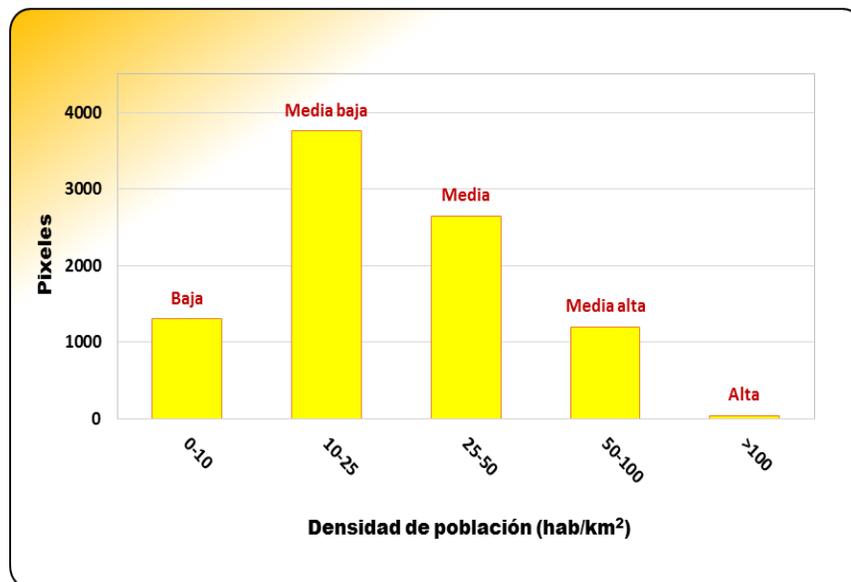


Figura 68. Histograma de Densidad de Población.

6.2. Análisis de componentes principales

El resultado del análisis de componentes principales fue una imagen multicapa (10 capas), en la capa 1 recopila la mayor variabilidad, la cual disminuye sucesivamente con el resto de las capas. Otro producto del ACP son las matrices estadísticas donde se presenta la covarianza, correlación, vectores propios y autovalores de las variables en cada componente principal; habiendo tantos componentes principales como variables.

En la matriz de covarianzas, resultado del ACP para las diez variables analizadas, se observa en la diagonal (Cuadro 21), que la distancia a la falla Tamazulapam tiene mayor la variabilidad (55.8%), seguida de la distancia a picos (12.3), índice topográfico de humedad (11.1%), NDVI (9.0%), pendiente (5.0%), índice de posición topográfica (2.8%), densidad de población (1.5%), longitud de la pendiente (1.3%), curvatura vertical (0.6%) y curvatura plana (0.5). Esto implica que las variables DF, DP, ITH, NDVI explica el 88.2% de la variabilidad de la información, es decir, son las que más aportarán a los resultados.

Cuadro 21. Matriz de covarianzas del ACP.

Variable	CH	CV	D	DF	DP	ITH	LP	NDVI	PEN	ITP
CH (Adim.)	15.14	11.87	-0.01	0.00	-2.79	-23.19	-6.12	3.02	-5.24	12.52
CV (Adim.)	11.87	17.68	0.01	-0.38	-0.99	-26.81	-8.00	2.28	-1.48	8.96
D (hab km ⁻²)	-0.01	0.01	42.86	15.45	-1.11	5.62	-1.34	2.51	-5.07	-0.37
DF (m)	0.00	-0.38	15.45	1590.44	-10.34	-17.74	1.70	44.64	27.83	0.60
DP (m)	-2.79	-0.99	-1.11	-10.34	349.72	32.37	14.53	-22.28	-13.56	-40.53
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-23.19	-26.81	5.62	-17.74	32.37	317.26	56.79	-9.97	-20.56	-45.25
LP (m)	-6.12	-8.00	-1.34	1.70	14.53	56.79	37.04	-1.64	1.22	-14.97
NDVI	3.02	2.28	2.51	44.64	-22.28	-9.97	-1.64	256.60	-0.10	9.51
PEN (%)	-5.24	-1.48	-5.07	27.83	-13.56	-20.56	1.22	-0.10	143.48	-13.82
IPT (Adim.)	12.52	8.96	-0.37	0.60	-40.53	-45.25	-14.97	9.51	-13.82	79.31

Al observar la matriz de correlaciones (Cuadro 22) destaca que la curvatura vertical y horizontal presenta alta correlación entre ellas (0.73) por lo que se puede prescindir de una de las dos sin alterar significativamente los resultados. Entre longitud de pendiente e índice topográfico de humedad se tiene una correlación intermedia (0.52), debido a que el índice de humedad considera la forma y longitud de pendiente para modelar la distribución de la humedad en el terreno.

Cuadro 22. Matriz de correlaciones del ACP.

Variable	CH	CV	D	DF	DP	ITH	LP	NDVI	PEN	IPT
CH (Adim.)	1.0	0.73	0.00	0.00	-0.04	-0.33	-0.26	0.05	-0.11	0.36
CV (Adim.)	0.73	1.0	0.00	0.00	-0.01	-0.36	-0.31	0.03	-0.03	0.24
D (hab km ⁻²)	0.00	0.00	1.0	0.06	-0.01	0.05	-0.03	0.02	-0.06	-0.01
DF (m)	0.00	0.00	0.06	1.0	-0.01	-0.02	0.01	0.07	0.06	0.00
DP (m)	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	1.0	0.10	0.13	-0.07	-0.06	-0.24
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-0.33	-0.36	0.05	-0.02	0.10	1.0	0.52	-0.03	-0.10	-0.29
LP (m)	-0.26	-0.31	-0.03	0.01	0.13	0.52	1.0	-0.02	0.02	-0.28
NDVI	0.05	0.03	0.02	0.07	-0.07	-0.03	-0.02	1.0	0.00	0.07
PEN (%)	-0.11	-0.03	-0.06	0.06	-0.06	-0.10	0.02	0.00	1.0	-0.13
IPT (Adim.)	0.36	0.24	-0.01	0.00	-0.24	-0.29	-0.28	0.07	-0.13	1.00

Los vectores propios, generados por el ACP (Cuadro 23), muestra que el componente uno (CP1) la variable que tiene más peso es la distancia a la falla de Tamazulapam, en CP2 y CP3 la distancia a picos y el índice topográfico de humedad, en CP4 el NDVI, en CP5 la pendiente, en CP6 el índice de posición topográfica, en CP7 la densidad de población, en CP8 la longitud de la pendiente, en CP9 la curvatura vertical, plana y longitud de la pendiente y en CP10 la curvatura plana y la curvatura vertical.

Cuadro 23. Matriz de vectores propios del ACP.

Variable	Componentes Principales (CP)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CH (Adim.)	0.00	0.05	0.06	0.01	0.07	0.14	0.02	0.23	0.59	-0.75
CV (Adim.)	0.00	0.05	0.07	0.01	0.04	0.09	0.03	0.35	0.66	0.65
D (hab km ⁻²)	0.01	-0.01	-0.02	0.01	0.05	-0.03	0.99	-0.13	0.03	0.00
DF (m)	1.00	-0.02	0.00	-0.03	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
DP (m)	-0.01	-0.74	0.62	0.20	-0.01	0.12	0.01	0.00	-0.03	0.00
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-0.01	-0.59	-0.75	0.02	-0.02	0.20	0.01	0.19	0.00	0.00
LP (m)	0.00	-0.13	-0.13	0.01	-0.06	-0.06	-0.13	-0.86	0.45	0.05
NDVI	0.03	0.17	-0.11	0.98	-0.04	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00
PEN (%)	0.02	0.07	0.04	-0.04	-0.96	0.24	0.06	0.03	0.01	-0.02
IPT (Adim.)	0.00	0.19	0.05	0.00	0.24	0.92	0.00	-0.18	-0.12	0.05

Los autovalores para cada componente principal, generados por el ACP, proporcionan el porcentaje de variación que explica cada uno de ellos. Estos valores son útiles para seleccionar el número de componentes principales con la mayor concentración de datos

originales (Cuadro 24). La manera más común de seleccionar el número de componentes idóneos es a través de una gráfica de densidad se observe el porcentaje acumulado de autovalores por componente principal (Figura 69). En este caso, para determinar la probabilidad de presencia de cárcavas, se seleccionaron los primeros seis componentes principales que explican el 96.7% de la información contenida en las diez variables analizadas.

Cuadro 24. Matriz de autovalores y porcentaje de variación explicada del ACP.

VARIABLE	COMPONENTES PRINCIPALES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Autovalores	1593.00	394.95	307.25	250.44	146.67	63.79	42.61	25.65	20.96	4.21
%	55.9	13.9	10.8	8.8	5.1	2.2	1.5	0.9	0.7	0.1
% ACUM	55.9	69.8	80.5	89.3	94.5	96.7	98.2	99.1	99.9	100.0

El número de componentes se elige cuando se presenta un cambio de pendiente importante, en este caso sucede en el segundo componente (variabilidad explicativa del 69.8%). Sin embargo, no se seleccionaron estos ya que la variabilidad explicativa es intermedia, por tal motivo se optó por considerar el siguiente cambio de pendiente (punto 6) donde la curva se estabiliza. Así, para el CP=6 se tiene una variabilidad acumulada del 96.7%.

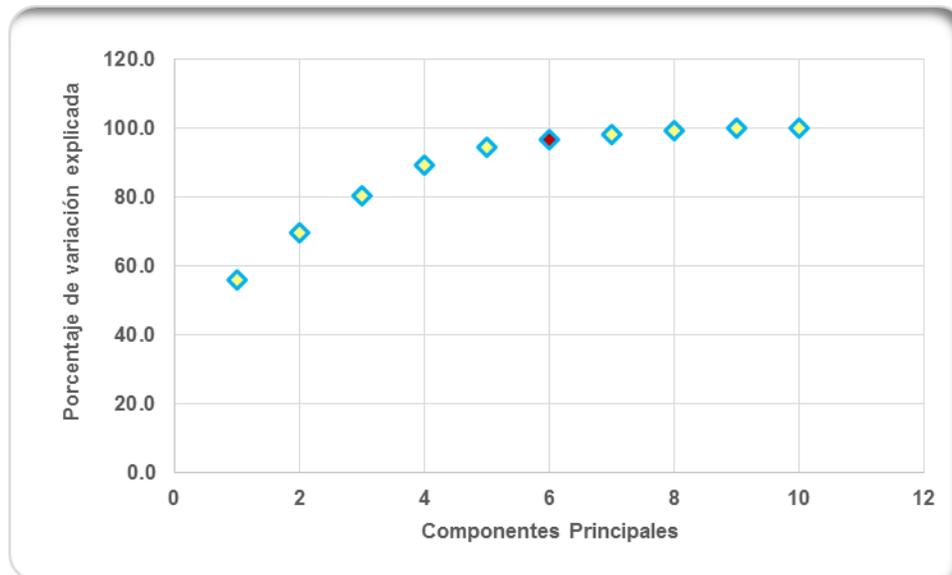


Figura 69. Grafica de densidad de los componentes principales.

6.2.1. Descripción de los Componentes principales seleccionados

A continuación, se detallan los 6 componentes principales que resultaron de la gráfica de densidad.

- **Componente 1.** Está influenciado en mayor medida por la distancia a fallas, seguido por NDVI, pendiente del terreno, densidad de población, distancia a picos y índice topográfico de humedad; estos tres últimos aun cuando su signo es negativo concentran la misma variabilidad. Este componente básicamente concentra información geológica.
- **Componente 2.** Las variables con mayor influencia en este componente son distancia a picos, índice topográfico de humedad, índice de posición topográfica y NDVI. Al considerar los pesos totales agrupando las variables, el 37.6% está dominado por la geología, seguida por la hidrología (29.2%), por la topografía (24.3%), la cubierta vegetal (8.4%) y las antropogénica (0.5%). Tomando en cuenta los datos anteriores este componente concentra información geohidrológica.
- **Componente 3.** En este caso las variables dominantes son el índice topográfico de humedad y la distancia a picos. Agrupando las variables, la parte hidrológica tiene el 40.5% de peso, el geológico recopila el 33.5%, el topográfico el 18.9%, la cobertura vegetal el 6% y la parte antropogénica el 1.1%. Con estas estadísticas el componente concentra información hidrogeológica.
- **Componente 4.** Las variables que más resaltan en este componente son NDVI y distancia a picos. Al analizar por grupos, el 74.8% corresponde a la cobertura vegetal, el 17.6% a la geología, el 5.3% a la topografía, el 1.5% son hidrológicas y el 0.8% antropogénica. Con las características anteriores se considera que este componente concentra información de cubierta vegetal.
- **Componente 5.** Este rescata una importante cantidad de información de la variable pendiente (%), seguido del índice de posición topográfica. Al agrupar las variables es clara la dominancia de topográfica ya que tiene un peso del 90.7%,

seguido del antropogénico, cubierta vegetal, geológico e hidrológico. Por cual se afirma que este componente concentra principalmente datos topográficos.

- **Componente 6.** Las variables de las que recopila mayor información este componente son Índice de posición topográfica, pendiente y curvatura plana. Así el componente topográfico domina con un peso del 79.7%, seguido por el hidrológico (11%), el geológico (6.6%), el antropogénico (1.6%) y finalmente la cobertura vegetal (1.1%), por lo tanto, este grupo concentra información topohidrológica.

6.2.2. Cobertura raster resultado del ACP

Con cada componente se realizó una composición de las 6 capas a una sola imagen (Figura 71) para estimar, con base en los sitios de entrenamiento, la probabilidad de ocurrencia de cárcavas. Aparentemente la imagen con 10 capas (Figura 70) y la compuesta por los 6 componentes no muestran diferencias significativas ya que esta última concentra el 96.75 de la información original.

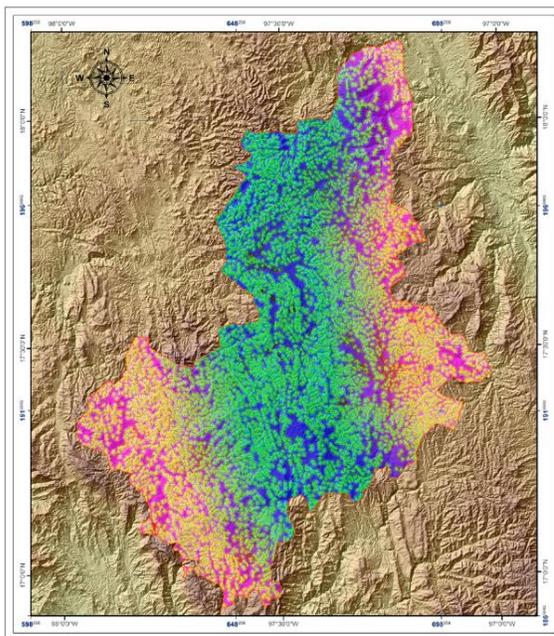


Figura 70. Imagen del ACP con 10 capas.

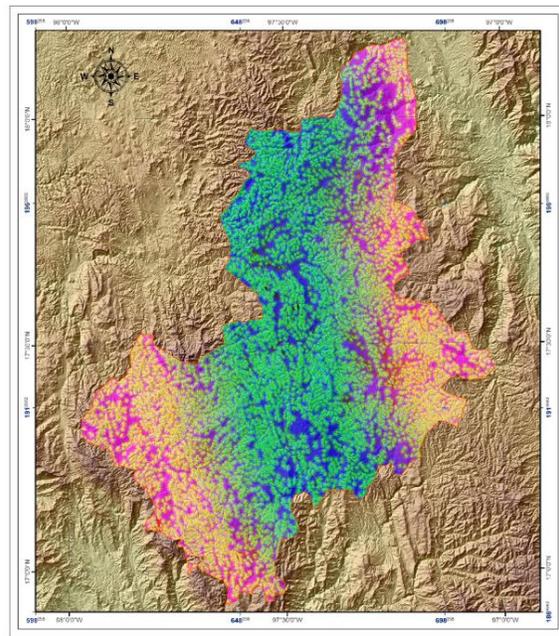


Figura 71. Imagen del ACP con 6 bandas.

6.3. Probabilidad de existencia de cárcavas

Al clasificar la imagen multicapa, con los seis componentes principales seleccionados, se encontró que el 90.17% del área de estudio no presenta cárcavas, mientras que el 9.83% de la superficie total (606.54 km²) tiene una probabilidad de existencia de cárcavas mayor 0.5%. Asimismo, el 4.23% de la superficie (261.11 km²) tiene una probabilidad superior de 50% de que existan esta forma de erosión (Figura 72 y Cuadro 25).

Cuadro 25. Probabilidad de existencia de cárcavas.

Probabilidad de existencia	Área (km²)	Área (%)
0	5,560.92	90.17
0.5	5.68	0.09
1	5.07	0.08
2.5	18.75	0.30
5	39.16	0.64
10	90.01	1.46
25	186.76	3.03
50	146.95	2.38
75	75.7	1.23
90	27.56	0.45
95	6.4	0.10
97.5	2.6	0.04
99	1.23	0.02
99.5	0.35	0.01
100	0.32	0.01
Total general	6,167.46	100.00

En el Cuadro 26 se resumen los rangos donde se ubican las cárcavas con respecto a las variables de mayor influencia en el área de estudio.

Cuadro 26. Variables más importantes en la formación de cárcavas.

Variable	Rango de distribución	Observaciones para posibilidad de mayor 50% de formación de cárcavas.
Distancia a falla Tamazulapam	0 a 25988m	De 670.9 a 23010.9 m de la fallas Tamazulapam.
Distancia a picos	15 y 1680 m	Rangos de 15 a 1248m de los picos
índice topográfico de humedad	0 a 11.89	En promedio entre 0-7 de ITH
Índice de posición topográfico (Topoformas)	lomeríos con laderas moderadas a pronunciadas 0.13 a 0.25 (suelos desnudos a vegetación baja y mediana)	Los sistemas de topoformas con más fragilidad va de lomeríos suaves a lomeríos con laderas moderadas y pronunciadas En clases de -0.11 a 0.20 (terrenos desnudos y vegetación baja).
NDVI	0 a 27%	De 0-22%, de aquí que los terrenos más susceptibles son los de pendientes fuertes, moderadas y suave
Pendientes	media baja (10 a 25100hab km ⁻²) a media alta (50 a 100hab km ⁻²)	0.04
Densidad de población		

La distribución geográfica de las probabilidades de existencia de cárcavas se ubica en la Figura 72.

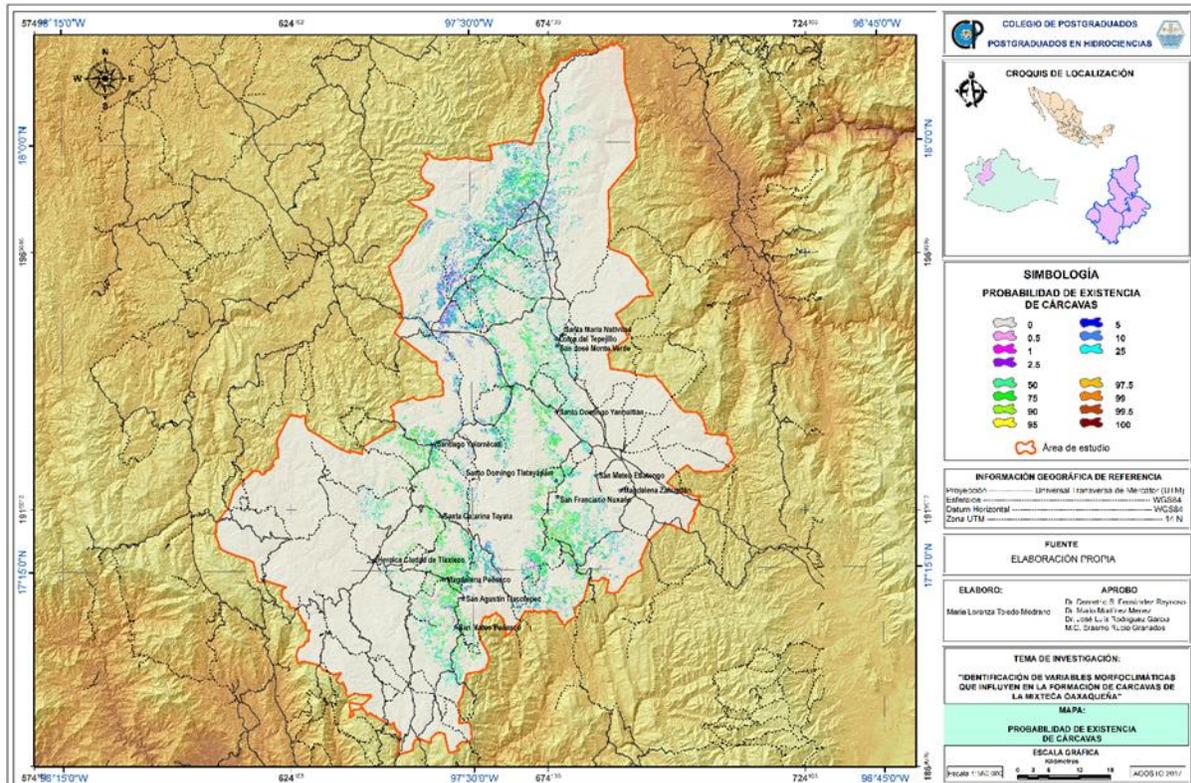


Figura 72. Probabilidad de existencia de cárcavas.

6.4. Validación de resultados

Para la validación de resultados se consideraron los sitios con una probabilidad de existencia superior al 50%, la superficie total con esta probabilidad fue de 261.11 km², de acuerdo con la metodología para asignación de puntos de verificación para la escala 1:50 000 le corresponden de 1 a 5, para este caso se adoptó 1.1 por km², por lo tanto, se lanzaron 289 puntos de verificación al azar, a cada punto se le hizo 3 buffer con diferentes radios, con un radio de 50, 100 y 150 m. Los puntos de verificación se realizaron en imágenes de google earth, estos se analizaron desde el punto de vista de existencia o no existencia y el porcentaje de afectación.

Las coordenadas de los puntos analizados, al azar, se indican el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, así como el porcentaje de afectación observado por radio de curvatura (50, 100 y 150 m). Al contabilizar la presencia o ausencia de

cárcavas, en 289 puntos de verificación, con una probabilidad de existencia superior al 50%, se encontraron cárcavas en 278 puntos lo que produce una confiabilidad global del mapa generado del 96.2%. Al considerar el 20% de afectación en los buffer se identificaron 251 sitios con cárcavas y 38 sin ellas por lo que la certeza de predicción disminuyó a 86.9%.

La siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra el comportamiento que tiene el porcentaje de cobertura en cada uno de los buffer con respecto al número de estos con afectación, la tendencia es clara, entre mayor sea el radio de los buffer la predicción de sitios con cárcavas disminuye, tomando en cuenta un porcentaje de afectación de 30-40%, el buffer de 50m predice una confiabilidad de 83.4%, el de 100m de 81.7% y de 150 es de 77.9%. Entre menor es el buffer de verificación la confiabilidad de predicción incrementa.

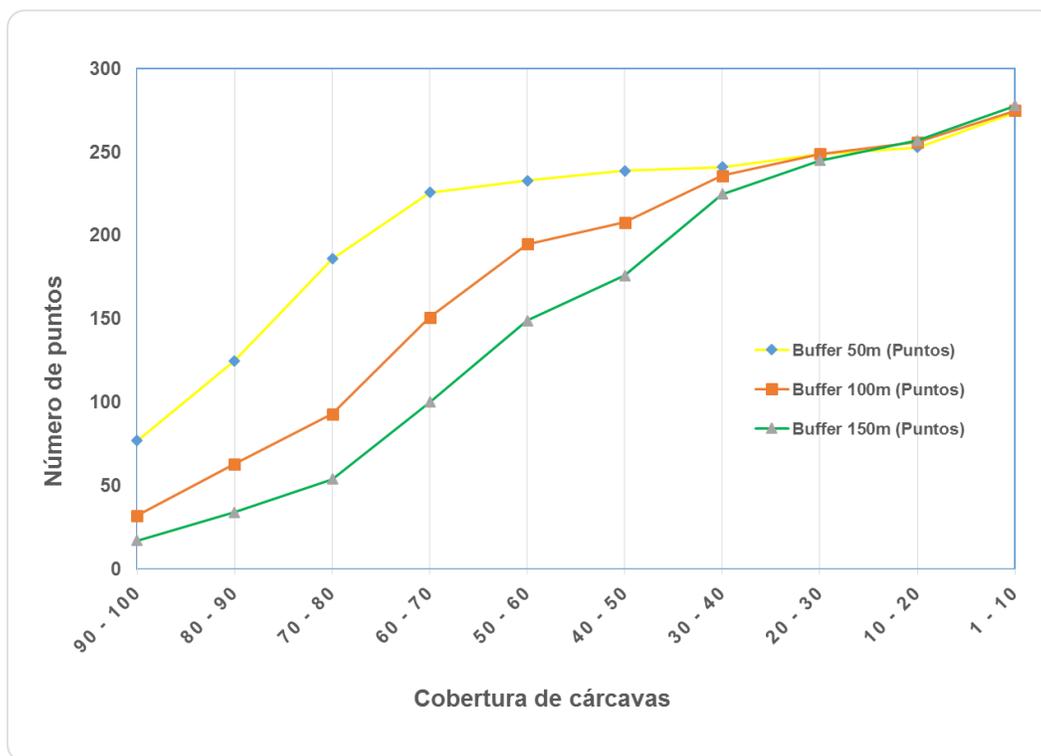


Figura 73. Porcentaje de cobertura de cárcavas en los puntos de verificación.

7. CONCLUSIONES

Las áreas susceptibles a formación de cárcavas se pueden ubicar con las variables ambientales, geológicas, topográficas, hidrológicas, de cobertura vegetal y antropogénicas.

En el área de estudio las cárcavas se presentan en suelos residuales de toba al pie de monte de antiguos aparatos volcánicos y en depósitos aluviales que circundan los valles intermontanos.

A nivel regional la distancia a la falla de Tamazulapam y la presencia de aparatos volcánicos condicionan la formación de cárcavas, seguido de factores geomorfológicos que controlan procesos de erosión y sedimentación como se infiere a través del índice topográfico de humedad, pendiente del terreno, NDVI, índice de posición topográfica.

La formación de cárcavas es un proceso natural que depende de los tipos de materiales de formación geológica y de la ubicación geográfica de cada sitio.

Las variables ambientales son una alternativa para identificar las áreas susceptibles con problemas de erosión severa (sitios con cárcavas), estas proporcionan información precisa de los sitios a analizar además que se obtiene de manera rápida y con bajos costos en comparación con las imágenes satelitales de alta resolución.

El análisis multivariado es una herramienta útil para determinar las variables que influyen en procesos ambientales como la formación de cárcavas, en particular el Análisis de componentes principales

El método de clasificación supervisada, usando ACP, permite identificar áreas con presencia de cárcavas con una precisión aceptable y es útil para determinar el potencial de un sitio para desarrollar este tipo de erosión.

8. RECOMENDACIONES

Uno de los problemas a los que se enfrentó esta investigación fue la insuficiencia de fuentes de información a una escala superior a 1:50 000, por lo que es recomendable trabajar con áreas pequeñas para poder generar información a detalle y no depender de otras fuentes.

Para mayor precisión en las variables topográficas lo ideal sería trabajar con modelos de elevación de mejor resolución, información lidar o vuelos con drones que proporcionen mayor detalle las características del terreno.

Los resultados de esta investigación son una herramienta para planear futuros trabajos de manera particular, para estos es necesario realizar determinaciones en campo que proporcionen el comportamiento de los materiales y la susceptibilidad de estos ante la interacción de las variables ambientales que detonan la erosión en cárcavas.

9. LITERARURA CITADA

- Abdi, H. and Williams, L.J. 2010. Principal Components Analysis, Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2(4): 433-459.
- Abdullah, A., S. Nassr, and A. Ghaleeb. 2013. Remote Sensing and Geographic Information System for Fault Segments Mapping a Study from Taiz Area, Yemen. Journal of Geological Research, 2013.
- Alatorre, L. C. y Beguería, S. 2009. Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo Central Español. Cuadernos de investigación geográfica 35 (2): 171-194.
- Alencáster, G. 1963: Pelecípodos del Jurásico del noreste de Oaxaca y noroeste de Guerrero.- Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 15: 1-52.
- Bagnold, R. A. 1977. Bed load transport by natural rivers. Water Resources Research 13: 303-312.
- Bagyaraj, M., B. Gurugnanam, and A. Nagar. 2011. Significance of morphometry studies, soil characteristics, erosion phenomena and landform processes using remote sensing and GIS for Kodaikanal Hills, a global biodiversity hotspot in Western Ghats, Dindigul District, Tamil Nadu, South India. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 3: 221-233.
- Bagyaraj, M., T. Ramkumar, S. Venkatramanan, and B. Gurugnanam. 2013. Application of remote sensing and GIS analysis for identifying groundwater potential zone in parts of Kodaikanal Taluk, South India. Frontiers of Earth Science, 7: 65-75.

-
- Barling, R. D., Moore, I. D., and Grayson, R. B. 1994. A quasidynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, 30(4): 1029-1044.
- Bocco, G. 1991. Gully erosion: processes and models. *Progress in physical geography*, 15: 392-406.
- Bocco, G., and C. R. Valenzuela. 1988. Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS (Integrated Land and Watershed Management Information System). *ITC Journal* 4:309-319.
- Buendía-Rodríguez, E., and Islas-Gutiérrez, F. 2008. Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes Landsat ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, México. *Terra Latinoamericana*, 26(1):1-9.
- Bull, L. J., and M. J. Kirkby. 1997. Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 21: 354-374.
- Burrough, P. A. y McDonell, R. A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. New York.
- Burrough, P. A. y McDonell, R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York.
- Caballero-Miranda, C., 1990, *Geología y Anisotropía del Jurásico Continental del área de Huajuapán de León-Petlalcingo Estados de Oaxaca y Puebla*: Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Maestría, 142 p.
- Camargo, C., R. Vidal, y J. Andrades. 2014. Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca

-
- torrencial 'La Machiri', estado Táchira-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 55: 85-99.
- Casali, J., Bennett, S. J., and Robinson, K. M. 2000. Processes of ephemeral gully erosion. *International Journal of Sediment Research* 15: 31-41.
- Chuvieco, E. (1990), *Fundamentos de teledetección espacial*, Ed. Rialp, Madrid, 453 p.
- Chuvieco, E. 2002. *Teledetección ambiental*. Ariel Ciencia. Barcelona, España.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. *Estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas*. Organismo de Cuenca Balsas. Comisión Nacional del Agua. México, DF.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. *Red de estaciones climatológicas en formato kmz*. Comisión Nacional del Agua. México, DF. Sitio web: <http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz> Consultado enero 2016)
- Delgado, M. I. 2010. Modelización de la pérdida de suelo en sierras del Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 42.
- Crouch, R. J., and R. J. Blong. 1989. Gully sidewall classification: methods and applications. *Z. Geomorph. N.F.* 33: 291-305.
- Delgado, M. I. 2010. Modelización de la pérdida de suelo en sierras del Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42.
- De Bruin, S., and Stein, A. 1998. Soil-landscape modelling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a digital elevation model (DEM). *Geoderma*, 83(1): 17-33.

-
- Doffo, N., and B. González. 2005. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: un análisis estadístico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 016-022.
- Dong, J. J., P. J. Lai, C. P. Chang, S. H. Yang, K. C. Yeh, J. J. Liao., and Y. W. Pan. 2014. Deriving landslide dam geometry from remote sensing images for the rapid assessment of critical parameters related to dam-breach hazards. *Landslides* 11: 93-105.
- Erben, H. K. 1956. El Jurásico medio y el calloviano de México: México, D. F. Congreso de Geología Internacional., 20, monografía, 104,140p.
- Erben, H. K. 1956. Estratigrafía a lo largo de la carretera entre México, d. F. y Tlaxico, Oax., con particular referencia en ciertas áreas de los estados de Puebla, Guerrero y Oaxaca: México, D. F., Cong. Geol. Internal., 20, Excursión a-12, p.11-36
- ESRI (Environmental Systems Research Institute).2010. ArcGis Desktop 10. California, USA.
- Ferrando, F. J. 1993. Clasificación hidrodinámica de Chile. Cuadernos de investigación geográfica, (18), 57-74.
- Ferrero, S. B., M. G. Palaci y O. R. Campanella. 2002. Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Teledetección* 17: 43-54.
- Ferrusquía-Villafranca, I., 1976, Estudios geológico-paleontológicos en la región de la Mixteca, Parte 1: Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, México: Boletín 97, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 160 p.

-
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 5ª. Ed. Serie Libros, núm. 6, Instituto de geografía, UNAM, México.
- García, E. M. 2002. El ganado comunal en la Mixteca Alta: de la época colonial al siglo XX. El caso de Tepelmeme. *Historia Mexicana*.
- GNU General Public License. 2015. Software R-3.2.3 for Windows. The R-project for statistical computing.
- Gómez, A. G., S. Schnabel, and L. Contador. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 55: 59-80.
- González, J. M. S. 1998. El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. *Norba. Revista de Geografía* 10: 155-184.
- Guerrero-Arenas, R., Jiménez-Hidalgo, E., y Santiago-Romero, H. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Ciencia y Mar* 14(40): 61-68.
- Gutiérrez, Álvaro Gómez, Susanne Cecilia Schnabel, and Joaquín Francisco Lavado Contador. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 55: 59-80.
- Heede, H. 1970. Morphology of gullies in the Colorado Rocky mountains. *Bull. Int. Ass. Sci. Hydrology* 15: 42-50.
- Hernández, G. 1995. Modelo geomorfométrico aplicado al estudio de la erosión en cárcavas. *Revista Geográfica de América Central* 1: 59-95.

-
- Hernández-Estévez, S. 1980. Excursión geológica al borde noroeste de la paleopenínsula de Oaxaca (Sureste del Estado de Puebla): Sociedad Geológica Mexicana, V Congreso Geológico Nacional. Guía, 11.
- Hernández-Ramírez, G. 1991. Métodos morfométricos en la identificación de áreas críticas en procesos erosivos. Taller de Erosión de Suelos. Memoria. Universidad Nacional, Heredia.
- Höfle, B., L. Griesbaum, and M. Forbriger. 2013. GIS-Based detection of gullies in terrestrial LiDAR data of the Cerro Llamoca Peatland (Peru). *Remote Sensing* 5: 5851-5870.
- Hotelling, Harold. 1933. Analysis of a Complex of Statistical Variables into Principal Components. *Journal of Educational Psychology* 24(6 and 7): 417–441 and 498–520.
- Imeson, A. C., and F. J. P. M. Kwaad. 1980. Gully types and gully prediction. *Geografisch Tijdschrift* 14: 430-441.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. Extractor Rápido de Información Climática (ERIC), versión III. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2001. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, escala 1:1 000 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2004. Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

-
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2004. Síntesis de Información Geográfica del estado de Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2006. Conjunto de datos vectorial Edafológico, escala 1: 250 000, Serie II. Edafología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000, Unidades climáticas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2010. Red hidrográfica, escala 1:50 000, de las RH18, RH20 y RH28. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2012. Continental - Continúo de elevaciones mexicano, CEM. Modelo digital de elevaciones escala 1:50 000. Versión 3.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México.
- Ireland, H. A., C. F. S. Sharpe, and D. H. Eargle. 1939. Principles of gully erosion in the piedmont of south Carolina. Technical Bulletin of U.S. Dept. of Agriculture 63: 143.
- Irigaray, C. y Chacón, J. 2002. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG. pp. 21-36. Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España.

-
- IUSS (International Soil Science Society). 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 103. FAO, Roma.
- Jenness, J., Brost, B., and Beier, P. 2013. Land facet corridor designer: topographic position index tools.
- Johnson, D. E. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. México. Internacional Thomson editores. México.
- Jolliffe, I. T. 2002. Principal Component Analysis. Second ed. Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag New York. PEARSON, Karl, 1901. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. Philosophical Magazine 6, 2(11): 559–572.
- Jones, J. A. A. 1981. The nature of soil piping: a review of research, Research Monograph 3. Geo Books. Geomorphological Research Group. Norwich; British.
- Kienzle, S. 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS 8(1): 83 - 1.
- Khan, N. I., and A. Islam. 2003. Quantification of erosion patterns in the Brahmaputra-Jamuna River using geographical information system and remote sensing techniques. Hydrological Processes 17: 959-966.
- Kirkby, M. J., and L. J. Bull. 2000. Some factors controlling gully growth in fine-grained sediments: a model applied in southeast Spain. Catena 40: 127-146.
- Klingseisen, B., Metternicht, G., and Paulus, G. 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. Environmental Modelling and Software 23(1): 109-121.

-
- Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels, and J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 80: 75-109.
- Kreznor, W.R., K. R. Olson, W. L. Banwart, and D. L Johnson. 1989. Soil, landscape, and erosion relationships in a Northwest Illinois watershed. *Soil Science Society America Journal* 53: 1763-1771.
- L. Peng, R. Niu, B. Huang, X. Wu, Y. Zhao, and R. Ye. 2014. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 204: 287-301.
- Lal, R. 1992. Restoring land degraded by gully erosion in the tropics. En: Lal y Stewart. *Soil Restoration. Advances in Soil Science*. Springer Verlag. New York. pp 123-152.
- Lizcano, A., Herrera, M. C., and Santamarina, J. C. 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura* 155(6): 167 -197.
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., y Fernández-Reynoso, D. S. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua* 6(1): 121-137.
- López-Ticha, D. 1985. Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la Cuenca de Tlaxiaco: *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 37(1): 49-92.
- Lyle, W. M., and E. T. Smerdon. 1965. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions of the ASAE* 8: 419-422.
- Mararakanye, N., and J. J. Le Roux. 2012. Gully location mapping at a national scale for South Africa. *South African Geographical Journal* 94: 208-218.

-
- Martín, Rosa María Basildo, and Pedro López Nieva. 1998. Aproximación bibliográfica a los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Ordenación del Territorio y los Recursos Naturales. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 18.
- Martínez-Casasnovas, J. A., and J. Stuiver. 1998. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models. *ITC Journal*, (in press).
- Maya, Y., B. Lacaze, M. Monteforte, and M. F. Passini. 2004. Análisis de imágenes SPOT: Erosión en la región montañosa del sur de la península de Baja California, México. *Terra Latinoamericana* 22: 23-34.
- Meijerink, A. M. J. 1988. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC, Journal* 1: 23-44.
- Mendoza-García, E. 2002. El ganado comunal en la Mixteca Alta: de la época colonial al siglo XX. El caso de Tepelmeme. *Historia Mexicana* 51(4): 749-785.
- Meyer, A., and J. A. Martínez-Casasnovas. 1999. Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach. *Soil and Tillage Research* 50: 319-331.
- Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Ladson. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5: 3-30.
- Mulders, M. A., and S. Sorateyan. 1995. GIS and remote sensing for mapping soils and erosion hazard in the Kaya Region, Burkina Faso. In *Proceedings of the ISSS congress on GIS and Remote Sensing* 35: 63-77.

-
- Nizeyimana, E., and Bicki, T. J. 1992. Soil and soil-landscape relationships in the north central region of Rwanda, east-central Africa. *Soil Science* 153(3): 225-236.
- Nyssen, J., J. Poesen, J. Moeyersons, E. Luyten, M. Veyret-Picot, J. Deckers, M. Haile, and G. Govers. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 1267-1283.
- Nyssen, J., J. Poesen, J. Moeyersons, J. Deckers, M. Haile, and A. Lang. 2004. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands a state of the art. *Earth-Science Reviews* 64: 273-320.
- Okereke, C. N., N. N. Onu, C.Z. Akaolisa, D. O. Ikoro, S. I. Ibeneme, B. Ubechu, and L. O. Amadikwa. 2012. Mapping Gully Erosion Using Remote Sensing Technique: A Case Study of Okigwe Area, Southeastern Nigeria. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 2: 1955-1967.
- Oñate-Valdivieso, F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. *Revista electrónica de la REDLACH* 1(1): 27-32.
- Ortega-González, J. V., Lambarria-Silva, C. 1991. Informe geológico del prospecto Hoja Oaxaca, compilación geológica I.G.R.S. 1129: Petróleos Mexicanos (PEMEX), Coordinación Divisional de Exploración, Gerencia de Exploración Región Sur, Subgerencia de Geología superficial y Geoquímica, Reporte inédito.
- OSGeo (Open Source Geospatial Foundation). 2015. QGIS 2.8.1 Wien.
- Palacio Prieto, J. L. 1990. Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: un ejemplo en el centro de México. *Investigaciones geográficas* 21: 45-55.

-
- Pantoja-Alor, J. 1970. Rocas sedimentarias paleozoicas de la región centro-septentrional de Oaxaca, Excursión geológica México-Oaxaca. Sociedad Geológica Mexicana 67-84.
- Pathak, P., K.L. Sahrawat, T.J. Rego, and S.P. Wani. 2005. Measurable biophysical indicators for impact assessment: changes in soil quality. Natural resource management in agriculture: Methods for assessing economic and environmental impacts 53-74.
- Patton, P.C., and S.A. Schumm. 1975. Gully Erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon. *Geology* 3: 88-90.
- Pérez-Ibargüengoitia, J.M., Hokuto-Castillo, A., De Cserna, Z. 1965. Estratigrafía y Paleontología del Jurásico Superior de la parte centro meridional del estado de Puebla. Reconocimiento geológico del área de Petlalcingo-Santa Cruz, Municipio de Acatlán, estado de Puebla: *Paleontología Mexicana*, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México 21: 1-22.
- Poesen J., and C. Valentin. 2003. Gully Erosion and Global Change. Proc. First International Symposium on Gully Erosion, Leuven, Belgium. *Catena* 50: 87–562.
- Poesen J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten, and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91–133.
- Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environments and Hills*. Elsevier Science Publishers 221-239.

-
- Poesen, J., and J.M Hooke. 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 21:157-199.
- Poesen, J., E. De Luna, A. Franca, J. Nachtergaele, and G. Govers. 1999 Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena* 36: 315-329.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., y Deering, D.W. 1974. "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS". Proc. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symp., Goddard Space Flight Center, NASA SP-351, Science and Technical Information Office, NASA, Washington, D. C.
- Salas, G. P. 1949. Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca. *Boletín* 1(2): 79-156. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.
- Sanjulián, J. J., and P. T. Urdiain. 1983. Análisis cuantitativo de la red de drenajes de la cuenca del río Deba. *Lurralde: Investigación y Espacio* 6: 95-118.
- Santamaría - Díaz, Alfredo. 2009. Influencia de la falla de basamento no expuesta en la deformación Cenozoica: la falla de Caltepec en la región de Tamazulapam, en el sur de México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S. A., y Nieto-Samaniego, Á. F. 2008. Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 25(3): 494-516.
- Sewell, M. 2007. Principal component analysis [Abstract]. Department of Computer Science. University College London.

-
- Silverman, B. W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis (Vol. 26). CRC press.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2000. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-12 Zaachila, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2000. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-9 Oaxaca, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2001. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-6 Orizaba, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- Shruthi, R. B., N. Kerle, and V. Jetten. 2011. Object-based gully feature extraction using high spatial resolution imagery. *Geomorphology* 134: 260-268.
- Silva, P.A. 1970. Plantas del Pensilvánico de la región de Tehuacán: Universidad Nacional Autónoma de México. *Instituto de Geología. Paleontología Mexicana* 29: 108.
- Silveira, R. M. P.; Silveira, C. T. 2014. Clasificación morfológica del relieve uruguayo basada en modelos digitales de elevación y técnicas morfométricas. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)* 6: 19-36.
- Stolt, M.H., J.C. Baker, and T.W. Simpson. 1993. Soil – landscape relationships in Virginia: I. Soil variability and parent material uniformity. *Soil Science Society America Journal* 57: 414-421.
- Tamene, L., Park, S. J., Dikau, R., and Vlek, P. L. G. 2006. Analysis of factors determining sediment yield variability in the highlands of northern Ethiopia. *Geomorphology* 76(1): 76-91.

-
- Valcárcel, M., M.T. Taboada, A. Paz, and J. Dafonte. 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena* 50: 199-216.
- Valentin, C., J. Poesen, and Y. Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63: 132-153.
- Van Gheluu, P., and Van Molle, M. 1990. Geomorphological mapping as a tool in the delineation of erosion risk zones in the rio guadalhorce catchment (Spain). *Soil technology* 3(4): 327-342.
- Verstappen, H. T., and Van Zuidam, R. A. 1991. The ITC System of Geomorphological Mapping. ITC Publication 10.
- Wang, T., F. He, A. Zhang, L. Gu, Y. Wen, W. Jiang, and H. Shao. 2014. A quantitative study of gully erosion based on object-oriented analysis techniques: a case study in Beiyanzikou catchment of Qixia, Shandong, China. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. ESRI User Conference. San Diego, CA.
- Wilson, J. P., and Gallant, J. C. 2000. Digital terrain analysis. *Terrain analysis: Principles and applications* 6(12): 1-27.
- WRB (World Reference Base). 2006. World reference base for soil resources. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- WWF (World Wildlife Fund). 2014. Tasa de transformación de la vegetación en el área de intervención del proyecto Mixteca. Oficina de la World Widllife Fund en Oaxaca. Sitio web: <http://www.proyectomixteca.org.mx/servidor-cartografico/> (consultado abril de 2016).

Zende, A. M., R. Nagarajan, P. K. Deshpande, and K. R. Atal. 2012. Remote sensing and GIS applications for terrain evaluation and land resources assessment In Yerala river basin, western Maharashtra, India. Research and Development (IJCSEIERD) 2: 17-24.

Zeuberger, L. W. y C. R. Thorne. 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms 12: 47–56.

Zinck, J.A., and C.R. Valenzuela. 1990. Soil geographic database: structure and application examples. ITC Journal 1190(3): 270-294.

10. ANEXOS

Anexo 1. Puntos de verificación en google earth.

Cuadro 27. Punto de verificación de cárcavas.

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
1	654,276.282234	1,907,033.690790	100	100	100
2	679,473.982077	1,907,688.213950	90	65	60
3	670,409.480084	1,951,772.135110	100	100	90
4	654,324.502587	1,906,685.754180	90	70	40
5	656,278.429785	1,905,965.300030	90	65	50
6	655,469.570472	1,910,497.465590	90	70	40
7	673,086.194717	1,913,052.681680	90	75	60
8	674,682.080915	1,933,101.916300	80	60	60
9	672,731.490170	1,922,496.866080	80	90	90
10	653,447.783529	1,913,969.438130	20	30	40
11	656,658.097458	1,909,105.920800	80	80	70
12	678,175.555956	1,917,502.663440	50	30	30
13	677,668.681550	1,915,561.005380	100	90	70
14	675,611.939116	1,933,142.238260	100	100	95
15	651,107.831332	1,918,189.336040	70	70	70
16	654,482.822657	1,907,748.337300	100	95	98
17	675,770.713569	1,932,032.450340	70	60	50
18	680,126.217361	1,909,471.610880	5	10	20
19	651,853.154875	1,929,278.053180	90	70	65
20	659,677.001881	1,893,098.434410	90	70	50
21	675,734.817077	1,903,380.041420	70	30	30
22	670,450.928855	1,906,699.713790	30	30	30
23	654,054.043324	1,906,819.032320	100	95	95
24	681,152.325893	1,907,862.783810	80	50	40
25	655,775.334798	1,904,694.361980	100	80	70
26	678,590.351289	1,909,260.899740	10	5	5
27	676,149.359394	1,919,798.635160	70	50	50
28	650,406.782922	1,921,753.469310	95	90	80
29	660,824.190484	1,966,495.349960	95	80	60
30	656,964.025480	1,909,219.589080	100	90	60
31	656,365.488469	1,904,277.186930	100	100	100

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
32	671,403.143324	1,949,019.682260	100	100	100
33	655,439.865402	1,904,023.463060	100	100	100
34	679,572.646564	1,908,559.914340	95	90	90
35	677,795.993481	1,909,963.369170	90	60	40
36	674,385.826919	1,933,129.376160	100	100	100
37	675,384.544111	1,933,706.007440	75	60	60
38	666,126.066853	1,970,632.239880	90	90	80
39	670,232.790266	1,979,644.011430	85	50	40
40	673,358.514478	1,936,502.561590	70	70	70
41	652,832.177014	1,906,029.054890	70	40	40
42	672,406.164269	1,922,512.153830	80	60	60
43	666,342.157513	1,936,324.749210	75	40	30
44	675,237.520007	1,932,314.121850	95	70	65
45	674,373.932226	1,919,023.261020	90	70	60
46	664,662.487467	1,971,083.306970	90	90	80
47	675,831.853019	1,933,470.605570	90	65	70
48	672,481.853374	1,916,453.757620	80	65	40
49	672,528.419509	1,927,043.055280	100	65	60
50	655,149.771007	1,910,090.808090	95	85	60
51	674,659.411372	1,938,579.137120	92	70	45
52	673,359.888946	1,916,851.527330	85	70	45
53	675,123.545446	1,920,162.464860	100	70	65
54	679,228.724026	1,917,345.685500	90	75	65
55	675,289.410193	1,926,890.489120	70	70	70
56	656,815.032943	1,904,504.432890	100	100	97
57	672,726.852575	1,919,706.833670	30	30	30
58	678,104.970149	1,910,075.673660	10	10	10
59	673,917.913435	1,915,396.776660	90	90	90
60	655,139.554684	1,901,888.667010	75	40	40
61	674,868.447592	1,946,573.811650	75	70	65
62	675,711.484079	1,932,370.093230	100	80	60
63	672,697.650820	1,909,645.668400	20	20	20
64	667,002.973688	1,982,709.203480	80	60	60
65	650,301.614022	1,901,277.071570	95	95	90
66	656,736.438925	1,892,848.450330	85	40	30
67	655,941.773649	1,903,327.244440	100	75	60
68	652,553.783119	1,977,665.362700	100	95	95
69	656,038.301532	1,909,157.619350	100	55	40

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
70	677,943.260363	1,916,326.740440	10	10	10
71	663,269.913928	1,952,276.648780	90	80	60
72	654,962.640827	1,902,421.613290	90	70	70
73	675,975.269321	1,933,203.744660	80	60	50
74	677,209.394517	1,902,526.150530	70	70	60
75	658,303.409152	1,912,851.949390	0	0	10
76	667,042.518366	1,981,435.304740	100	90	80
77	653,586.802050	1,917,548.271600	5	5	5
78	677,624.944364	1,902,507.802860	10	10	10
79	655,556.072749	1,901,921.518280	80	65	55
80	664,647.177318	1,933,340.337840	10	15	15
81	674,596.472059	1,911,819.708310	100	90	75
82	647,280.548426	1,932,882.842450	10	10	10
83	673,231.804502	1,935,776.614200	70	55	50
84	678,581.695979	1,909,805.186920	75	40	30
85	679,729.845520	1,915,507.277700	10	10	10
86	667,774.509786	1,943,420.835270	70	40	40
87	672,897.792670	1,907,144.653270	75	55	40
88	678,098.193849	1,911,765.939230	10	10	10
89	673,874.311798	1,912,023.522780	80	40	20
90	676,954.214262	1,902,235.465080	0	0	0
91	652,452.335479	1,906,849.888170	85	55	50
92	656,214.708995	1,908,266.282300	5	5	5
93	678,569.709411	1,912,264.633150	10	10	10
94	654,078.441283	1,902,146.271440	70	45	40
95	672,793.034541	1,936,251.706660	80	75	70
96	674,030.631998	1,914,720.604470	100	100	95
97	653,400.163682	1,906,274.231440	100	80	60
98	647,361.045835	1,916,562.973200	0	0	0
99	680,615.503492	1,910,940.071360	70	60	50
100	677,874.362753	1,922,233.738080	90	65	40
101	657,626.159118	1,895,616.467530	75	60	40
102	647,886.122888	1,932,082.115260	90	60	50
103	672,324.580056	1,938,928.732670	100	90	70
104	676,388.867339	1,920,933.825070	20	20	20
105	678,906.513622	1,912,958.269990	65	50	40
106	652,628.281884	1,905,758.379130	90	70	60
107	676,452.689787	1,915,181.732900	80	40	30

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
108	674,993.852255	1,930,820.185850	90	70	70
109	669,778.429320	1,952,628.474410	85	70	60
110	673,644.842619	1,936,327.767980	95	80	80
111	678,993.013591	1,909,587.357820	70	70	70
112	667,301.178101	1,943,439.837440	90	75	60
113	674,333.965310	1,914,646.864350	95	95	90
114	667,989.068930	1,968,673.356660	70	50	40
115	674,382.359673	1,901,679.405580	95	80	80
116	653,513.290200	1,900,950.497550	95	85	75
117	648,208.665332	1,926,999.288340	0	0	0
118	658,520.554993	1,906,527.728940	75	60	40
119	677,509.485074	1,902,183.378740	10	10	10
120	666,099.080467	1,968,030.446670	55	40	40
121	664,254.222160	1,963,746.670960	75	60	60
122	674,286.076157	1,939,128.001450	70	60	60
123	672,701.092024	1,907,258.335330	55	40	40
124	655,666.738956	1,904,702.458690	95	95	90
125	679,086.008421	1,917,908.469080	40	35	30
126	674,240.867630	1,912,900.315560	70	60	50
127	673,097.621481	1,918,921.636760	95	75	50
128	669,955.385497	1,970,035.540810	90	85	85
129	670,586.756600	1,984,840.088170	0	0	0
130	671,391.143693	1,986,667.938780	80	60	60
131	649,212.165675	1,931,593.871760	0	0	0
132	673,247.449417	1,909,528.333660	40	20	20
133	680,215.844122	1,918,119.034620	90	70	60
134	675,181.114128	1,914,686.141920	70	60	50
135	657,026.754552	1,906,241.511930	80	80	70
136	673,656.570484	1,916,972.515390	85	70	60
137	676,939.809109	1,913,424.976100	90	40	40
138	656,591.919225	1,908,608.044960	75	60	30
139	672,346.055665	1,938,166.325160	60	70	60
140	669,798.014180	1,979,775.734840	50	50	40
141	666,368.926458	1,937,297.322230	5	5	5
142	673,855.993673	1,920,475.765680	50	40	40
143	677,519.723975	1,910,939.301720	50	30	30
144	671,789.324491	1,948,275.413100	95	90	80
145	672,231.129705	1,913,161.475590	75	60	40

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
146	677,496.017773	1,929,214.925140	75	50	35
147	677,012.131453	1,913,694.678000	75	50	40
148	672,725.216933	1,939,435.811950	90	60	60
149	651,610.151703	1,919,046.007690	100	95	75
150	656,613.180242	1,893,708.433060	0	0	0
151	674,582.502193	1,914,857.355500	70	55	40
152	672,398.859958	1,914,032.366300	5	5	5
153	669,033.783204	1,969,297.549880	95	60	60
154	655,290.175711	1,909,238.843720	80	70	55
155	677,617.053563	1,912,180.272400	75	40	40
156	668,836.102922	1,981,450.920000	90	90	80
157	670,827.965111	1,905,004.926370	10	5	5
158	655,437.075404	1,904,351.582960	100	70	70
159	673,143.612701	1,916,298.250810	30	30	30
160	674,082.235378	1,911,664.702060	90	40	40
161	676,718.815090	1,933,280.008550	10	30	40
162	654,825.301863	1,907,641.148780	70	70	70
163	677,915.070163	1,909,744.433010	80	60	40
164	662,982.185166	1,965,529.590030	60	40	40
165	676,205.022024	1,920,192.321890	30	40	50
166	672,960.591160	1,923,246.089530	65	65	65
167	654,312.049112	1,908,122.151880	100	100	100
168	649,868.595930	1,927,926.800260	0	0	0
169	680,533.377688	1,913,569.531300	70	60	40
170	652,381.515055	1,976,981.637000	95	80	70
171	655,869.931298	1,899,979.463660	100	100	100
172	660,126.679111	1,961,777.795270	70	60	50
173	665,207.759848	1,949,771.254130	30	30	40
174	676,645.816274	1,912,504.402760	0	10	10
175	655,999.207755	1,910,569.703440	100	85	75
176	675,274.418756	1,915,716.960900	80	60	40
177	670,760.991872	1,944,494.481570	80	75	50
178	653,757.245378	1,923,327.253060	0	0	0
179	674,954.308433	1,919,067.418210	85	70	55
180	676,632.230506	1,924,846.186000	80	65	60
181	675,872.743423	1,919,570.332040	90	85	70
182	672,170.332622	1,938,929.915370	100	90	70
183	650,510.745543	1,921,420.905970	100	90	70

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
184	663,630.780159	1,957,796.543840	80	60	35
185	653,321.022556	1,977,425.334430	100	90	70
186	648,473.215647	1,935,555.004840	0	0	0
187	674,280.638418	1,915,120.757540	75	40	40
188	665,875.623823	1,946,755.853710	75	40	20
189	669,551.358813	1,982,523.899930	60	20	30
190	652,713.398555	1,977,015.155430	95	70	60
191	673,773.085558	1,908,632.456730	30	30	30
192	652,360.651077	1,907,304.497330	75	70	65
193	654,883.790394	1,902,863.189940	10	10	10
194	666,072.503317	1,947,768.411740	80	65	50
195	668,299.649225	1,983,180.231940	50	40	30
196	678,139.001575	1,915,476.594460	80	40	20
197	645,153.028076	1,910,972.888000	0	0	0
198	675,075.041481	1,909,230.664690	30	20	30
199	680,597.432591	1,907,491.313630	80	50	50
200	675,733.708602	1,927,171.740340	80	70	65
201	654,910.275772	1,908,927.608320	100	100	100
202	649,015.001012	1,973,555.186250	0	0	0
203	662,974.067449	1,966,764.863400	95	85	70
204	676,225.675162	1,913,168.699470	75	75	50
205	674,884.679378	1,926,557.022980	80	60	40
206	659,235.788113	1,906,255.387970	0	0	5
207	656,254.400111	1,908,915.698540	85	65	40
208	643,984.953949	1,934,553.027370	10	10	10
209	674,015.759343	1,926,324.797700	80	80	80
210	666,868.594003	1,947,331.512860	80	65	45
211	656,198.079695	1,901,375.414360	80	70	60
212	680,928.926154	1,906,297.504570	80	70	60
213	668,615.722870	1,984,109.806430	90	70	60
214	670,922.430604	1,983,531.835380	80	65	40
215	656,665.838153	1,904,164.968600	100	100	80
216	675,583.296964	1,915,259.392150	70	65	60
217	679,558.503676	1,917,388.766530	70	60	60
218	656,699.150449	1,905,812.788540	100	80	65
219	655,688.500538	1,903,593.586330	100	90	65
220	678,492.436796	1,912,578.461800	70	40	30
221	669,836.235873	1,984,744.202470	20	20	20

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
222	656,056.822582	1,909,576.821160	100	95	85
223	667,592.326445	1,943,921.402880	90	65	65
224	656,047.876100	1,902,823.469920	85	85	80
225	675,720.000427	1,914,171.364930	100	100	85
226	672,561.594588	1,935,845.776550	96	60	50
227	650,797.652377	1,921,225.930120	100	95	88
228	675,508.115886	1,913,727.279020	100	95	60
229	675,032.759155	1,915,512.204980	80	60	60
230	662,969.694667	1,963,676.111050	100	95	65
231	656,507.541804	1,903,900.539530	100	90	70
232	656,511.617454	1,909,916.933330	75	65	60
233	677,534.686955	1,918,897.074530	90	70	65
234	650,887.483720	1,932,743.340780	10	30	40
235	652,398.156730	1,905,972.150830	90	80	60
236	678,368.516976	1,922,757.132950	70	60	60
237	654,841.576492	1,901,561.031070	100	100	90
238	676,578.543728	1,926,134.248020	80	70	70
239	671,384.758575	1,981,841.408420	100	90	80
240	675,719.564985	1,920,090.100000	70	80	80
241	661,657.611325	1,963,142.345900	70	60	40
242	665,020.118340	1,943,506.972100	70	60	60
243	670,980.511125	1,944,131.585150	65	65	65
244	674,416.240783	1,926,435.902180	70	70	60
245	667,022.285106	1,968,767.864930	30	35	40
246	672,917.541435	1,936,786.265790	90	90	70
247	664,961.300670	1,973,816.351430	65	45	30
248	677,690.059262	1,926,620.759860	75	60	50
249	670,551.303856	1,981,718.568410	80	60	40
250	646,166.694830	1,932,193.658580	70	65	50
251	656,333.483347	1,909,364.318150	75	70	70
252	666,393.024379	1,936,043.484900	55	30	15
253	670,070.474660	1,951,760.331680	65	40	40
254	678,249.285945	1,909,519.202320	85	40	30
255	673,264.863070	1,936,097.606140	90	70	55
256	652,744.934270	1,895,052.625870	0	0	5
257	671,488.838834	1,938,785.247510	75	40	20
258	652,467.875577	1,905,494.645440	70	60	50
259	674,321.630067	1,911,645.923040	95	80	70

Punto de Verificación	Coordenadas UTM Zona 14		Porcentaje de afectación del Buffer		
	Latitud	Longitud	50m	100m	150m
260	671,256.763566	1,910,758.716430	80	50	35
261	668,526.613507	1,980,300.895460	80	80	65
262	655,115.986612	1,904,674.067010	85	60	40
263	674,580.601203	1,915,208.402580	100	85	60
264	651,353.848378	1,930,672.551920	95	95	80
265	669,206.879917	1,952,908.781470	80	40	30
266	654,869.308388	1,909,451.946320	100	80	80
267	656,770.892945	1,904,911.418370	95	80	70
268	659,106.249441	1,905,326.191030	70	65	60
269	656,486.566363	1,904,635.099510	85	75	70
270	659,202.519939	1,890,943.637170	55	30	15
271	657,734.775926	1,897,510.478190	75	50	40
272	669,005.622202	1,953,854.243860	80	70	50
273	670,231.968405	1,954,084.431820	50	40	35
274	669,386.622964	1,952,580.272560	70	60	55
275	668,169.569674	1,970,441.816350	70	60	60
276	672,091.872975	1,939,887.296350	70	60	50
277	677,807.525283	1,937,685.074730	100	95	95
278	670,825.177570	1,947,895.470300	100	90	85
279	650,855.773023	1,920,188.422270	100	90	90
280	650,213.053817	1,920,883.199050	95	95	95
281	654,279.829776	1,904,939.826330	100	95	95
282	676,948.513467	1,925,234.539440	80	80	75
283	652,298.712875	1,909,106.197110	95	85	85
284	654,033.180000	1,909,149.541900	90	75	70
285	675,522.377496	1,912,879.872130	100	95	90
286	682,100.208311	1,913,950.789660	10	10	10
287	678,963.345273	1,917,092.966200	100	75	70
288	650,072.915406	1,921,480.798750	100	95	88
289	671,683.590170	1,945,565.721930	90	70	65