



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**“Procesos erosivos en la subcuenca del afluente La Fábrica,
Zinacantepec, Estado de México”**

TESIS

Para obtener el título de Licenciatura en Geografía

PRESENTA

Rogelio Baltazar Ascención

ASESOR

Mtro. Julio César Carbajal Monroy

REVISORES

Mtra. Inocencia Cadena Rivera

Mtro. Luis Ricardo Manzano Solís

Generación 2009-2014

Toluca, México

Marzo 2015

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido llegar a este día tan importante, por haberme dado salud, sabiduría, bondad, alegría, felicidad para cumplir mis objetivos y haber sorteado los obstáculos que existieron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis padres, porque fueron los que me impulsaron para seguir adelante y completar mis metas, ya que siempre tuve su apoyo y nunca me dejaron desistir en este proceso.

A mi hermana porque siempre conté con ella para lo que necesitaba que me apoyara, al igual que espero poder servirle de ejemplo para que se esfuerce al máximo y logre cumplir sus metas que tiene planeadas.

Un agradecimiento especial a la Maestra Inocencia Cadena Rivera y al Maestro Luis Ricardo Manzano Solís porque siempre estuvieron apoyándome, dándome consejos, ideas, compartiéndome de sus conocimientos y por no haberme abandonado a lo largo de trabajo.

A mi director de tesis el Maestro Julio César Carbajal Monroy un agradecimiento personal, porque me ayudó en todo lo que le pedí, desde que me hiciera el favor de revisar los avances hasta apoyarme como mi asesor, más aparte por todos los conocimientos que me dio sin esperar nada a cambio.

Al Ingeniero Samuel Ontiveros Alvarado, que me hizo el favor de ayudarme en la identificación de las colectas de vegetación y así poder complementar el trabajo de una manera más integral.

A mis amigos (Marcos, Iliana y Héctor) porque siempre me alentaron a seguir adelante y en muchas ocasiones hasta me obligaban o me traían bajo presión, más que mis revisores y asesor; y por haberme ayudado a lo largo de la tesis. Mil gracias amigos.

Rogelio Baltazar Ascención

Índice General

Introducción	9
Capítulo I: Marco Teórico-Methodológico	15
1.1 Teoría General de Sistemas (TGS)	16
1.1.1 Generalidades	16
1.1.2 Sistemas	18
1.1.3 Aplicaciones a la Geografía	20
1.2 Geografía Ambiental dentro de la Ciencia Geográfica	21
1.2.1 La incorporación de la Geografía Ambiental a la Geografía	23
1.2.2 Aplicaciones de la Geografía Ambiental	25
1.3 Cuenca hidrográfica	26
1.3.1 Cuenca como sistema	27
1.3.2 Manejo y administración de la cuenca	31
1.4 Erosión	37
1.4.1 Tipos de erosión	38
1.4.2 Erosión hídrica y tipos	39
1.4.3 Factores que intervienen para la erosión hídrica	47
1.4.4 Métodos para evaluar y controlar la erosión hídrica por cárcavas	57
Capítulo II: Método	63
2.1 Esquema metodológico	64
2.2 Procesos y etapas	65
2.2.1 Obtención de la información	65
2.2.2 Preparación y procesamiento de la información	65
2.3 Método de Transecto de Cárcavas	71
2.4 Proyección de sitios susceptibles a la erosión hídrica por cárcavas	75
2.4.1 Método multivariado para identificar zonas	75

Índice de Figuras

Figura 1.3.1: Cuenca como sistema	30
Figura 1.4.2.1: Proceso de erosión pluvial	40
Figura 1.4.2.2: Erosión en surcos	42
Figura 1.4.2.3: Erosión en cárcavas	44
Figura 1.4.3: Ladera	49
Figura 1.4.4.1: Represa de rocas	60
Figura 1.4.4.2: Pequeñas presas de ladrillos para control de cárcavas	61
Figura 1.4.4.3: Diques	61
Figura 2.2.2.3: Obtención de pendientes	68
Figura 2.2.2.5: Identificación de geoformas	69
Figura 2.3.1: Esquema representando el transecto y secciones transversales de una cárcava	72
Figura 2.3.2: Esquema de sección transversal de una cárcava en forma de U	73
Figura 2.3.3: Esquema de sección transversal de una cárcava en forma de V	74
Figura 2.4.1: Diagrama conceptual	78
Figura 3.1.1: Localización de la zona de estudio	81
Figura 3.2.1: Brecha volcánica	84
Figura 3.2.2: Mapa Geológico de la Subcuenca La Fábrica	85
Figura 3.2.3: Erupciones del Nevado de Toluca	88
Figura 3.2.4: Perfil de los depósitos volcánicos	89
Figura 3.3.1: Identificación de depósitos volcánicos	92
Figura 3.3.2: Mapa Geomorfológico de la Subcuenca La Fábrica	94
Figura 3.3.3: Mapa de Energía del Relieve de la Subcuenca La Fábrica	96
Figura 3.3.4: Mapa de Densidad de Disección de la Subcuenca	98

La Fábrica	
Figura 3.3.5: Mapa de Pendientes de la Subcuenca La Fábrica	101
Figura 3.4.1: Andosol	103
Figura 3.4.2: Regosol	107
Figura 3.4.3: Mapa Edafológico de la Subcuenca La Fábrica	108
Figura 3.5.1: Mapa Hidrológico de la Subcuenca La Fábrica	111
Figura 3.6.1: Bosque de coníferas	114
Figura 3.6.2: Mapa de Uso del Suelo y Vegetación 2014 de la Subcuenca La Fábrica	117
Figura 3.7.1: Porcentajes de población	120
Figura 3.8.1: Mapa Climatológico de la Subcuenca La Fábrica	124
Figura 3.8.2: Mapa de Precipitación Media Anual del periodo 1978-2008 de la Subcuenca La Fábrica	126
Figura 3.8.2: Mapa de Temperatura Media Anual del periodo 1978-2008 de la Subcuenca La Fábrica	128
Figura 3.8.4: Climograma estación 15062	129
Figura 3.8.5: Climograma estación 15229	130
Figura 3.8.6: Climograma estación 15276	132
Figura 3.8.7: Climograma estación 15293	133
Figura 4.1.1: Proceso Natural de una Cárcava	138
Figura 4.1.2: Proceso Antrópico de una Cárcava	141
Figura 4.1.1.1: Surcos en cota del cultivo de papa	143
Figura 4.1.1.2: Surcos erosivos del cultivo de papa	143
Figura 4.1.1.4: Mapa de Cambio de Uso del Suelo 2004-2014 de la Subcuenca La Fábrica	145
Figura 4.2.1: Mapa de Localización de Cárcavas de la Subcuenca La Fábrica	151
Figura 4.2.1.1: Localización cárcava 1	152
Figura 4.2.1.2: Localización cárcava 2	152

Figura 4.2.1.3: Localización cárcava 3	152
Figura 4.2.1.4: Localización cárcava 4	152
Figura 4.2.1.5: Localización cárcava 5	153
Figura 4.2.1.6: Localización cárcava 6	153
Figura 4.2.1.7: Localización cárcava 7	153
Figura 4.2.1.8: Localización cárcava 8	153
Figura 4.2.1.9: Localización cárcava 9	154
Figura 4.2.1.10: Localización cárcava 10	154
Figura 4.2.1.11: Localización cárcava 11	154
Figura 4.2.1.12: Localización cárcava 12	154
Figura 4.2.1.13: Localización cárcava 13	155
Figura 4.2.1.14: Localización cárcava 14	155
Figura 4.2.2: Cárcava 9	158
Figura 4.2.3: Cárcava 10	158
Figura 4.2.4: Cárcava 3	159
Figura 4.2.5: Cárcava 13	159
Figura 4.2.6: Cárcava 5	161
Figura 4.2.7: Cárcava 8	161
Figura 4.3.1: Mapa de Zonas Susceptibles a Erosión Hídrica de la Subcuenca La Fábrica	165
Figura 4.4.1: Relleno del cabeceo de la cárcava	169
Figura 4.4.2: Presa de llantas	170
Figura 4.4.3: Presa de gaviones	171
Figura 4.4.4: Presa de mampostería hidráulica	171
Figura 4.4.5: Geotextil en los taludes de la cárcava	172
Figura 4.4.6: Mapa de localización de las medidas de control y recuperación de las Cárcavas de la Subcuenca La Fábrica	174
Figura 4.4.7: Cárcava 6	175
Figura 4.4.6.1: Medidas de la cárcava 2	176

Figura 4.4.6.2: Medidas de la cárcava 6	176
Figura 4.4.6.3: Medidas de la cárcava 7	177
Figura 4.4.6.4: Medidas de la cárcava 14	177
Figura 4.4.8: Cárcava 1	178
Figura 4.4.6.5: Medidas de la cárcava 1	179
Figura 4.4.6.6: Medidas de la cárcava 9	180
Figura 4.4.6.7: Medidas de la cárcava 10	180
Figura 4.4.6.8: Medidas de la cárcava 11	181
Figura 4.4.6.9: Medidas de la cárcava 13	182
Figura 4.4.9: Cárcava 4	182
Figura 4.4.10: Cárcava 12	182
Figura 4.4.6.10: Medidas de la cárcava 3	183
Figura 4.4.6.11: Medidas de la cárcava 4	184
Figura 4.4.6.12: Medidas de la cárcava 12	184
Figura 4.4.6.13: Medidas de la cárcava 5	185
Figura 4.4.6.14: Medidas de la cárcava 8	186
Figura 4.4.11: Cárcava 5	186
Figura 4.4.12: Cárcava 8	186
Figura 4.4.13: Control de cárcava a lo largo del perfil longitudinal	187

Índice de Cuadros

Cuadro 2.2.2.1: Valores para la energía del relieve	66
Cuadro 2.2.2.2: Valores para la densidad de disección	67
Cuadro 2.2.2.4: Clasificación de pendientes	68
Cuadro 2.4.1: Ponderaciones de las capas	77
Cuadro 3.2.2: Superficies y porcentajes de la geología	84
Cuadro 3.3.2: Superficies y porcentajes de geoformas	95
Cuadro 3.3.3: Superficies y porcentajes de energía	97
Cuadro 3.3.4: Superficies y porcentajes de densidad	99
Cuadro 3.3.5: Superficies y porcentajes de pendientes	102
Cuadro 3.4.3: Superficies y porcentajes de suelos	107
Cuadro 3.6.2: Superficies y porcentajes de uso del suelo y vegetación	118
Cuadro 3.7.1: Características de las Localidades	119
Cuadro 3.7.2: Características de las Localidades II	121
Cuadro 3.8.1: Superficies y porcentajes de climas	125
Cuadro 4.1.1.3: Superficies y porcentajes de uso del suelo del 2004 y 2014	146
Cuadro 4.1.1.4: Superficies y porcentajes de cambio de uso	147
Cuadro 4.2.1: Características de las Cárcavas	149
Cuadro 4.2.2: Rangos de profundidad y longitud para Cárcavas	150
Cuadro 4.2.3: Áreas, longitudes y volúmenes de suelo perdido por Cárcava	156
Cuadro 4.2.4: Tasas de crecimiento de las Cárcavas	156
Cuadro 4.3.1: Superficies y porcentajes de zseh	166

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo nació de la observación sobre problemas derivados de la erosión hídrica, no solo en la zona de estudio, sino en diversas partes de la superficie terrestre, debido a la falta de planeación en el uso de la tierra, es decir, en el caso particular de México, la repartición de tierras a los ejidos, contaba con la cláusula de que se tenía que trabajar la tierra sino la federación les quitaba las tierras a los ejidos, motivo por el cual los ejidatarios deforestaban para dar lugar a la agricultura y ganadería.

Para tener una idea más clara sobre este proceso, causas y consecuencias se realizó la búsqueda de trabajos realizados sobre el proceso de erosión hídrica, a nivel internacional, nacional y municipal, para saber el curso adecuado que tendría que tomar la investigación.

Dentro de los estudios que se encontraron a nivel mundial, se tiene el realizado por Oñate (2004) con el tema metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos, con la finalidad de identificar áreas críticas para la erosión hídrica como base para implementar planes de manejo y protección en la frontera de Ecuador y Perú.

Otro trabajo realizado (Mejía, *et al.* 2009) consistió en una evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la subcuenca Aguas Calientes, en el estado venezolano de Mérida, en donde la subcuenca posee una alta vulnerabilidad a los procesos erosivos, siendo el factor topográfico el más crítico, porque contribuye al desarrollo del proceso erosivo.

Un tercer trabajo es el realizado por el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear Centro de Investigaciones Nucleares (2009) con el tema erosión de suelos en Bolivia, se hizo el primer mapa preliminar de erosión de suelos de la región árida, semiárida y subhúmeda seca de Bolivia.

Por último, se tiene el estudio realizado por el Departamento de Geografía de la Universidad de Murcia (2009) con la finalidad de evaluar la erosión en distintas escalas, en diferentes litologías, distintos usos del suelo y con diferentes métodos.

Una vez investigados los trabajos hechos a nivel mundial, se procedió a la búsqueda de los trabajos a nivel nacional, los cuales son realizados por instituciones gubernamentales y por autores particulares, algo que también se observó durante la búsqueda de los antecedentes internacionales.

Para el caso nacional se tienen estudios como el de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2002), la cual hizo una evaluación de la degradación antrópica en la República Mexicana escala 1:250,000, elaborado a partir de una valoración directa de los suelos de México en campo y se basó en la metodología de Evaluación Mundial de la Degradación de los Suelos inducida por el hombre.

El estudio muestra que los suelos afectados por algún tipo de degradación representa el 47.7% de la superficie total del país, de esta superficie el 5% presenta un deterioro severo o extremo y el 95% queda ubicado dentro de los márgenes de ligero a moderado.

Los principales factores causales de la degradación de los suelos en México son las actividades agrícolas y el sobrepastoreo, la deforestación se ubica en el tercer lugar. Los estados más afectados son Tlaxcala con el 74%, Yucatán y Tabasco ambos con el 71%.

Néstor, *et al.* (2006) realizaron el estudio de pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo con el objeto de evaluar la pérdida del suelo, productividad y estabilidad del maíz, y la relación erosión-productividad en los Tuxtlas, Veracruz.

De la Cruz (2008) realizó una evaluación del grado de erosión en la cuenca del río Lerma, Estado de México, mediante la aplicación del Método estado de la erosión

del suelo (SES) y del modelo de riesgo por degradación del suelo, con la finalidad de estimar el riesgo del proceso erosivo del suelo y la determinación de áreas prioritarias para la conservación de suelos.

Cardona, *et al.* (2007), realizaron un estudio con el tema de erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental en el estado de Tlaxcala, el cual fue elaborado con un criterio ambiental y de carácter interdisciplinario. Los resultados fueron que la erosión del estado es severa debido a la presencia de diversos eventos en el medio natural, social y económico que han contribuido a la generación de la erosión.

El Gobierno del Estado de México a través de la Secretaría del Medio Ambiente (2008), realizó un trabajo, el cual consistía en poner las bases para un diagnóstico y trataba de identificar zonas susceptibles a la erosión en la entidad federativa.

A nivel municipal, el Programa Estatal de Protección al Ambiente (PEPA) (1996-1999), menciona que el proceso de erosión hídrica en el municipio de Zinacantepec se ve claramente acelerado por la contaminación de agroquímicos usados para la agricultura que son vertidos a los ríos y arroyos.

El Gobierno del Municipio de Zinacantepec a través del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (2009-2012) hace énfasis en que debido a la actividad minera que se da en dicho municipio, al ser extraído el material, ya sea arena, grava o tezontle, se finaliza la vida útil de la mina por lo que es abandonada y por consiguiente, al no ser cerradas de manera adecuada, son zonas altamente vulnerables a que la erosión hídrica se produzca y haga que esa mina abandonada se convierta en cárcava y se vaya agrandando.

Ya que se obtuvieron los antecedentes, se observó que este es un problema que va en aumento, puesto que las instituciones nacionales, e internacionales estudian este proceso para dar soluciones adecuadas que limiten el daño que causa la erosión hídrica.

Para la investigación se tomó como base las siguientes preguntas, para con base en ellas delimitar el objetivo general y los objetivos particulares.

¿Cuáles son los procesos erosivos que se presentan en la Subcuenca La Fábrica?

¿Qué factores y/o elementos, ya sean antrópicos o naturales junto con la erosión hídrica contribuyen para la formación y crecimiento de las cárcavas en la Subcuenca La Fábrica?

El tema se eligió, por los problemas de erosión que presenta la zona de estudio, ya que debido a las actividades humanas en camino de satisfacer sus necesidades, han desprovisto las áreas boscosas de vegetación, dando lugar a que el proceso de erosión hídrica aumente y se agrave, formando cárcavas a causa de la pérdida del suelo.

Al mismo tiempo puede seguir aumentando su tamaño y su profundidad y el mayor problema que representa es que si este proceso se comienza a formar cerca de poblaciones, es un grave peligro para sus habitantes.

Delimitado el problema que se va a estudiar, se elaboraron los objetivos, los cuales están relacionados con el tema y viables.

Se tuvo como objetivo general identificar los procesos erosivos que se presentan dentro de la subcuenca La Fábrica, ubicada en el municipio de Zinacantepec, pero de una manera más específica la erosión hídrica, cabe mencionar que existe erosión eólica dentro de la subcuenca, pero que no es tan representativa como la hídrica.

Ya delimitado el objetivo general se dio paso a los particulares, como primer objetivo se tuvo conocer como el ambiente social y físico se conjuntan para que exista o deje de existir el problema de la erosión hídrica, ya que siempre va a existir erosión hídrica, puesto que es un proceso natural, pero en qué momento se agrava y aumenta a causa de la interacción del hombre.

El segundo fue calcular la pérdida del suelo por la erosión hídrica en la subcuenca, ya que para poder realizar el tercer objetivo fue necesario conocer el volumen de la pérdida que se tiene de suelo.

Como tercer objetivo particular se tuvo el de proponer medidas para la disminución de la erosión hídrica y por consiguiente, minimizar la pérdida del suelo dentro del área de estudio.

Delimitado el problema y objetivos, se procedió a darle un sustento o justificación del por qué se realizará la investigación y más específicamente por qué ese problema y objetivos.

Los ríos son elementos vitales para que exista la vida en cualquier lado del planeta, ya que ellos son los encargados de transportar el agua de diferentes orígenes como manantiales, glaciares, montañas y volcanes nevados, pero con el transcurso de su recorrido, se va contaminando ya sea por acciones antrópicas o naturales, las primeras por contaminación por residuos sólidos y domésticos, industrial, química, frecuente en los campos de cultivo; mientras que las segundas son por erosión, azolve y degradación de la capa superficial.

Para la investigación se escogió como problema la erosión, principalmente la hídrica debido a que los ríos aparte de transportar sedimentos derivados de la denudación de la superficie, el caudal erosiona, sobretodo en donde se encuentra desprovista de vegetación.

Con base en los resultados obtenidos del estudio que se realice en el área delimitada, se propondrán medidas para disminuir el proceso de erosión hídrica, y que a su vez, dicha investigación sirva para aplicarse a otras zonas que se encuentren en las mismas condiciones o parecidas.

El estudio es importante, ya que la subcuenca del afluente la Fábrica se localiza dentro de la CARL (Cuenca Alta del Río Lerma), que está ubicada en un espacio de riqueza natural, paisajística y social; la subcuenca en estudio, ha observado un

crecimiento acelerado de la población que rebasa la satisfacción de las necesidades, cambios significativos en los patrones del uso del suelo y con una degradación progresiva e irreversible al ambiente.

Visto el problema desde un enfoque geográfico, el proceso de formación de cárcavas no se da en días, lleva años su formación, en donde intervienen diversos factores y elementos, los cuales en conjunto son una combinación perfecta para que se presente dicha problemática.

La erosión en cárcavas es un problema que debe importar a las autoridades, la cual inicia con los ejidatarios, los cuales a su vez les hacen saber esas problemáticas que aquejan sus terrenos, en donde autoridades de nivel municipal, estatal y federal han puesto énfasis en solucionar el problema.

Al intentar solucionar el problema, las autoridades han realizado obras estructurales, las cuales han sido insuficientes o mal planeadas, es por esto que con base a un estudio de este tipo se dan las bases que se deben de seguir para tener mejores resultados y poder controlar el problema a fin que en un cierto periodo se puedan reducir las cárcavas y el problema desde el inicio.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO

1.1 Teoría General de Sistemas (TGS)

Surgió con los trabajos del biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy publicados entre 1950 y 1968. No busca solucionar problemas o intentar soluciones prácticas, pero sí producir teorías y formulaciones conceptuales que puedan crear condiciones de aplicación en la realidad empírica (Johansen, 2004).

Describe un nivel de construcción teórico de modelos que se sitúa entre las construcciones altamente generalizadas de las matemáticas puras y las teorías específicas de las disciplinas especializadas y que en estos últimos años han hecho sentir la necesidad de un cuerpo sistemático de construcciones teóricas que pueda discutir, analizar y explicar las relaciones generales del mundo empírico (Johansen, 2004).

Los objetivos de la teoría general de sistemas pueden ser fijados a diferentes grados de ambición y de confianza. A un nivel de ambición bajo pero con un grado de confianza, su propósito es descubrir las similitudes en las construcciones teóricas de las diferentes disciplinas y desarrollar modelos teóricos que tengan aplicación al menos en dos campos diferentes de estudio (Lüthmann, 1996).

Para la presente investigación esta teoría es de gran utilidad ya que se aborda el estudio de un sistema complejo como lo es una subcuenca.

Es importante esta teoría, ya que el tema que se está estudiando actúa como un sistema, compuesto de elementos y factores interactuando entre sí, que hacen que se comporte de una manera específica, y es ahí donde se hace alusión al holismo de la geografía, que significa investigar todo de una manera integral y no por separado.

1.1.1 Generalidades

La TGS tiene supuestos básicos, los cuales son; (Lüthmann, 1996)

- a) Existe una nítida tendencia hacia la integración de diversas ciencias no sociales.
- b) Esta integración parece orientarse rumbo a una teoría de sistemas.
- c) Dicha teoría de sistemas puede ser una manera más amplia de estudiar los campos no físicos del conocimiento científico, especialmente en las ciencias.
- d) Con esta teoría de los sistemas, al desarrollar los principios unificadores que van verticalmente a los universos particulares de las diversas ciencias involucradas nos aproximamos al objetivo de la unidad de la ciencia.
- e) Esto puede generar una integración muy necesaria en la educación científica.

La teoría afirma que las propiedades de los sistemas no pueden ser descritas significativamente en términos de sus elementos separados. La comprensión de los sistemas solamente se presenta cuando se estudian los sistemas globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus subsistemas (Lüthmann, 1996).

Existen dos enfoques para el desarrollo de la teoría. El primero es observar al universo empírico y escoger ciertos fenómenos generales que se encuentran en las diferentes disciplinas y tratar de construir un modelo teórico que sea relevante para esos fenómenos. Este método en vez de estudiar sistema tras sistema, considera un conjunto de todos los sistemas concebibles y busca reducirlo a un conjunto de un tamaño más razonable (Lüthmann, 1996).

Un segundo enfoque es ordenar los campos empíricos en una jerarquía de acuerdo con la complejidad de la organización de sus individuos básicos y tratar de desarrollar un nivel de abstracción apropiado a cada uno de ellos. Este enfoque es más sistemático que el anterior y conduce a lo que se ha denominado un sistema de sistemas (Lüthmann, 1996).

1.1.2 Sistemas

Es un conjunto de partes debidamente organizadas que se relacionan e interactúan entre sí para lograr un objetivo en común. Cualquier conjunto de partes unidas entre sí puede ser considerado un sistema, desde que las relaciones entre las partes y el conocimiento del todo sea el foco de atención.

Según Bertalanffy (1955) el sistema es un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas, se deducen dos conceptos: el propósito (objetivo) y el globalizado (totalidad). Esos dos conceptos reflejan dos características básicas en un sistema.

Propósito (objetivo): Todo sistema tiene uno o algunos propósitos u objetivos. Las unidades o elementos, como también las relaciones, definen una distribución que trata siempre de alcanzar un objetivo (Bertalanffy, 1955).

Globalismo (totalidad): todo sistema tiene una naturaleza orgánica por la cual una acción que produzca cambio en una de las unidades de sistema con mucha probabilidad, producirá cambios en todas las otras unidades de este (Bertalanffy, 1955).

En otros términos, cualquier estimulación en cualquier unidad del sistema afectará todas las demás unidades debido a la relación existente entre ellas. El efecto total de esos cambios o alteraciones se presentará como un ajuste del todo al sistema. El sistema siempre reaccionará globalmente a cualquier estímulo producido en cualquier parte o unidad.

Existe una relación de causa y efecto entre las diferentes partes del sistema. El sistema sufre cambios y el ajuste sistemático es continuo. De los cambios y de los ajustes continuos del sistema se derivan dos fenómenos: el de la entropía y el de la homeostasia (Bertalanffy, 1955).

La entropía es la tendencia que los sistemas tienen al desgaste, a la desintegración, para el relajamiento de los estándares y para el aumento de la aleatoriedad. A medida que la entropía aumenta, los sistemas se descomponen en estados más simples (Bertalanffy, 1955).

La homeostasia es el equilibrio dinámico entre las partes del sistema. Los sistemas tienen una tendencia a adaptarse con el fin de alcanzar un equilibrio interno frente a los cambios externos del medio ambiente (Bertalanffy, 1955).

Los sistemas en cuanto a su constitución pueden ser físicos o abstractos, los primeros están compuestos por equipos, por maquinaria y por objetos y cosas reales, mientras que los segundos están compuestos por conceptos, planes, hipótesis e ideas. Aquí los símbolos representan atributos y objetos, que muchas veces solo existen en el pensamiento de las personas (Johansen, 2004).

Los sistemas en cuanto a su naturaleza se refiere, pueden ser cerrados o abiertos; los sistemas cerrados no presentan intercambio con el medio ambiente que los rodea, pues son herméticos a cualquier influencia ambiental. Así los sistemas cerrados no reciben ninguna influencia del ambiente y por otro lado tampoco influyen al ambiente (Johansen, 2004).

Los sistemas abiertos presentan relaciones de intercambio con el ambiente, a través de entradas y salidas. Intercambian materia y energía regularmente con el medio ambiente; son eminentemente adaptativos, esto es, para sobrevivir deben reajustarse constantemente a las condiciones del medio (Johansen, 2004).

Existen tres premisas básicas en la TGS, las cuales son: (Lüthmann, 1996)

- 1) Los sistemas existen dentro de los sistemas
- 2) Los sistemas son abiertos

Es una consecuencia de la premisa anterior. Cada sistema que se examine, excepto el menor o el mayor recibe y descarga algo en los otros sistemas, generalmente en aquellos que son los contiguos.

Los sistemas abiertos son caracterizados por un proceso de intercambio infinito con su ambiente que son los otros sistemas. Cuando el cambio cesa, el sistema se desintegra, esto es, pierde sus fuentes de energía.

3) Las funciones de un sistema dependen de su estructura.

1.1.3 Aplicaciones a la Geografía

La ciencia geográfica al atender problemas complejos como los ambientales, requiere de manejar variables tanto físicas como humanas y la Teoría General de Sistemas le ofrece como base teórica un marco general para explicar los sistemas en los que interactúan múltiples variables como lo es el relieve, la geología, la edafología, el clima, la vegetación, la hidrología, esto relacionado al contexto físico, mientras que para el contexto social se tienen las actividades socioeconómicas, culturales, religiosas, entre otras.

La principal característica de esta teoría es que todo lo maneja con base en sistemas, y es lo mismo que se hace desde el enfoque geográfico, ya que para estudiar el ambiente físico, humano o en su conjunto, no se pueden separar las variables, sino que se deben de tomar en consideración todas para que el resultado del análisis sea realmente el esperado.

Los campos de aplicación dentro de la geografía son bastos puesto que se utiliza en todo lo que se requiere estudiar, ya sea desde un censo económico hasta ordenamiento territorial, o en el caso físico desde un estudio de procesos erosivos hasta un estudio de impacto ambiental.

Todo está con base en lo que se desee realizar y estructurar de manera adecuada los objetivos para que la TGS pueda ser aplicada de forma correcta.

1.2 Geografía Ambiental dentro de la Ciencia Geográfica

El tema de investigación que se está realizando es adecuado para que se elabore con un perfil geográfico, con apoyo de los principios de esta ciencia, esto porque el geógrafo ve el problema desde una perspectiva holística, la cual integra todo y por consecuencia da soluciones integrales y no por separadas, ya que todo problema siempre tiene una relación con otro u otros.

La relación que tiene la Geografía con el ambiente es importante, puesto que esta ciencia todo lo ve y analiza desde un enfoque holístico, es decir, todo va relacionado, al igual sucede con sus ramas, las cuales no pueden estar separadas, ya que siempre tienen que ir ligadas a fin de poder entender el entorno en el que se desarrolla la sociedad.

Para eso se tiene que reafirmar que el objeto de estudio de la Geografía es el espacio geográfico, el cual tiene que ver con todo lo que nos rodea, por lo cual dicha ciencia puede abordar cualquier problemática pero bajo su propio enfoque, en donde se deben de seguir sus principios para efectos de cualquier estudio, los cuales son la localización que hace referencia a la ubicación sobre la superficie terrestre de las entidades-atributos estudiados; distribución que es básicamente la forma en cómo se reparten las entidades-atributos a lo largo y ancho de la superficie; asociación considera el grado de semejanza y diferencia entre los distintos atributos; interacción que es la configuración de un espacio racional en el cual las ubicaciones, distancias y flujos horizontales resultan fundamentales; y la evolución que no es otra cosa que la incorporación de una variable temporal y su permanente transición de un estado a otro (Santos, 2000).

La Geografía Ambiental es un campo emergente del conocimiento, en el cual la geografía aporta la comprensión de las relaciones espaciales para describir y entender el impacto de las actividades humanas sobre el ambiente. Se refiere a espacio geográfico, en tanto continente de hechos y fenómenos, sociales y

naturales como un sistema complejo, ya que todo se interrelaciona, ya que sin esa interrelación no existiría el sistema como tal.

El interés de los geógrafos en la cuestión ambiental debe acompañarse con una reflexión sobre el marco historiográfico y conceptual en el cual se albergan prácticas académicas específicas como programas educativos en ciencias ambientales e investigación aplicada a la materia.

Por su parte, lo ambiental es visto como las interacciones entre los componentes físicos, químicos y biológicos que ocurren en la naturaleza y constituyen el sostén de vida, los cuales influyen y son influidos por organismos vivos (plantas y animales) y por las actividades humanas; la relación entre espacio y ambiente queda establecida porque los procesos sociales y naturales ocurren en sitios o lugares específicos, así visto la contribución de la geografía a la cuestión ambiental es a través de la perspectiva territorial o espacial del análisis del ambiente que también se identifica con la noción de paisaje.

El ambientalismo surge cuando la geografía recuperó su espíritu holístico, lo que quiere decir que antes solo se enfocaba ya sea a lo humano o a lo físico, pero con el hecho de la recuperación del enfoque holístico, la geografía como ciencia volvió a interesarse por las dos ramas de manera íntegra, ya que los problemas que se venían dando, se hacían cada vez más complejos a lo que solamente abordando los problemas desde una perspectiva integral se podían dar solución a estos (Bocco, 2007).

En realidad ambas, geografía y ciencias ambientales, más que disciplinas, deben ser concebidas como espacios de reflexión y acción pluridisciplinaria y como un campo emergente del conocimiento, que ofrece un conjunto de marcos conceptuales y técnicas analíticas para evaluar y medir el impacto de la presencia humana sobre el ambiente, y actuar en consecuencia en la práctica extra-académica, en investigación aplicada (Bocco, 2007).

1.2.1 La incorporación de la Geografía Ambiental a la Geografía

Para que se diera la fase de integración de las dos ramas de la Geografía a una sola, se dieron diversos procesos, en el cual uno de ellos fue que Barrows (1969) se inclinó hacia la gestión ambiental, con una especialización en las cuestiones referidas al agua y sobretodo en la doble vertiente de recurso y riesgo que presenta este componente fundamental de la naturaleza (Kates y Burton, 1986).

La década de los ochentas fue una etapa importante para que las dos ramas se integraran en una sola, pero es hasta finales de dicha década en donde se dan los momentos más importantes, en donde la geografía crítica prestó atención a otro concepto integrador de la disciplina, el concepto de la naturaleza, aunque durante la década de los setentas y los primeros años de la década de los ochentas la denominada geografía radical anglosajona ya había contribuido a renovar la vieja tradición hombre-medio, principalmente con la introducción de las categorías marxistas en el análisis de las relaciones entre la naturaleza y los humanos (Smith, 1984).

Durante la década de los noventa, la investigación sobre el cambio global ha adquirido un status de reconocimiento dentro de la comunidad científica, sobre todo a raíz del gran impulso dado a la investigación sobre el clima y a la organización de cumbres internacionales sobre esta cuestión (Sauri, 2002).

Los intentos de reconstrucción de la supuesta unidad de la disciplina han abundado durante los últimos años a raíz sobre todo de la percepción de la geografía tenga algo que decir sobre la problemática ambiental. Se mencionan tres posibles alternativas teóricas y metodológicas con las que se intenta canalizar la reconstrucción de la unidad de la geografía en relación con la problemática ambiental (Boada, 2002).

El primero es el enfoque sistémico como mecanismo reintegrador de la unidad naturaleza-cultura. Esta alternativa surgió especialmente del campo de la geografía física poniendo en evidencia el interés que esta subdisciplina ha desarrollado por la influencia humana, en los fenómenos biofísicos desde la década de los sesentas y que muestra la herencia de Marsh, Sauer y Barrows (Gregory, 1985).

El segundo es el dialéctico, en donde debería entenderse la naturaleza y sociedad no tanto como elementos o sistemas sino como procesos o flujos. Por lo tanto se considera que el cambio es una característica fundamental de los sistemas y que la realidad es el proceso y no el sistema. Siguiendo con esta argumentación en vez de naturaleza y sociedad, entendidas como estructuras más o menos permanentes que interaccionan entre ellas, pero que esencialmente no cambian o lo hacen solo a largo plazo, se debería hablar de procesos naturales y de procesos sociales y de cómo estos procesos alteran constantemente no solo las relaciones, sino las propias estructuras (Sorre, 1962).

Una tercera alternativa argumentaría que naturaleza y sociedad no pueden entenderse como elementos o sistemas, ni tampoco como procesos o flujos. Se debe romper la binariedad implícita en estos dos enfoques y en cambio pensar en términos no dualistas. La esencia de estos argumentos es que naturaleza y cultura no son una, pero tampoco son enteramente dos (Haraway, 1991).

El ambientalismo impregna la geografía moderna desde sus inicios y penetra tan profundamente en el entendimiento de la misma, que llega a ser un componente destacado de la cultura geográfica actual (Boada y Capdevila, 2001).

El saber ambiental es interdisciplinario y ha reunido un marco teórico de gran solidez, este saber no es un ámbito nuevo del conocimiento o una nueva disciplina, sino un campo de conocimiento en el que convergen los aportes de conceptos y metodologías de diversas ciencias que tratan los sistemas ambientales complejos. El paisaje, aspecto visible del espacio geográfico, ventana

posible para observar el territorio, es una de las entradas para decodificar los elementos visibles e invisibles que forman parte de los procesos interactuantes en el sistema sociedad-naturaleza. En esta interacción tienen lugar procesos complejos que requieren estudiarse desde una perspectiva multicausal y multiescalar, considerando simultáneamente las dimensiones temporal y espacial (Sauri, 2002)

1.2.2 Aplicaciones de la Geografía Ambiental

Su objetivo es el estudio del paisaje natural en conjunción con los procesos socioeconómicos que se desarrollan en él, incluye las ramas que se dedican al estudio de las variables ambientales y su relación con la población. Trata con dos tipos de fenómenos: los establecidos como parte del ambiente natural (relieve, climas, suelos) y los que resultan de la interacción del hombre y la naturaleza, como cambio global, riesgos y desastres naturales, impacto ambiental, ordenamiento ecológico, etc.

El saber ambiental es interdisciplinario y ha reunido un marco teórico de gran solidez, este saber no es un ámbito nuevo del conocimiento o una nueva disciplina, sino un campo de conocimiento en el que convergen los aportes de conceptos y metodologías de diversas ciencias que tratan los sistemas ambientales complejos. El paisaje, aspecto visible del espacio geográfico, ventana posible para observar el territorio, es una de las entradas para decodificar los elementos visibles e invisibles que forman parte de los procesos interactuantes en el sistema sociedad-naturaleza. En esta interacción tienen lugar procesos complejos que requieren estudiarse desde una perspectiva multicausal y multiescalar, considerando simultáneamente las dimensiones temporal y espacial (Bocco, 2007).

La Geografía Ambiental cuenta con diversas aplicaciones, en donde algunas son dentro de las áreas del territorio, ambiente y desarrollo, estudios especiales de la

naturaleza, la sociedad y sus interacciones, y la planeación para la gestión ambiental, solo por mencionar algunas (Bocco, 2013).

1.3 Cuenca hidrográfica

Para fines de la investigación que se realizará, es necesario conocer todo lo que comprende la zona de estudio y para eso se iniciará de lo general a lo particular, que en este caso es la cuenca hidrográfica.

Dentro de las diferentes definiciones que se tienen acerca de una cuenca hidrográfica, se contemplan cuatro, las cuales mencionan lo siguiente:

La FAO (2002) como organismo mundial define a la cuenca hidrográfica como una unidad territorial formada por un río con sus afluentes, y por un área colectora de las aguas. En la cuenca están contenidos los recursos naturales básicos para múltiples actividades humanas, como: agua, suelo, vegetación y fauna. Todos ellos mantienen una continua y particular interacción con los aprovechamientos y desarrollos productivos del hombre.

Monsalve, (1995), Wingate, (2003) y Hernández, *et al.* (2005), mencionan que una cuenca hidrográfica es un espacio físico que se encuentra definido por un parteaguas y que su punto de referencia es un cauce principal al cual se le van uniendo varios afluentes, los cuales se originan del agua que precipita y/o de manantiales.

Desde una perspectiva de interacciones sobre que es una cuenca hidrográfica, se tiene que (López y Hernández, 1972; Botero y Negret, 1982; Sánchez, 1995; Dourojeanni, *et al.* 2002), para estos autores una cuenca es una unidad espacial limitada por un parteaguas y que dentro de esta se encuentra una serie de interacciones tanto físicas, bióticas, económicas y sociales, las cuales dan como resultado la formación de sistemas complejos.

Para Botero (1982), menciona problemas que suceden en una cuenca hidrográfica como es el caso de la deforestación ya que esta reduce el tiempo de concentración del agua y aumenta el caudal. La degradación de la cubierta vegetal reduce la infiltración y, por lo tanto, la capacidad reguladora del escurrimiento freático que alimenta los manantiales y los cursos de agua, provocando estiajes más acentuados. La acción erosiva de la escorrentía contribuye al incremento del transporte de sólidos, y al comportamiento torrencial de las cuencas de montaña, ocasionando la destrucción de las obras de infraestructura, poniendo en peligro los asentamientos humanos, y ocasionando el entarquinamiento (colmatación con cieno) de embalses, bocatomas y canales.

En las anteriores definiciones se observa cómo ha ido evolucionando el concepto de cuenca hidrográfica a través de los años, ya que algunos solo la definen como un espacio físico, mientras que otros no solo hablan de un espacio físico sino que también hablan de sus interrelaciones e incluso de sus problemáticas, y finalmente una definición oficial como aborda a la cuenca como un espacio de interrelaciones, pero incluye lo que son las subcuencas y microcuencas que hay dentro de una cuenca.

1.3.1 Cuenca como sistema

Una cuenca puede considerarse como un sistema biofísico en el que tiene lugar la entrada, la transformación y la salida de materia y energía. El seguimiento del flujo de ambos factores, a través de las estructuras de este sistema puede revelar las interacciones que ocurren entre sus componentes bióticos y abióticos. Además del agua de la lluvia, las entradas están constituidas también por las sustancias disueltas y suspendidas en el agua de lluvia y los minerales procedentes de la alteración de la roca donde está excavada la cuenca (SEMARNAT, 2013).

Las salidas del sistema pueden ser cuantificadas con relativa facilidad. Una parte importante del agua de la precipitación abandona la cuenca por el cauce principal, cuyo caudal exacto puede evaluarse con la ayuda de una estación de aforo.

Dependiendo de la época del año, la cantidad de agua que sale de la cuenca por evaporación podrá ser más o menos importante. Aunque la mayoría de la energía que ingresa como radiación abandona la cuenca en forma de calor, una parte de ella puede seguir un camino biológico a partir de la fotosíntesis para almacenarse en la biomasa (madera), en el suelo (materia orgánica, humus) y finalmente salir contenido en la materia orgánica que pueda transportar el río. En esta agua salen también los elementos minerales que no han sido retenidos en los diferentes compartimientos del sistema (CONABIO, 2010).

Los ecosistemas juegan un papel importante para que exista un equilibrio en una cuenca, ya que una cuenca funciona como un sistema, por lo cual si hace falta un elemento se pierde la estructura del sistema.

En una cuenca existen características hidrogeomorfológicas y humanas. Dentro de las primeras, tiene que estar delimitada por un parteaguas, la cual es una línea divisoria imaginaria para poder separar cuencas, y para poder realizar esto, otra característica que se tiene es el río o afluente principal, el cual es perenne y es con base en a este que se tiene que delimitar la cuenca con el parteaguas.

Dentro de la cuenca existen ríos intermitentes, los cuales se unen al río principal formando la red de drenaje de la cuenca, la cual puede ser de primer, segundo, tercer, cuarto o quinto orden.

Otra característica es su relieve, ya que no todas las cuencas son iguales y por ende no todas tienen el mismo tipo de relieve, se puede encontrar dentro de las cuencas son montañas, mesetas, lomeríos, valles, principalmente.

Las características humanas o antrópicas son todas las obras y actividades que se desarrollan dentro de esta, como pueden ser actividades económicas, culturales, religiosas, recreativas; obras de retención de agua para consumo o para la agricultura.

No solo son para el ser humano, sino también para el medio ambiente, es decir, los beneficios que da la cuenca son desde recursos naturales como son bosques dando como resultado producción maderable y material para los pobladores para edificar casas, establos,; fauna, sirviendo de alimento, agua, la cual tiene infinidad de usos tanto para el ambiente como para la sociedad; suelo, el cual permite que la población pueda realizar actividades agrícolas; y finalmente las rocas, ya que sirven principalmente para beneficios de los pobladores en actividades mineras.

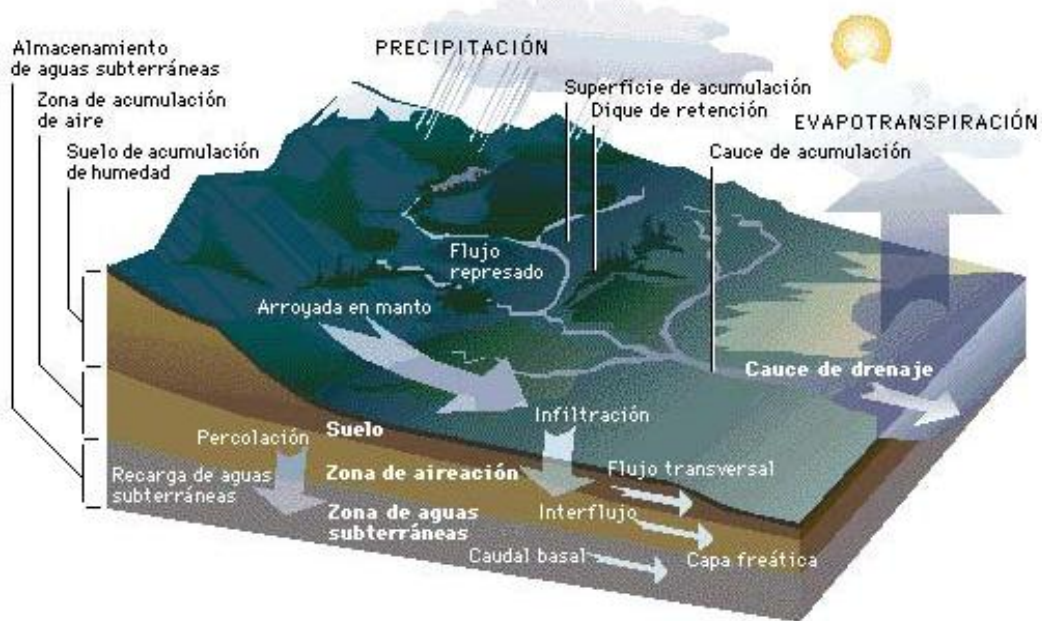
Pero el beneficio más importante que da una cuenca es el ciclo hidrológico, el cual permite que se pueda mantener un ambiente limpio y que a su vez todas las demás actividades que se ven beneficiadas de la cuenca puedan estar en pro (SEDAGRO, 2007).

Las problemáticas aparecen cuando la sociedad no mantiene un equilibrio dentro de esta, dando como resultado que se altere y como consecuencia última afectando a toda la cuenca en general.

Esto debido a que las actividades económicas van aumentando, comienza la destrucción de los bosques y vegetación en general; el uso irracional de agroquímicos que van a dar a los afluentes haciéndolos dañinos para el consumo humano.

En la figura 1.3.1 se ilustran los componentes que existen dentro de una cuenca

Figura 1.3.1 Cuenca como sistema



Fuente: Peralta, 2012

Conforme va creciendo la población existe una caza al por mayor de la fauna existente, que en algunos casos la desaparecen por completo o la dejan en peligro de extinción.

Estos problemas en conjunto, favorecen erosión hídrica, ya que al no tener cobertura forestal en la parte alta no se infiltra el agua y escurre por la superficie desprotegida de vegetación y por los cultivos, ocasionando pérdida de suelo, formación de arroyadas, surcos y cárcavas.

Dicho proceso final, llamado cárcava, al no tener un control mediante medidas, principalmente estructurales, continuará socavando y ampliándose de manera longitudinal y transversal, dando como resultado la pérdida de parcelas de uso agrícola y ganadero y en algunos casos dando lugar a que exista el riesgo de que colapsen las viviendas cercanas a dichas formaciones.

1.3.2 Manejo y administración de la cuenca

El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la Cuenca, encaminado a lograr un desarrollo social y económico sostenible en el tiempo, además de la protección del medio ambiente (González, 2000).

Para llevar a cabo este proceso es necesario conocer el interés por estudiar la cuenca seleccionada. La respuesta debe ser bien orientada, es decir, existe un motivo concreto bien definido, que explica la necesidad de llevar a cabo el estudio integral de la cuenca dada, ya sea por fenómenos negativos que degradan en alguna medida la cuenca; porque se desea planificar y desarrollar social y económicamente la misma o parte de ella o por la coexistencia de los dos motivos anteriores.

Una vez definida la orientación de la investigación que de hecho es el objetivo principal y más general, se deben definir los objetivos específicos, los que nos deben guiar táctica y metodológicamente para lograr el objetivo principal. En seguida, es necesario delimitar la ubicación geográfica de la cuenca, incluyendo un breve análisis geográfico de las cuencas circundantes, para detectar posibles relaciones físicas, socioeconómicas y medioambientales que puedan ser de interés.

El Manejo Integral de Cuencas (MIC) es donde se debe plantear de modo organizado y bien estructurado, el plan de medidas que deben resolver o aliviar los problemas que de forma particular y/o integral afectan toda la cuenca. Esta es una etapa muy compleja, donde coinciden factores y elementos administrativos, institucionales y jurídicos, entre otros, que son los encargados de poner en práctica todo el Plan de Manejo Integral (PMI) para lograr el objetivo principal, supuestamente bien definido en la primera etapa. Hay que destacar que en esta etapa, debe contemplarse dentro de las principales medidas, el establecimiento de un Plan de Seguimiento y Control que de forma operativa tiene la responsabilidad

de garantizar el cumplimiento del PMI. Este plan de Seguimiento y Control es el que generalmente deben controlar los Comités o Comisiones de Cuencas (Eccardi, 2005).

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) no puede ser únicamente responsabilidad del gobierno, y no sólo por las limitaciones en cuanto a la eficiencia administrativa y la escasez de recursos económicos y humanos, sino porque los problemas vinculados con el agua requieren para su solución la participación de los usuarios, de las comunidades locales y de la sociedad en general. Además, es un derecho de la sociedad involucrarse, mediante reglas, en los procesos de toma de decisión pública que afecten su calidad de vida (Eccardi, 2005).

La participación no es un fin en sí mismo, sino el medio para lograr los equilibrios y consensos necesarios entre los diversos intereses del desarrollo y del medio ambiente, y acercar las visiones entre los actores gubernamentales y los sociales con el fin de lograr la sustentabilidad del manejo del agua (Eccardi, 2005).

La opinión pública está cada vez más consciente de los riesgos que implica para el ambiente y para la misma sociedad la expansión de patrones incontrolados de extracción de los recursos naturales, la producción de sustancias que dañan irremediablemente la salud pública y los ecosistemas, y la alteración irracional del medio ambiente como consecuencia de la actividad mercantil regida por las fuerzas de la oferta y la demanda.

Por ello, no resulta extraño que durante las últimas dos décadas se hayan multiplicado las iniciativas sociales tendientes a la defensa de los recursos naturales y a la protección del medio ambiente. En este terreno, así como en el de los derechos humanos, la sociedad civil organizada ha constituido una importante fuerza social que demanda constantemente acciones decididas por parte del Estado (Eccardi, 2005).

Al mismo tiempo, los responsables de la política ambiental y del manejo de los recursos naturales, sobre todo en el ámbito federal, han sido sensibles al hecho de que la magnitud y la complejidad de los problemas relacionados con la materia es una tarea que rebasa, con mucho, las capacidades de cualquier entidad aislada de la gestión pública federal (Eccardi, 2005).

Por ello, la evolución de la conciencia social sobre los problemas ambientales y de manejo de los recursos naturales, al igual que el reconocimiento de que es indispensable el concurso de la sociedad, han dado lugar a la creación de un número creciente de agrupaciones de la sociedad civil y a la multiplicación de instituciones públicas y privadas que se ocupan de dar seguimiento y atender los problemas legales, científicos, técnicos, sociales y políticos asociados con el tema (Eccardi, 2005).

En materia de agua, en particular, la participación de la sociedad está dominada por dos tipos de actores. Por un lado, se encuentran las organizaciones que se involucran en los problemas del agua, en tanto éste es un tema ambiental. Son organizaciones nacionales o locales cuyas agendas incluyen, en general, temas más amplios como la conservación y la contaminación. El otro tipo de organizaciones son las que se involucran por la afectación del uso directo del agua, ya sea por un proyecto específico a escala local o respondiendo a políticas generales nacionales (Martínez, 2005).

Los avances en los mecanismos y las formas de organización para la participación de la sociedad en la gestión de temas ambientales y el manejo de recursos naturales han sido evidentes y sorprendentes durante las últimas dos décadas. Sin embargo, es preciso reconocer que ni los mecanismos ni las organizaciones son lo suficientemente maduros ni sólidos como para ofrecer alternativas integrales en respuesta a la complejidad de los problemas en esta materia, para generar una visión común sobre el futuro deseado en el manejo integral del agua, y para velar por el interés público y rebasar las reacciones coyunturales (Carabias, 2005).

La participación de la sociedad carece aún de estructuras representativas, plurales e incluyentes de los diferentes sectores. Las organizaciones, por lo general, no tienen una vida democrática interna con mecanismos de consulta y toma de decisiones consensuadas (Carabias, 2005).

Más aún, lamentablemente, algunas organizaciones surgen de manera oportunista, bien sea para un tema puntual, que aunque legítimo es efímero, o por la defensa de intereses privados o de grupo, que ejerciendo mecanismos de presión logran ilegítimamente su propósito. Las posiciones que son llevadas por estas organizaciones a las instancias colegiadas suelen ser más bien posiciones personales de sus representantes que planteamientos representativos del gremio o sector que representan. Ello hace posible que los sectores con mayor poder o capacidad de influir presionen para tomar decisiones que no reflejan el interés público del agua como bien común, ni el beneficio colectivo (Carabias, 2005).

Con la finalidad de garantizar que los mecanismos de participación organizada de la sociedad sean democráticos y cumplan con sus objetivos, éstos deben contar con un marco jurídico sólido que defina claramente las reglas que permitan las condiciones de entendimiento entre los actores, así como las responsabilidades y limitaciones de los distintos grupos sociales y de las autoridades (Carabias, 2005).

En cuanto a la participación social dentro de la estructura administrativa del gobierno, el aspecto novedoso resulta ser la inclusión, en el Consejo Técnico de la CONAGUA, de “un representante de una organización ciudadana de prestigio y experiencia relacionada con las funciones de la Comisión” (artículo 10 de la LAN), nombrado por el Ejecutivo federal para participar con voz y voto en la toma de decisiones. Además, se mantiene la posibilidad de invitar a sus sesiones a representantes de los usuarios y de la sociedad organizada, con voz pero sin voto. A su vez, los organismos de cuenca contarán con un Consejo Consultivo en el que participará un representante de los usuarios con voz pero sin voto.

Ésta es la primera vez que en el máximo órgano de autoridad de la CONAGUA, el Consejo Técnico, participa con voz y voto un representante de la sociedad, lo que aun siendo insuficiente, significa un importante avance que responde al reclamo social de apertura de los órganos de toma de decisiones. Sin embargo, la reforma puede quedar sin efecto si no se garantiza que este representante realmente recoja y defienda las preferencias de la sociedad organizada, lo que significa un enorme reto. En caso de no realizarse, aunque sea de manera paulatina, se puede caer en el problema señalado antes, en el que la representación social queda secuestrada por personajes que no representan realmente a la sociedad (Carabias, 2005).

Asimismo, no parece ser congruente la reforma (Decreto que reforma la Ley de Aguas Nacionales, 2007) a la LAN en cuanto al tratamiento que da a la participación social. Mientras que en el máximo órgano de autoridad (Consejo Técnico de la CONAGUA) se incorpora a un representante social con voz y voto, en los consejos consultivos de los organismos de cuenca, entre cuyas facultades se define la de acordar la política hídrica regional, el representante de los usuarios participa sólo con voz. Estas incongruencias pueden mermar el potencial de participación pública y hacer que los órganos consultivos pierdan credibilidad (Carabias, 2005).

Por otra parte, los consejos de cuenca están compuestos, al menos en 50%, por miembros pertenecientes a la sociedad, ya sean usuarios, empresas u organizaciones sociales. De igual forma, uno de los cuatro órganos de funcionamiento de los CC es la Asamblea General de Usuarios, en la que aquéllos definirán las posiciones que serán llevadas a los consejos de cuenca. Este último mecanismo constituye un avance muy importante que, bien aplicado, tiene el potencial de garantizar que las posiciones de los usuarios hayan sido discutidas ampliamente entre ellos, y que sus representantes en el Consejo de Cuenca se conviertan en verdaderos enlaces entre los usuarios y el Consejo (Eccardi, 2005).

En la Ley se incluye también al Consejo Consultivo del Agua, definiéndolo como “organismo autónomo de consulta integrado por personas físicas del sector privado y social, estudiosas o sensibles a la problemática en materia del agua y su gestión y las formas para su atención y solución, con vocación altruista y que cuenten con un elevado reconocimiento y respeto” (LAN, artículo 14 bis, 1). Este Consejo tiene la facultad de “asesorar, recomendar, analizar y evaluar respecto a los problemas nacionales prioritarios o estratégicos relacionados con la explotación, uso o aprovechamiento, y la restauración de los recursos hídricos, así como en tratándose de convenios internacionales en la materia” (LAN, artículo 14 bis, 1). La LAN no define atribuciones más precisas a este Consejo (Martínez, 2005).

Si bien la reforma a la LAN es un indudable avance en cuanto a la apertura y consolidación de los espacios de participación social, resulta insuficiente al no definir explícitamente cuáles son las funciones de la sociedad, lo que permitiría aclarar los alcances de la corresponsabilidad y diferenciarla de las responsabilidades de los actos de gobierno (Martínez, 2005).

En la reforma a la LAN se incluyen numerosas menciones que permiten fomentar y facilitar la participación social en la planeación, toma de decisiones, ejecución, evaluación y vigilancia de la política hídrica nacional. Por primera vez se considera la organización de los usuarios y de asociaciones civiles como motivo de interés público y se abre la posibilidad de recurrir a la denuncia popular (Martínez, 2005).

Además, algunos temas centrales y de conflicto potencial en la gestión del agua serán discutidos en los consejos de cuenca con la finalidad de recoger las preferencias de la sociedad, como son: concertar las prioridades de uso del agua con sus miembros y con el Organismo de Cuenca que corresponde; impulsar el uso eficiente y sustentable del agua; promover la participación de las autoridades estatales y municipales y asegurar la instrumentación de los mecanismos de participación de los usuarios de la cuenca y las organizaciones de la sociedad, en

la formulación, aprobación, seguimiento, actualización y evaluación de la programación hídrica de la cuenca o cuencas de que se trate, en los términos de ley; desarrollar, revisar, conseguir los consensos necesarios y proponer a sus miembros para el proyecto de Programa Hídrico de la Cuenca (Eccardi, 2005)

De igual forma, la CONAGUA está obligada a consultar a los usuarios y organizaciones, en el ámbito del Consejo de Cuenca, sobre las posibles limitaciones temporales a los derechos de agua existentes y a estudiar, con el concurso de los consejos de cuenca y organismos de cuenca, los montos recomendables para el cobro de derechos de agua y tarifas de cuenca, incluyendo el cobro por extracción de aguas nacionales, descarga de aguas residuales y servicios ambientales vinculados con el agua y su gestión, para ponerlos a consideración de las autoridades correspondientes en términos de Ley (Eccardi, 2005).

1.4 Erosión

Es el desprendimiento y arrastre de las partículas finas como las arenas, limos y arcillas ligado a factores geológicos, geomorfológicos, antrópicos, hídricos o eólicos. Las partículas finas son desprendidas y arrastradas por agua de escorrentía, posteriormente sedimentan en áreas bajas y depresionales o son salidas al mar. De esta manera la erosión incluye tres etapas básicas: desprendimiento, transporte y sedimentación (FAO, 1996).

El proceso erosivo se inicia con el desgaste de las rocas y de los materiales rocosos que afloran en la superficie terrestre y conducen finalmente a la producción de guijarros, arenas, limos y arcillas (Hudson, 1971).

En forma cíclica las arcillas y limos son muy vulnerables a los procesos erosivos dependiendo de la pendiente, cobertura vegetal, composición del suelo, acción de las gotas de lluvia o del viento, los sistemas de uso y manejo del suelo, el contenido de materia orgánica y su desarrollo estructural (Hudson, 1971).

1.4.1 Tipos de erosión

Existen diferentes tipos de erosión, los cuales son erosión natural, erosión antrópica, erosión eólica y erosión hídrica.

La primera consiste en el desgaste de rocas y sedimentos provenientes de la fractura de materiales rocosos situados en la parte superficial terrestre, la cual es causada por: la energía proveniente de la radiación solar, las tensiones gravitacionales y la inercia rotacional, el calor interno de la tierra (Bloom, 1982).

La erosión natural produce a lo largo de una evolución lenta el desgaste de superficies rocosas, la modificación de los paisajes y la acumulación de sedimentos en las áreas más bajas de una región geográfica (Bloom, 1982).

La segunda es causada como su nombre lo dice por la actividad humana, en su afán por suplir alimentos y materias primas para los diferentes procesos industriales en donde al hacerlo causa desequilibrios en los ecosistemas, favoreciendo el desarrollo de procesos erosivos cuando se talan y queman los bosques y la vegetación circundante o causando la ruptura de ciclos hidrológicos naturales (Arroyo, 1992).

La erosión eólica se presenta en las regiones que tienen un régimen pluvial estacionalmente seco y están sujetas a la acción de vientos fuertes. Esta condición hace que el viento desprenda las partículas finas del suelo como arenas gruesas, medianas y muy finas, además de limos y arcillas y las transporte por mecanismos de suspensión, saltación y deslizamientos paulatinos (Schwabb, 1990). Los tres mecanismos de erosión eólica ocurren de forma simultánea a alturas menores de un metro.

La erosión hídrica es un proceso erosivo típico de regiones tropicales causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos (Morgan, 1964).

El efecto del agente causal (agua de lluvia), se magnifica cuando se conjugan otras variables como la pendiente abrupta o escarpada de los terrenos, la ausencia de cobertura vegetal y la condición textural o el pobre desarrollo estructural de los suelos, y finalmente el uso de la tierra (Morgan, 1964).

Ellison (1947) propuso una división del proceso de erosión hídrica en tres fases básicas, la cual se mantiene vigente, siendo la misma de fundamental importancia al tratarse del estudio de este importante fenómeno de degradación del suelo.

Separación: consiste en el desprendimiento y disgregación de los agregados del suelo en partículas de tamaños transportables.

Transporte: en esta fase las partículas y/o agregados, separados del suelo, se mueven con el agua a través de la pendiente.

Sedimentación: consiste en el depósito de los materiales de suelo transportados, que ocurre al disminuir la capacidad de transporte del flujo de agua. La acción es intermitente, pues el suelo depositado, es puesto de nuevo en movimiento, al reiniciarse la actividad del agua.

1.4.2 Erosión hídrica y tipos

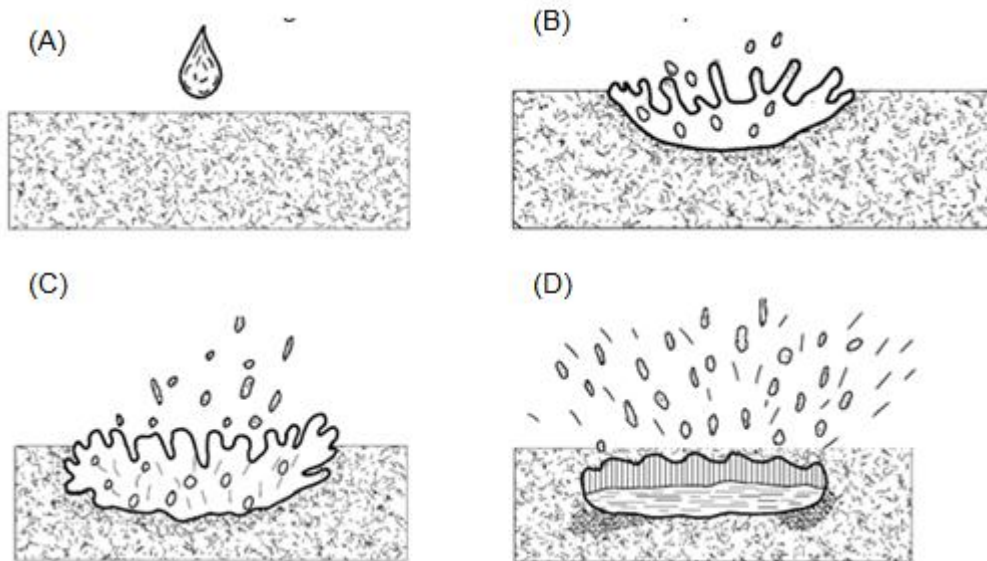
Dentro de la clasificación de los tipos de erosión hídrica se tienen cuatro tipos, los cuales serán descritos de manera breve a continuación

Erosión pluvial

Esta forma de erosión es consecuencia directa del impacto de las gotas de lluvia en el suelo sin cobertura vegetal, las gotas de lluvia desprenden las partículas del suelo gracias a la energía cinética (Morgan, 1964).

La figura 1.4.2.1 muestra el proceso de erosión por caída de agua o erosión pluvial.

Figura 1.4.2.1 Proceso de erosión pluvial



Fuente: Derpsch, R. *et al.* (1991)

Figura 1.4.2.1: Proceso de erosión pluvial. Primero cae la gota de lluvia (A), el impacto de la gota provoca que el material consolidado sea expulsado y que se reblandezcan otras zonas (B), tras la caída de varias gotas la zona se amplía (C), hasta que finalmente el espacio ocupado por suelo ahora es ocupado por agua (D) y el suelo expulsado y sin consolidar es arrastrado por el escurrimiento, provocando su pérdida en la zona.

Se identifica en el campo porque el envés de las hojas bajas de los cultivos tiene adheridas pequeñas partículas de suelo que se pueden definir como grumos, ya que inicialmente es una mezcla viscosa de agua y coloides que se adhieren finalmente al envés de la superficie foliar (Arroyo, 1992).

Erosión en masa

Este tipo de erosión incluye fenómenos de desprendimiento, transporte y depositación de grandes masas de suelo por acción de la fuerza del agua en movimiento. En el desprendimiento y transporte de las masas actúan las fuerzas de gravedad y la fuerza del agua (Morgan, 1964).

Los fenómenos de erosión en masa incluyen los siguientes tipos de movimiento (Gray y Sotir, 1996):

- Reptación (Creep)
- Flujos de tierra
- Flujos de lodo
- Flujos de detritos
- Flujos hiperconcentrados
- Avalanchas

Erosión laminar

Consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa. El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos residuales y en las zonas recientemente deforestadas.

El agua parcialmente se infiltra y se acumula sobre la superficie del terreno formándose una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 milímetros de espesor. El flujo laminar tiene poco poder erosivo pero en partes se convierte en turbulento, aumentando de manera importante su capacidad de erosión; al juntarse la acción de la lluvia y con el flujo laminar se genera turbulencia en el flujo, aumentando la capacidad de erosión. El flujo de agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimento (Morgan, 1964).

Las áreas de cultivos no permanentes son extraordinariamente susceptibles a la erosión laminar al igual que los suelos sin vegetación y los sujetos a sobre pastoreo de ganado.

Erosión en surcos

Ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión, formándose

pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero poco a poco se van volviendo más profundos. En estos surcos la energía del agua en movimiento adquiere cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual puede pasar a forma en U (Morgan, 1964).

Los surcos paralelos forman una red de drenaje en la cual los más profundos rompen la divisoria de los pequeños, llevando el agua al punto más bajo, dicho proceso fue llamado por Horton (1945) como micro piratería; su efecto es que talud abajo es mayor su espaciamiento y la profundidad predominante es la de los surcos de mayor poder erosivo. Puede ocurrir durante el tiempo de una sola lluvia o con el proceso continuado de varias lluvias, la capacidad erosiva de los surcos es tal, que si la cobertura vegetal y de raíces no es muy fuerte, puede romper la vegetación. Los surcos en ocasiones pasan por debajo de las raíces.

En la figura 1.4.2.2 se muestra la erosión en surcos, fase previa a la erosión en cárcavas, dichos surcos se localizan en el Nevado de Toluca.

Figura 1.4.2.2: Erosión en surcos



Fuente: Imagen tomada en trabajo de campo, 2014

La erosión en surcos es la causante del mayor porcentaje de producción de sedimentos sobre la superficie de la tierra (Schwab, 1981). La mayor parte del volumen total de sedimentos transportados por procesos erosivos ocurre en forma de surcos, después de la acción del golpeo de la lluvia. La acción de golpes de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, forma inicialmente microsurcos de erosión y a medida que la longitud de flujo es mayor los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por una unidad de área.

Los suelos más susceptibles a formación de surcos son los suelos expuestos al agua sin cobertura vegetal alguna. Entre mayor sea la cobertura vegetal superficial, la susceptibilidad a la formación de surcos disminuye.

Los taludes o laderas cóncavas son muy vulnerables a la formación de surcos y cárcavas, debido al aumento de velocidad en la parte alta de una corriente concentrada. La estructura de los suelos residuales facilita la formación de corrientes rectas en forma de cuña, en las cuales concentran el agua y fácilmente se forman surcos y cárcavas.

Erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas viene dado de la erosión en surcos, pero aquí los surcos se amplían y se profundizan para posteriormente convertirse en cárcavas o bien varios surcos se unen y crecen hasta la magnitud de ser una cárcava.

En la figura 1.4.2.3 se ilustra la erosión en cárcavas, la cual se encuentra activa.

Figura 1.4.2.3: Erosión en cárcavas



Fuente: Imagen tomada en trabajo de campo, 2014

Se denomina cárcava a un canal de erosión con una sección superior a un pie, estos canales ya no pueden ser eliminados con prácticas agrícolas. Las cárcavas tienen una mayor capacidad de transporte de sedimentos que los surcos, debido a que las tasas de flujo son mayores, dichas formaciones actúan como cauces de concentración y transporte de agua y sedimentos; en este proceso una cárcava con cauce en V captura a las vecinas y va transformando su sección de una V ampliada a U, al inicio las cárcavas son en V pero generalmente terminan con forma en U; son canales mucho más largos que los surcos, dichos canales transportan corrientes concentradas de agua durante e inmediatamente después de las lluvias. Las cárcavas van avanzando o remontando hacia arriba formando una o varias gradas o cambios bruscos de pendiente (Morgan, 1964).

Las áreas más susceptibles a erosión en cárcavas son aquellas de topografía de alta pendiente y mantos de suelo de gran espesor. Las mesetas semiplanas que recogen gran cantidad de aguas de escorrentía y a su vez tienen taludes de pendiente fuerte lateral presentan especial susceptibilidad a la formación de cárcavas, especialmente cárcavas anchas. Las áreas más afectadas por

cárcavamientos son aquellas que tienen suelos dispersivos o altamente erosionables (Morgan, 1964).

En el caso de suelos expansivos los procesos de humedecimiento y secamiento facilitan la formación de las cárcavas; la parte más crítica es la superficie del terreno, es decir, en la parte alta del talud exactamente por debajo de las raíces de vegetación. Esta zona se erosiona, aún después de un proceso de revegetalización del talud general, en el caso en el cual aparecen suelos duros en el talud como afloramientos de roca, se van formando gradas y la cárcava avanza indistintamente en cada nivel (Morgan, 1964).

Así mismo, la eliminación de la cobertura vegetal o la destrucción de la estructura del suelo por remoción de la capa protectora superficial, expone el suelo a la erosión. La formación de cascadas o caídas de agua acelera el proceso de cárcavamiento (Morgan, 1964).

Aunque el volumen total de pérdidas de suelo en el mundo debida a la erosión en cárcavas es comúnmente menor que la debida a la erosión laminar y en surcos, los daños asociados con la erosión en cárcavas puede ser mucho más significativo y los riesgos para las vidas humanas pueden ser mayores. Las cárcavas no son tan significativas como los surcos en términos del total de sedimentos que se producen en el mundo, pero son mucho más destructivos en términos de daño a carreteras, terraplenes, ciudades, etc. (Morgan, 1964).

La dinámica de la formación de las cárcavas es compleja y no se encuentra totalmente entendida hasta el momento. Se ha propuesto varios modelos estadísticos para predecir el crecimiento y desarrollo de las cárcavas (Beer y Johnson, 1963).

Los procesos más importantes en el crecimiento de una cárcava son:

1. Profundización del fondo de la cárcava. El fondo de la cárcava se va profundizando en forma continua o discontinua. El proceso continúa hasta que se

logra una pendiente de equilibrio o aparece un manto profundo más resistente a la erosión.

2. Avance lateral. Al profundizarse el fondo de la cárcava esta se amplía por la inestabilidad geotécnica de los taludes laterales (Bache y Macaskill, 1984).

3. Erosión acelerada concentrada en los sitios de cambio topográfico en el fondo de la cárcava.

4. Avance de la cabeza de Cárcava. El avance más dramático es comúnmente el avance de la cárcava hacia arriba de la pendiente, aumentándose permanentemente la altura del escarpe vertical entre la corona y la cabeza. Entre más alto es el escarpe, la inestabilidad es mayor y la cárcava avanza a una mayor velocidad.

El afloramiento de agua en las paredes o pies de los taludes de la cárcava es un factor muy importante en el avance tanto lateral como aguas arriba en el proceso de erosión. Al encontrar corrientes de agua subterránea se aumenta a su vez el proceso de inestabilidad del escarpe y la rata de avance de la cárcava.

5. Erosión laminar y en surcos. Dentro de las cárcavas se pueden producir procesos de erosión laminar o erosión en surcos, debidos especialmente al impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía difusa.

El procedimiento de la ampliación de las cárcavas por efecto de la erosión ocurre cuando las aguas de escorrentía concentrada forman inicialmente surcos, los cuales se profundizan por debajo de la cobertura vegetal. Una vez se forma la cárcava de erosión ésta se va tornando más profunda, y se produce ampliación lateral y hacia arriba. El proceso continúa con la profundización y ensanchamiento del canal. La cabeza de la cárcava se hace más alta y esta avanza talud arriba cada vez más rápidamente, volviéndose prácticamente incontrolable. Adicionalmente a la erosión propiamente dicha, se produce desprendimiento lateral de pequeños bloques de suelo. La profundización de la cárcava trae a su

vez su ampliación y su avance hacia arriba. La cabeza de la cárcava forma un escarpe cada vez más alto y lo mismo ocurre lateralmente. Se presentan entonces deslizamientos de tierra en estos taludes semiverticales (Lee, 1996).

En este proceso se pueden formar varios canales secundarios. Al profundizarse el canal se aumenta la pendiente y la capacidad erosiva de la corriente concentrada; sí en el proceso de cárcavamiento el canal se profundiza por debajo del nivel freático, se generan erosiones por exfiltración del agua subterránea hacia la cárcava acelerándose el proceso de ampliación de la cárcava; mientras que sí aparece a profundidad un manto más resistente a la erosión, el proceso de profundización disminuye pero el proceso de ampliación continúa. En el fondo de la cárcava se pueden formar gradas o caídas de agua por erosión diferencial de los diversos mantos (Lee, 1996).

A medida que se va formando la cárcava, el caudal aumenta progresivamente y se crea un desequilibrio con un nivel muy alto de turbulencia. La combinación de caudal, radio hidráulico, rugosidad y gradiente, generan un proceso de aumento progresivo de la capacidad de erosión y la erosión a su vez va modificando en forma casi geométrica los niveles de velocidad y turbulencia, creándose un proceso que puede avanzar muy rápidamente y amenazar la estabilidad de grandes áreas de terreno (Lee, 1996).

El proceso generalmente no es auto controlable, sino que se perpetúa en el tiempo afectando cada vez más áreas. Una vez se forma una cárcava, la erosión progresa hacia aguas arriba con la acción erosiva causada por el flujo concentrado dentro de la cárcava y la inestabilidad lateral (Lee, 1996).

1.4.3 Factores que intervienen para la erosión hídrica

Existen diversos elementos, factores y procesos que se presentan en una cuenca, pero solo algunos provocan que exista la erosión, y específicamente la hídrica, los procesos son naturales y sociales, ya que todo esto actúa como un sistema complejo y no se pueden dejar excluidos de dicho sistema.

Naturales

Son los que se dan por efecto de la misma naturaleza, que en este caso son a causa de procesos geológicos ocurridos hace millones de años y que son los causantes del modelado del relieve y por el ciclo del agua. Los procesos naturales que ocurren dentro de la cuenca para que se dé la erosión hídrica son las laderas, precipitación, infiltración y escorrentía y la vegetación, a continuación se describen cada uno de ellos:

Hablando de laderas, dichos elementos son una parte importante dentro de una cuenca, ya que en primera instancia son las que delimitan una cuenca de otra y conforme a su tamaño, van definiendo las subcuencas y microcuencas, junto con esto está el hecho de que son las responsables de hacer que la cuenca mantenga un balance con el agua, ya que estas formaciones son las causantes de distribuir el agua hacia los ríos y a los mantos acuíferos a través de la infiltración en situaciones de precipitaciones, existencia de manantiales y en caso de existencia de nieve, en su descongelamiento (Dorcken, 1995).

La mayor parte de la superficie terrestre está formada por laderas (Young, 1972) y pueden considerarse como una de los componentes fundamentales del relieve. El estudio de su forma, significado y evolución constituye una de las materias básicas de la Geomorfología (Douglas, 1977).

Las laderas han sido poco estudiadas hasta las últimas tres décadas en las que han proliferado la investigación sobre los procesos tanto en parcelas experimentales en campo, como en el laboratorio, se han desarrollado modelos de peligrosidad y procedimiento de análisis de estabilidad de las laderas, no obstante, su investigación resulta difícil debido a su complejidad del fenómeno, cuyos mecanismos de funcionamiento no se conocen en general de manera detallada (Carson y Kirkby, 1972).

Una ladera desde el punto de vista geomorfológico es la porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas o negativas. Por su aspecto las laderas pueden ser: rectas: verticales, a desplome e inclinadas respecto a un plano horizontal, ambas con una clara expresión de su base; cóncavas: la parte superior empinada y la inferior suave, con una base con débil expresión; convexas: la parte superior suave, incrementándose la pendiente hacia abajo, el piso se aprecia fácilmente; escalonada: en su perfil se presentan varias rupturas de pendiente que forman numerosos escalones; compuestas: combinación de las anteriores (Dorken 1995).

En la figura 1.4.3 se ilustra la forma de la ladera que tiene el Nevado de Toluca.

Figura 1.4.3 Ladera



Fuente: Imagen tomada en trabajo de campo, 2014

Existen diversas formas o formas inferiores del relieve que existen dentro de las laderas, las cuales pueden ser las barrancas, cauces y piedemontes. Las primeras tienen una asociación con los cañones, pero a menor escala y son formadas y modeladas por la presencia de los ríos a través de los años, dicha evolución puede darse en el transcurso de millones de años; al mismo tiempo dichas formaciones cuentan con vegetación de tipo riparia.

La segunda forma es el cauce que es la parte de un valle por donde discurren todas las aguas en curso. Finalmente se encuentran los piedemontes, los cuales son una superficie marginal a las montañas, de las que se distingue por una pendiente y alturas considerablemente menores. Las formas y estructuras de los piedemontes son diversas, la primera está constituida por el sustrato rocoso, con una capa delgada de material no consolidado, en relieve de lomeríos, cuesta, meseta, superficie escalonada; la otra consiste en capas potentes de sedimentos, principalmente proluviales: conos de eyecciones, coalescentes a manera de un manto de perfil ligeramente convexo o disecado por barrancos. Las rocas que subyacen los piedemontes pueden ser de la misma edad que las de las montañas o más jóvenes y por lo mismo menos deformadas (Lugo, 1989).

Para saber cuál fue su origen y evolución de dichas formas del relieve es necesario saber que son los procesos geomorfológicos, y posteriormente describir las teorías que se han dado a lo largo de la historia, pero sobretodo las más importantes y significativas, que hasta el día de hoy siguen siendo válidas (Lugo, 1989).

Los procesos geomorfológicos son aquellos procesos que producen cambios de relieves en la superficie terrestre y pueden ser ocasionados por agentes naturales o por el hombre. Los procesos geomorfológicos dejan su impresión distintiva sobre las formas del terreno y cada proceso geomorfológico desarrolla su propio conjunto característico de formas de relieve. Dichos procesos pueden ser endógenos o exógenos (Lugo, 1989).

Los primeros son producidos por fuerzas internas de la tierra (tectónicos, magmáticos, metamórficos e hidrotermales); mientras que los segundos son producidos en la superficie de la tierra y estos son el intemperismo, la erosión y la acumulación (Lugo, 1989).

Strahler (1950), propone una clasificación de laderas, basada en el resultado del análisis de distribución de frecuencias y en el estudio de campo. Laderas de alta

cohesión, tales como las constituidas por arcillas o por rocas masivas resistentes, como el granito, esquisto o gneis; tienen ángulos de entre 40° y 50°, sufren deslizamientos y los cursos fluviales socavan la base de la ladera.

Laderas de reposo, denominadas laderas controladas por bloques por Bryan (1922) y laderas de gravedad por Meyerhoff (1940). Los ángulos son de entre 30° y 35°. Están constituidas por clastos gruesos que están controlados por el ángulo de reposo.

Laderas reducidas por lavado y reptación, designadas por Bryan (1922) laderas lavadas por la lluvia y laderas de lavado de Meyerhoff (1940), que corresponden a *haldenhänge* de Penck (1924). La acción del agua y de la reptación reduce la inclinación de la ladera por debajo del ángulo de reposo.

Las laderas están constituidas por dos tipos de materiales: rocas y suelos, que tienen unas propiedades mecánicas distintas y evolucionan de diferente manera. Las rocas son materiales consolidados y están afectadas por planos de fisibilidad que debilitan las rocas y favorecen la fragmentación y disgregación. Los suelos son materiales no consolidados de débil resistencia mecánica y mayor porosidad (Keller, 2007).

En la forma de la ladera influyen el estadio de desarrollo del relieve, la estructura de las capas, las condiciones climáticas, la vegetación, exposición de las laderas al sol y a los vientos dominantes (Keller, 2007).

Uno de los factores que más importancia tienen dentro de una cuenca es la precipitación, la cual influye de manera directa para que se dé el proceso de erosión hídrica (Blodgett, 2006).

En lo que corresponde a los tipos de precipitación, la que provoca principalmente la erosión es la precipitación de 24 horas, la cual consta de una precipitación sin interrupciones durante un periodo de tiempo de un día o prolongarse a más tiempo (Derpsch *et al.*, 1991).

La precipitación de 24 horas se presenta por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, la cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo. Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía. Parte de la lluvia se infiltra y parte fluye sobre la superficie (Correa, 1980). Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el suelo, entonces se producen escorrentías.

La erosión es un proceso del poder erosivo del agua y de la erosionabilidad del suelo. La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma. Cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta la erosión será más rápida.

La intensidad es el factor primordial del fenómeno, ya que la velocidad de penetración del agua en el suelo es frecuentemente insuficiente cuando ésta cae con gran intensidad; la llegada al suelo de una elevada cantidad de agua en un período corto de tiempo, produce rápidamente escorrentía. No es entonces tan importante el total de la lluvia como la intensidad misma. (Hudson, 1982).

El fenómeno que se ha descrito ocurre siempre y cuando el suelo no cuente con una apropiada protección en la superficie (vegetación rastrera o mantillo), ya que los árboles interceptan cierta cantidad de la lluvia hasta un límite a partir del cual no pueden almacenar más agua, produciéndose un reagrupamiento de las gotas y generándose unas nuevas de mayor tamaño que las originales, con mayor poder erosivo al caer al suelo; se estima que el 70% del total de suelo removido se debe a la acción del golpeteo o salpicadura. (Morgan, 1986)

Otro efecto que viene asociado con la precipitación es la interceptación, el cual es un proceso que ocurre cuando el agua de lluvia cae sobre una ladera que posee un suelo natural y una cobertura vegetal intacta, parte del agua es recogida en la superficie de las plantas, troncos y ramas. Esta agua puede volver directamente a la atmósfera mediante la evaporación, una vez precipitada puede penetrar hacia

capas profundas o pasar a formar parte del agua de escurrimiento que circulará a través de la cuenca (Leonard, 1961; Zinke, 1967 y Heuveltop, 1972).

Una vez que se produce la lluvia, el tipo, extensión y condición de la vegetación puede influir sobre el área y la cantidad de la precipitación que llega a la superficie del terreno.

En la subcuenca del afluente La Fábrica, existen corrientes permanentes e intermitentes, no se puede solamente estudiar las permanentes, por el simple hecho de que todo funciona como un sistema y en épocas de lluvias dichas corrientes crecen en primera por la precipitación y en segunda por la cantidad de agua que traen las corrientes intermitentes al momento de unirse al cauce principal.

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en un suelo o sustancia porosa en sentido descendente desde la superficie a través de los poros o aberturas pequeñas (Diccionario de geografía física, 1984).

La porción de agua que se infiltra y la que circula en la superficie (escorrentía) depende de la permeabilidad del sustrato, pendiente y cobertura vegetal, en donde parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por la transpiración de las plantas que la extraen con raíces más o menos extensas y profundas; otra parte se incorpora a los acuíferos, niveles que contienen agua estancada o circulante. Parte del agua subterránea alcanza la superficie allí donde los acuíferos por las circunstancias topográficas interceptan la superficie del terreno.

Durante el proceso de infiltración se distribuyen tres zonas de humedad en el suelo; la parte superior del suelo, por donde se inicia la entrada de agua, constituye una zona de saturación y transmisión; por último la zona inferior se denomina de humedecimiento, pues a diferencia de las dos anteriores que no cambian su condición de humedad durante la infiltración, en esta zona se incrementa el contenido de humedad y disminuye la tensión.

Los factores que afectan la velocidad de infiltración son el contenido inicial de humedad del suelo, la textura del suelo, condición de la superficie del suelo, estratificación del suelo, calidad del agua aplicada al suelo y la percolación flujo de líquido a través de un medio poroso.

La escorrentía se define como el agua que recorre un área de drenaje. Se evalúa normalmente como la precipitación menos la pérdida por evaporación y va ligado con el balance hídrico. En los climas desérticos, la escorrentía es el principal agente geológico de erosión y transporte.

La escorrentía está constituida por aquella parte de la precipitación que escurre superficialmente sobre el cauce principal de la cuenca. Antes de que esta parte de la precipitación se incorpore a un cauce natural de cualquier magnitud, la lámina de agua que escurre superficialmente se denomina flujo superficial. La escorrentía está constituida por la precipitación menos la infiltración, la interceptación y el almacenamiento superficial (Pérez, 2008).

La escorrentía en una cuenca, como elemento importante del ciclo hidrológico, puede considerarse que está afectada por una serie de factores fisiográficos (Pérez, 2008).

Los factores fisiográficos pueden a su vez subdividirse en características de la cuenca en general y características de los cauces. En las primeras influyen sus propiedades geométricas como el tamaño, forma, pendiente, orientación, elevación, y densidad de drenaje y sus propiedades físicas como el uso de la tierra, condiciones de infiltración, tipos de suelos, características geológicas (permeabilidad, rendimiento y retención específica) y topográficas (permeabilidad de lagos, pantanos, etc.). Mientras que las segundas se refieren principalmente a sus propiedades hidráulicas, es decir, el tamaño y forma de las secciones, pendientes, rugosidades, longitud de los tributarios y efectos de remansos y torrentes. (Cotler, 2005).

La vegetación es otro elemento que hace que se presente o no se presente la erosión hídrica, ya que todo está en función si se mantiene la cobertura forestal o si se deforesta.

En el caso de la vegetación arbórea representa el factor protector del suelo de mayor importancia y el mantenimiento de una buena capa de hojarasca es asegurada por la capacidad de producción del dosel de los árboles. En los bosques, la común ocurrencia de un manto de raíces finas provee una eficiente cobertura al suelo.

El tipo de vegetación es muy importante y en general puede decirse que los bosques y los pastoreos son los que mejor atenúan y retienen a las gotas, de las cuales si bien solo una parte llega al suelo (60 % más o menos), esta penetra y filtra bien sin provocar las tan dañinas salpicaduras que abren el camino a la erosión (Stallings, 1984).

La facultad de las plantas y la cubierta vegetal de proteger el suelo contra la erosión depende no sólo de la densidad con que crecen las plantas sino también de su desarrollo total.

Antrópicos:

Son como su nombre lo dice provocados por el hombre, es decir, a las actividades socioeconómicas que realiza, para sacar un beneficio, sin hacerlas de manera sustentable, lo que provoca el deterioro de la cuenca en general.

Las actividades que más daño le hacen a una cuenca por el grado de impacto al ambiente son la agricultura y la minería, esto porque al momento de realizar dichas actividades se inicia deforestando una parte del bosque de la cuenca, en donde la parte afectada se va expandiendo conforme va creciendo la(s) actividades realizadas en el lugar, y que va provocando a falta de vegetación que los diferentes ríos y arroyos que existen en la cuenca hagan factible o agraven el proceso de la erosión hídrica.

La actividad de la agricultura visto como proceso dentro de una cuenca, es complejo, puesto que esta actividad se realiza con el fin de obtener un beneficio económico, el problema radica en las consecuencias de dicha actividad, ya que no son atendidos los problemas que causa el realizar esta actividad en zonas que no son aptas para los cultivos e invaden terrenos de bosque para la siembra (SEDAGRO, 2007).

Al realizar la siembra de los cultivos en zonas no aptas, hacen que el terreno se degrade más rápido por el simple hecho de no ser apto, eso en primer lugar; en segundo lugar se encuentra el tema de la deforestación, ya que se tiene que quitar bosque para poder hacer el terreno cultivable y lo que provoca este proceso es que el agua cuenca arriba no se infiltre a causa de la deforestación y por consiguiente el caudal va más crecido que lo habitual, dando como resultado varios problemas, que en este trabajo el más importante es la erosión (SEDAGRO, 2007).

El problema radica esencialmente en el tipo de cultivo, ya que con base en este se hacen los surcos para cultivar la semilla, esto es importante puesto que en el caso del cultivo de papa los surcos se hacen en dirección a la pendiente más baja para poder retener el agua, ya que este tubérculo necesita de gran cantidad para poder crecer, y al momento de hacer este proceso el elemento agua comienza a trabajar haciendo que existan zonas que dan la forma de “omblicos” y por consecuencia que se vaya socavando la parte del ombligo, hasta formarse cárcavas.

Otro factor importante para que el proceso de erosión hídrica aparezca a causa de la agricultura es la etapa que se colecta la siembra, ya que existe un periodo para volver a sembrar y dentro de ese tiempo el suelo se encuentra desprotegido, haciendo que el agua transporte el suelo sin que exista nada que lo detenga.

El problema de la agricultura es muy complejo ya que dentro del querer sembrar más invaden territorio federal, es decir, que de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales (2012) se tienen que respetar los afluentes intermitentes y perennes y

para esto se marca que se tienen que dar 10 m entre el cauce intermitente y el cultivo y 20 m si el cauce es perenne, pero ahí es donde no se respeta, haciéndole más fácil la tarea al agua de erosionar los terrenos.

En lo que corresponde a la minería, es de las actividades más importantes para que suceda la erosión y en este caso la hídrica por el simple hecho que hace el trabajo del agua de excavar en el terreno al sacar el material pétreo. El problema de la erosión se da de manera más visible cuando la actividad minera se va del lugar y se dejan los grandes agujeros vacíos de donde secaron el material, al no tapar o rellenar dicho agujeros, el agua no tiene que hacer gran trabajo para que el agujero se convierta en cárcava y con el tiempo se vaya acrecentando (INEGI, 2010).

En este punto es donde esta actividad económica se hace causante de la pérdida del suelo, en primera parte por el hombre y seguido por efecto de los caudales del agua que bajan de la parte alta de la cuenca (INEGI, 2010).

1.4.4 Métodos para evaluar y controlar la erosión hídrica por cárcavas

Dentro de los métodos para evaluar la erosión hídrica por cárcavas se tienen dos, uno directo y uno indirecto, el primero es el de Transecto de Cárcavas o Cubicación de Cárcavas, consiste en cuantificar el volumen vacío de suelo, esto es, el volumen faltante de suelo que fue arrastrado durante el proceso erosivo en la cárcava. Para ello se requiere medir la superficie de una serie de secciones transversales en la cárcava, las que multiplicadas por la longitud del transecto del cual son representativas, proporcionan el volumen de material perdido por erosión, ese volumen puede ser también expresado en toneladas (Becerra, 2005).

El segundo método, más que método son una serie de técnicas ya sean con imágenes de satélite o fotografías aéreas, en donde Ploey y Gabriels (1984) exponen varias técnicas para su registro y desarrollo de cartografía, con base en la recolección de información en su estado estático, entre las que citan la utilización de fotografías aéreas y las observaciones de campo; se plantean serias

limitaciones que emergen de escalas inferiores a 1:5.000, ya que es más difícil la elaboración de mapas detallados con curvas de nivel, de la topografía de desplazamientos y flujos a intervalos de curva de 0,4 a 0,5 m.

Con base en las cotas de las curvas de nivel, se pueden inferir las profundidades de las cárcavas, para esto se necesita que las imágenes o fotografías aéreas sean actuales.

Mientras que para el control de las cárcavas en muchos casos en los cuales se han construido estructuras de concreto, gaviones de piedra o madera, estos han sido socavados y arrastrados por la cárcava, o en otros no ha modificado las causas básicas de la erosión y el proceso ha continuado. Si se logra distribuir las corrientes y evitar las concentraciones de grandes flujos se disminuye en forma importante la posibilidad de ocurrencia de cárcavas.

Hasta ahora el método más efectivo para el control de cárcavas es la vegetación con estructuras que favorezcan su crecimiento. Puede ser necesario usar métodos mecánicos, mallas, yute, fique, piedra o madera para controlar provisionalmente la erosión mientras se establece la vegetación. Generalmente, se emplea una combinación de árboles de raíz profunda con pastos y hierbas. Adicionalmente, debe controlarse las aguas mediante zanjas y canales. Las cárcavas pueden finalmente convertirse en canales o corrientes de agua (Suárez, 1992).

La formación de cárcavas puede prevenirse en muchos casos utilizando prácticas conservacionistas en el uso de la tierra, especialmente con relación a la agricultura y ganadería.

Se debe evitar la concentración de aguas de escorrentía sobre zonas con cobertura vegetal deficiente. Adicionalmente, se pueden construir estructuras amortiguadoras de energía en la corriente para disminuir la velocidad del agua y en esta forma evitar la formación de cárcavas. Es mucho más sencillo prevenir su ocurrencia que controlarla una vez se haya iniciado.

Estabilización de cárcavas activas

Para la estabilización de la erosión en cárcavas se está haciendo popular la práctica de las cuatro D:

1. Disminuir la velocidad y el caudal reduciendo el gradiente.
2. Detener el flujo utilizando sistemas de represamiento.
3. Desviar el flujo hacia áreas no peligrosas.
4. Disipar la energía utilizando estructuras o aumentando la sinuosidad y longitud del canal.

El principio fundamental del control de la erosión en cárcavas es determinar la causa directa del proceso y el mecanismo de desarrollo. El segundo principio es el encontrar la forma de restaurar el balance y crear condiciones para la estabilización del proceso (Suárez, 1992).

Los sistemas de estabilización más utilizados son los siguientes:

Redireccionamiento de los flujos de agua

Cuando hay fuentes determinadas de los caudales de agua, la solución puede ser el redireccionar o controlar los flujos para que estos no pasen por la cárcava o por lo menos su caudal sea disminuido. Cuando no sea posible redireccionar los flujos se requiere construir obras para el manejo de los flujos dentro de la cárcava. Una vez controlados los flujos, se debe proceder a revegetalizar el fondo y taludes de la cárcava y estabilizar geotécnicamente los escarpes (Suárez, 1992).

Canalización de la corriente

Los caudales pueden controlarse utilizando canales revestidos o tuberías para pasar por dentro o por fuera de la cárcava.

Construcción de estructuras de disipación de energía

Este sistema consiste en la construcción de vertederos o muros internos para la disminución de la pendiente del fondo de la cárcava. Una vez estabilizada la corriente se puede proceder a revegetalizar para lograr un efecto integral. La pendiente definitiva después de la construcción de las obras debe permitir la revegetalización (Suárez, 1992).

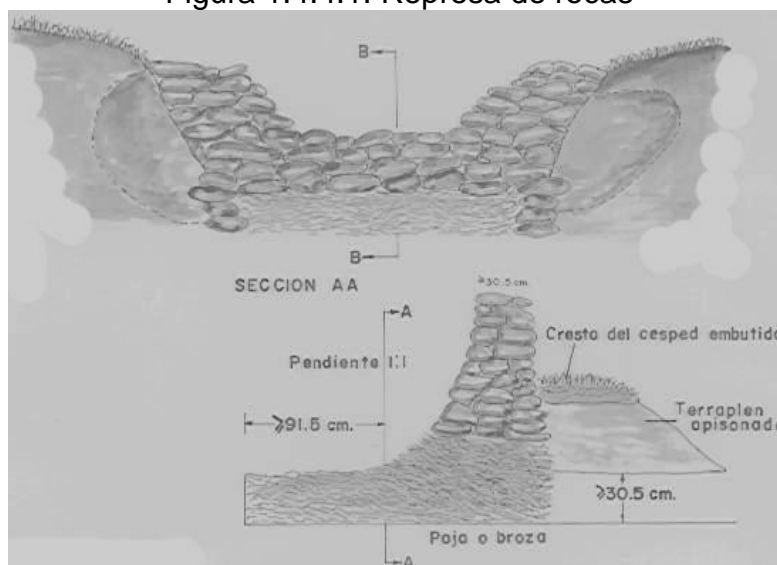
Revestimiento del fondo de la cárcava

El fondo de la cárcava puede revestirse utilizando productos especiales, sintéticos, gaviones, adoquines de concreto, etc., en forma similar a como se revisten las riberas de los ríos. Para el diseño de revestimientos se debe analizar las características de velocidad y turbulencia de las corrientes de agua dentro de la cárcava.

En las siguientes figuras (1.4.4.1, 1.4.4.2 y 1.4.4.3) se ilustra la manera en que deben de ir colocadas las medidas de control estructurales dentro de una cárcava, que en este caso son represas de rocas, presas de ladrillos y los diques.

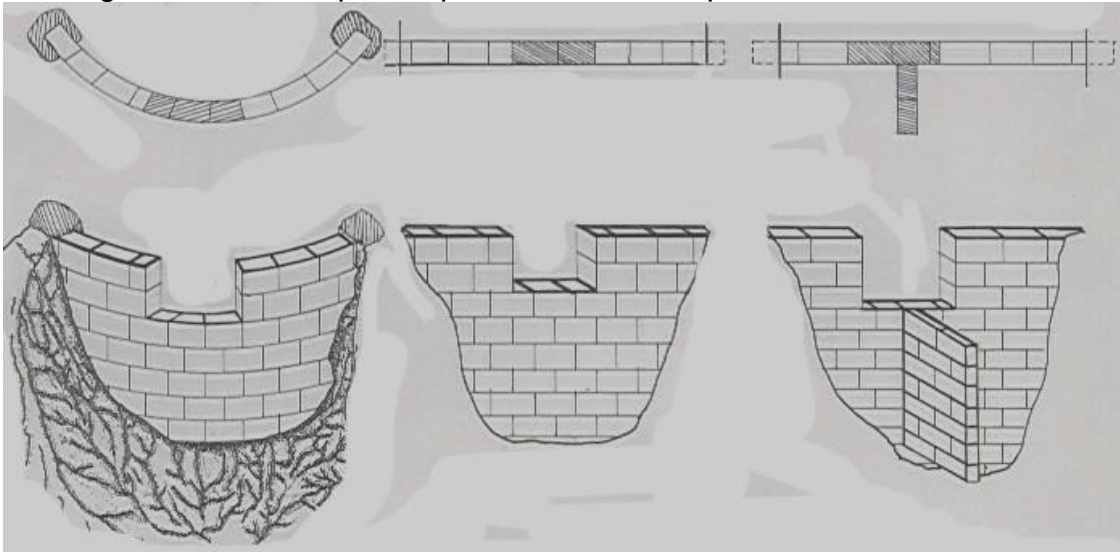
En todos los casos se debe colocar un filtro o geotextil como protección debajo de los revestimientos.

Figura 1.4.4.1: Represa de rocas



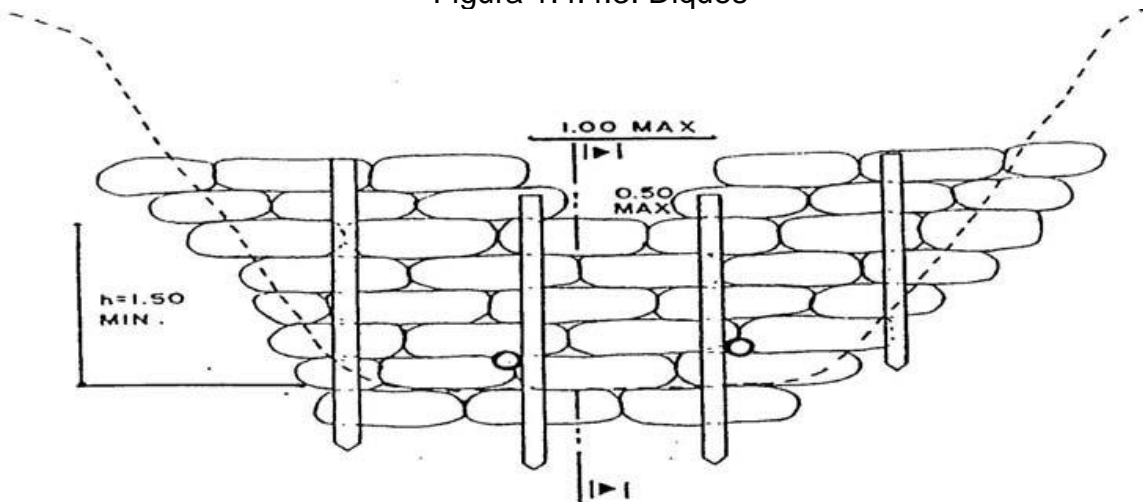
Fuente: SCS, 1973

Figura 1.4.4.2: Pequeñas presas de ladrillos para control de cárcavas



Fuente: Hudson, 1982

Figura 1.4.4.3: Diques



Fuente: León, 2001

Es muy difícil estabilizar cárcavas solamente con vegetación, debido a la intensidad y turbulencia de las corrientes de agua; sin embargo en el caso de cárcavas de pequeña pendiente (menos de 5%) y de gran ancho (más de 7 metros) es posible que una estabilización con vegetación pueda ser eficiente, siempre y cuando los caudales máximos de agua no sean demasiado grandes. El establecimiento de la vegetación inicialmente es muy difícil por la presencia de

corrientes de agua pero si estas se logran manejar, podría establecerse la cobertura vegetal (Suárez, 1992).

Estructuras para almacenamiento de agua arriba de la cárcava

En ocasiones se han estabilizado cárcavas construyendo estructuras de almacenamiento de agua, aguas arriba de la cárcava con el objeto de disminuir los caudales pico. Estas estructuras son comúnmente represas cuyo objetivo es demorar la escorrentía y luego liberarla poco a poco.

Debe tenerse en cuenta que si llegare a fallar el sistema se podría producir un caudal mayor que el pico de diseño, causando problemas graves de erosión.

Procedimiento para el diseño

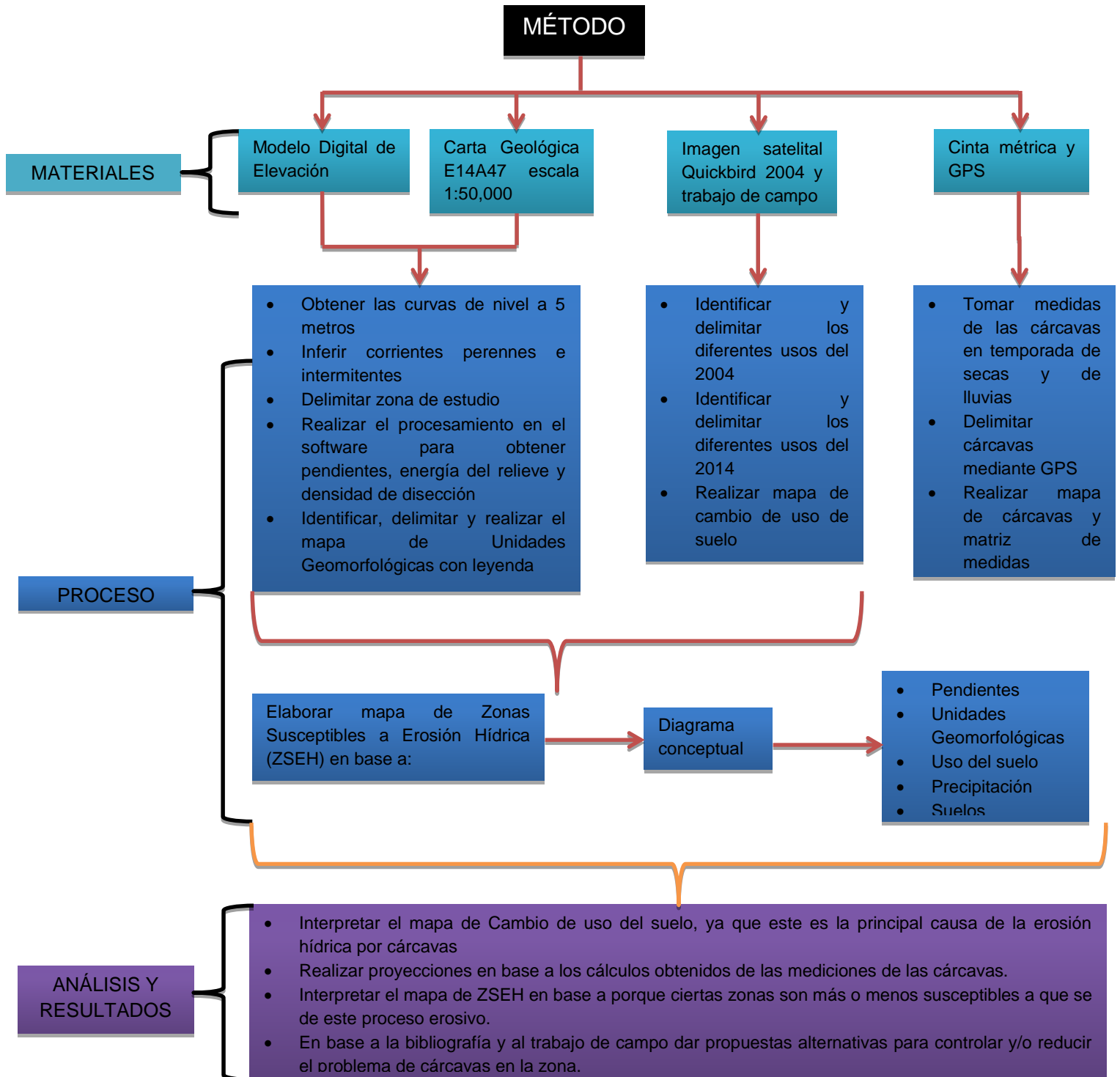
Para el diseño de obras de estabilización de cárcavas se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- a. Inspeccionar la cárcava para determinar el porqué del problema; qué pudo haber ocurrido o estar ocurriendo para agravar el problema y si existe una corriente de agua en la base de la cárcava.
- b. Calcular el caudal máximo de agua que puede entrar a la cárcava. Este caudal depende de la topografía de la cuenca, su tamaño, su vegetación, tipo de suelo, etc.
- c. Medir el tamaño, talud y forma de la cárcava.
- d. Analizar a detalle el mecanismo de formación y progreso de la cárcava.
- e. Determinar la mejor alternativa de estabilización.
- f. Diseñar a detalle las obras de control.

CAPÍTULO II: MÉTODO

2.1 Esquema metodológico

Para el desarrollo del capítulo II, se realizó un esquema metodológico, que con base en él se desarrollaron las diferentes etapas y procesos que conllevó la investigación, las cuales se describen más adelante.



2.2 Procesos y etapas

Para esta etapa del método, se procedió a realizar diversos procesos los cuales llevaron etapas que se debieron seguir para poder obtener los materiales para que con base en ellos poder dar resultados del porque se da la erosión hídrica por cárcavas en la zona de estudio.

2.2.1 Obtención de la información

La primera etapa fue la adquisición de la información necesaria para el trabajo de investigación, para esto se obtuvo el Modelo Digital de Elevación (INEGI, 2010) escala 1:50,000 de la Carta E14A47 “Volcán Nevado de Toluca” de la página <http://www.inegi.org.mx/>. De igual manera se obtuvo la carta geológica E14A47 escala 1:50,000, procedente de INEGI.

Se adquirió la imagen satelital Quickbird del año 2004, con una resolución espacial de 1 a 5 metros, al unísono se elaboró trabajo de campo para conocer el uso de suelo y vegetación existente en la zona de estudio.

Con un GPS y una cinta métrica, los cuales sirvieron para trabajo de campo, se realizaron las medidas de las cárcavas cada 25 metros.

2.2.2 Preparación y procesamiento de la información

En esta etapa se preparó la información obtenida, al mismo tiempo que fue procesada, es decir, en primer lugar con base en la morfometría obtenida (curvas de nivel con equidistancia de 5 metros) del modelo digital de elevación se procedió a delimitar la zona de estudio, cuyo proceso se realizó en la plataforma de ArcMap. Se identificó el parteaguas con las curvas de nivel y la corriente perenne así como las corrientes intermitentes que se unen al perenne, con el fin de no cortarlas, en donde posteriormente se digitalizó la subcuenca.

El siguiente proceso fue elaborar el mapa de energía del relieve, cuya finalidad es expresar la amplitud altimétrica existentes en la zona, es decir la diferencia de

elevaciones que se produce entre los puntos más altos y las partes más bajas del territorio, permitiendo expresar la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena, con el fin de localizar de forma areal la mayor acción tectónica de la zona y las secciones de terreno en la que los procesos erosivos son de mayor ocurrencia (Miranda, 2006).

Para esto se dividió la zona de estudio en unidades superficiales, en unidades cuadradas de 250m². Tomando en cuenta las curvas maestras y auxiliares se procedió a restar la cota máxima la mínima, el resultado es el valor que lleva cada cuadro.

Cuadro 2.2.2.1: Valores para la energía del relieve

Valores	Rango (m)
Nulo	0
Bajo	1-40
Medio	41-60
Alto	61-120
Muy Alto	121-180

Fuente: Elaboración propia

Al establecer los rangos se les asignó un color a cada uno, para ser coloreados de acuerdo al área de cada cuadro, con el tono de color que le correspondió, asignado de acuerdo con la identificación de las zonas de similitud del proceso.

Continuando, se procedió a realizar el mapa de densidad de disección, el cual sirve para expresar el grado de erosión que ejercen principalmente los ríos al desgastar la superficie, donde los valores bajos significan que los escurrimientos no determinan la dinámica del territorio, pero cuando la densidad es alta hay una mayor influencia en el relieve (Miranda, 2006).

Se llevó a cabo la elaboración de dicho mapa partiendo de los ríos, con base en estos se creó una malla con la herramienta create fishnet, en donde el insumo son

los ríos, y cada cuadro fue de 250m². Hecho esto se realizó la malla en donde se hizo una intersección entre la malla y los ríos.

Se realizó un summarize en la tabla de contenidos de la intersección, después se seleccionó la elevación y se encendió la longitud y se guardó como .dbf. Se hizo un join y se exportó como shapefile para guardar los cambios.

Se agregó el campo de disección y se seleccionó, se dio en la opción field calculator y se sumaron las longitudes de los ríos localizados dentro de cada cuadro, al tener esta información se establecieron rangos y se asignó un color a cada uno, los cuadros colorados corresponden al valor del rango identificado en la zona, donde los colores más claros correspondieron a los valores bajos y los colores más fuertes a los valores altos.

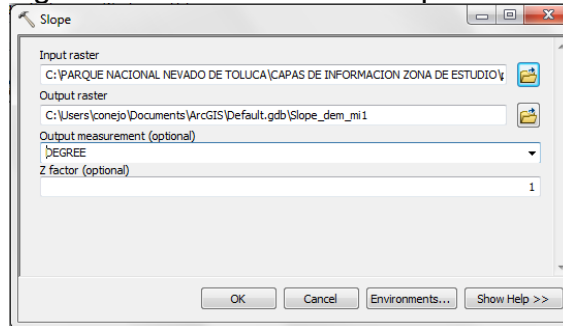
Cuadro 2.2.2.2: Valores para la densidad de disección

Valores	Rango (m)
Muy Bajo	0-67
Bajo	68-195
Medio	196-328
Alto	329-477
Muy Alto	478-861

Fuente: Elaboración propia

El siguiente proceso fue la obtención de pendientes, en donde se creó un slope a partir del modelo digital de elevación de INEGI, una vez obtenido el proceso se continuó con la reclasificación de los valores de las pendientes, las cuales fueron clasificadas siguiendo el criterio de Leontiev y Richagov (Lugo, 1989). Ya identificadas se pasó a proceder a transformar el formato original (raster) a formato vector, esto para que se tuviera un mejor manejo de la información.

Figura 2.2.2.3: Obtención de pendientes



Cuadro 2.2.2.4: Clasificación de Pendientes

Planicie	Planicie- Piedemonte	Piedemonte-Ladera		Ladera	
0°-3°	3°-6°	6°-15°	15°-30°	30°-45°	<45°
Pendiente ligeramente suave	Pendiente suave	Pendiente moderada	Pendiente fuerte	Pendiente muy fuerte	Pendiente abrupta

Fuente: Lugo, 1989

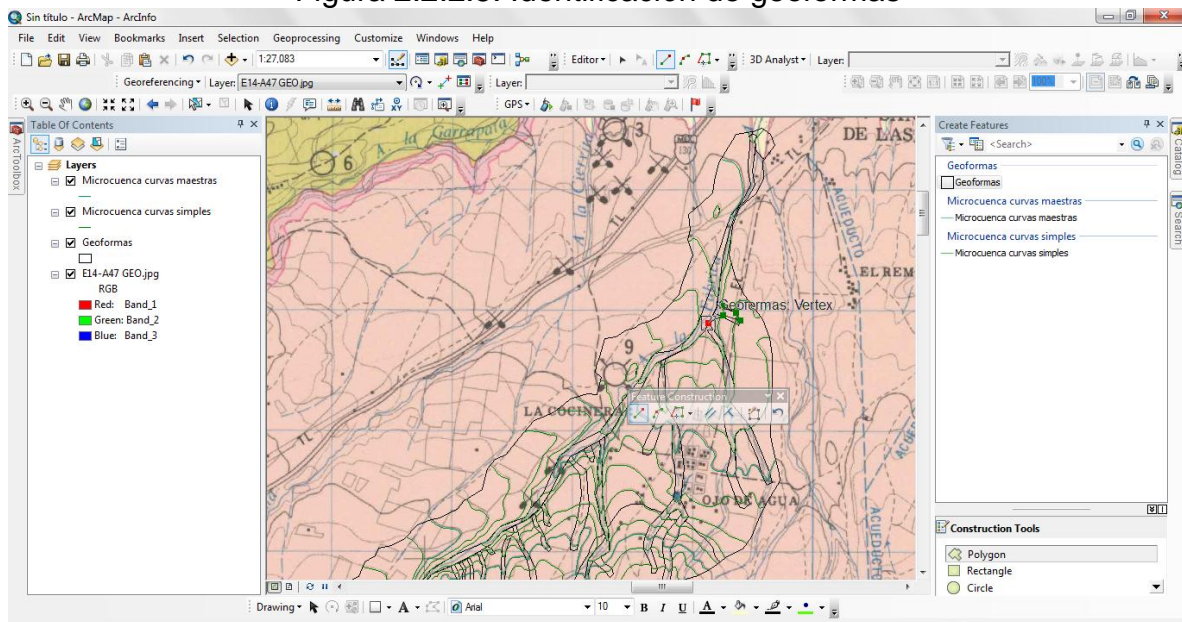
Una vez obtenidas la energía del relieve, densidad de disección y pendientes, la siguiente variable geomorfológicamente hablando fueron las unidades geomorfológicas o geoformas, en donde su finalidad fue dividir la zona en unidades geomorfológicas es identificar cuáles son las áreas con más presencia de erosión por cárcavas, para esto se usó el método de Unidades Geomorfológicas (Chuvienco, 1998), este consiste en utilizar como base un modelo digital de elevación.

Se procedió a la elaboración del mapa geomorfológico por medio de la recopilación de la información geológica y fisiográfica que permitió identificar los afloramientos rocosos, montañosos y de la estructura del área de estudio con el fin de conocer el origen y la evolución geomorfológica de la zona, para la cual se

utilizaron la carta geológica y la carta topográfica escala 1:50,000 para poder entender las formas del relieve terrestre.

Con la carta topográfica se hizo el trazado del área a estudiar, sobreponiendo el polígono sobre la carta. Con la ayuda de la cartografía geológica, altimétrica y la red de drenaje se realizó el boceto de carta geomorfológica, el cual se subdividió por medio de rodiales las áreas que presentaron rasgos homogéneos.

Figura 2.2.2.5: Identificación de geoformas



Una vez identificado el relieve se clasificó de acuerdo a su origen; actividad endógena con estructuras de origen volcánico como son cimas y ladera, estructuras de origen exógeno erosivo como valles y de acumulación que son los piedemonte y planicie. Ya determinada la clasificación de las unidades y subunidades geomorfológicas se procedió a la elaboración de la leyenda del mapa.

El cambio de uso del suelo fue el siguiente proceso, el cual permitió establecer cómo se ha transformado el territorio a estudiar, y al mismo tiempo conocer las

causas de los procesos erosivos que se han venido dando, principalmente la erosión hídrica y como consecuencia el origen de las cárcavas.

Para esto se utilizó una imagen Quickbird del 2004 y los recorridos de campo del 2014, después de procedió a trabajar la imagen en el software ER Mapper, en donde se realizó una clasificación supervisada, la cual se comenzó creando diversos campos de entrenamiento que se encuentran y/o se encontraron en la zona de estudio.

Se identificaron dentro de la zona de estudio 17 clasificaciones de uso del suelo en la imagen, los cuales fueron en cuestión de vegetación el pino hartwegii, pino hartwegii mezclado con pastizal, oyamel, oyamel mezclado con cedro, oyamel mezclado con pastizal, vegetación arbustiva, vegetación arbustiva con pino pseudostrobus y el pastizal.

Mientras que los demás usos identificados fueron la zona urbana, áreas en descanso, áreas sin vegetación aparente, cultivos de papa y de maíz, áreas desmontadas, minería, pastoreo y los suelos desnudos.

Para su identificación se usó la combinación 3 2 1 o natural, puesto que gracias a la resolución tan detallada de cinco metros permitió realizar la clasificación con una única combinación.

Los resultados de la clasificación se validaron por medio de entrevistas y pláticas con los ejidatarios de la zona, es decir, se les preguntó que usos se tenían en la zona hace 10 años y cuáles eran los límites entre cada uso.

Hecho este procedimiento se realizó el procedimiento de los puntos levantados en campo, que fue el de marcar las poligonales de los diferentes usos del suelo que existen en la actualidad, esto se hizo mediante la ayuda de un GPS, con un error de 5 metros.

Una vez que se terminó de realizar el uso del 2014, se realizó el mapa de cambio de uso del suelo.

2.3 Método de Transecto de Cárcavas

Para la valoración de cárcavas, se empleó el método de transectos de cárcavas el cual permitió evaluar la evolución de la extensión y ampliación de cárcavas durante un período de tiempo y cuantificar la pérdida de suelo por medio de la interpretación de la diferencia de la sección transversal de las huellas de erosión. Con el método se pudo cuantificar la pérdida de suelos en la trayectoria de la cárcava y establecer el crecimiento de sus dimensiones (Rivas, 1988).

Consistió en la evaluación del cambio en la sección transversal de una cárcava por acción de la socavación de la escorrentía durante un período lluvioso. Conociendo la densidad aparente del suelo fue posible calcular la masa de suelo removido durante el período estudiado. De esta forma se determinó la evolución de la máxima huella de erosión en el terreno.

Con la metodología se cuantificó la evolución de la cárcava en sus dimensiones de ancho y profundidad y a la vez se determinó la pérdida de suelo expresada en volumen y peso.

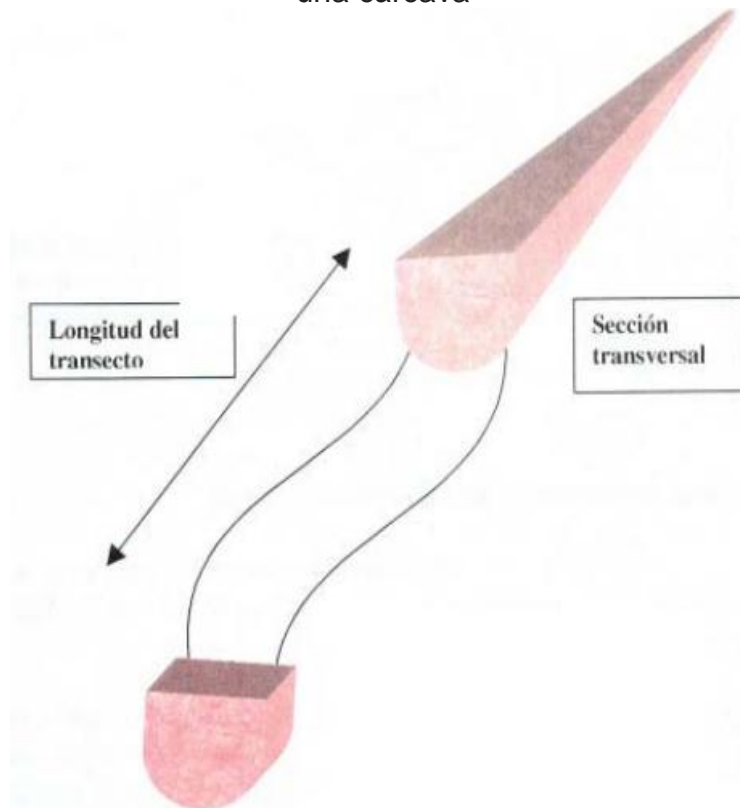
La cárcava a evaluar fue medida longitudinalmente y dividida en transectos de igual dimensión. O sea un transecto es una parte de la longitud de la cárcava y posee dos secciones transversales: inicio y final. La longitud de los transectos depende de la regularidad de la sección transversal, pudiendo variar de 10 a 20 metros. Es decir si las secciones son bastante irregulares la longitud será más corta (Hudson, 1997).

Para medir la distancia de la sección transversal se utilizó: Cinta métrica. La longitud de la cinta métrica fue dividida en segmentos de igual dimensión (d) de 25 m estableciendo marcas. La cinta marcada fue colocada en cada sección,

tomando como puntos de referencia las estacas en ambos márgenes (Hudson, 1997).

El ancho de la cárcava se obtuvo mediante puntos GPS. Para medir la profundidad (h) de la cárcava, se anotó la lectura observada desde cada marca en la cinta hasta el lecho de la cárcava, midiendo con una escala métrica.

Figura 2.3.1: Esquema representando el transecto y secciones transversales de una cárcava



Fuente: Somarriba, 1988

La sección transversal de cada cárcava puede tener la forma de V o de U. Con la información obtenida en cada sección transversal de sus profundidades y de la distancia constante, se aplica una de las siguientes fórmulas.

Cálculo de área para cárcava en forma de U:

$$A = d \sum h_i$$

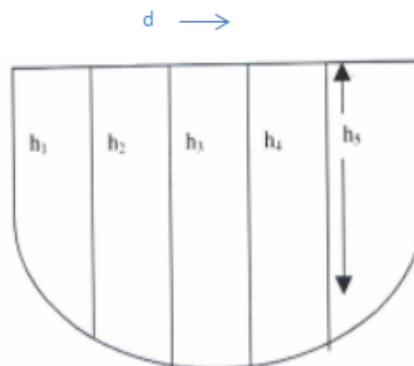
Dónde:

A: área de la sección transversal

d: distancia constante (25 m)

h_i : profundidad de la marca i

Figura 2.3.2: Esquema de sección transversal de una cárcava en forma de U



Fuente: Somarriba, 1988

Cálculo de área para cárcava en forma de V:

$$A = d \sum (h_e/2 + \sum h_i + h_{e1}/2)$$

Dónde:

A: área de la sección transversal

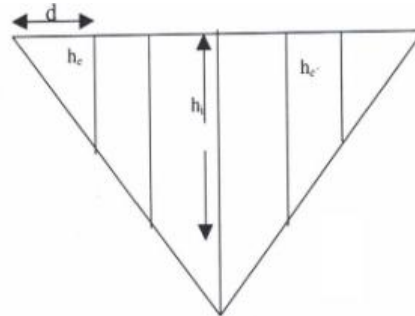
d: distancia constante (25 m)

h_e : profundidad de primera marca

h_i : profundidad del resto de las marcas

h_{e1} : profundidad de la última marca

Figura 2.3.3: Esquema de sección transversal de una cárcava en forma de V



Fuente: Somarriba, 1988

Cálculo de la pérdida de suelo

La determinación del área de la sección transversal se efectuó dos veces, durante el período de evaluación. Una necesariamente antes del inicio de las lluvias para tener un dato del estado inicial de la cárcava. Posteriormente el segundo momento se realizó al finalizar la temporada lluviosa.

Para el cálculo la pérdida de suelo, se procedió primero a determinar la diferencia de área entre los dos momentos observados. Basados en los resultados obtenidos de las áreas con la fórmula utilizada (Hudson, 1997).

Cálculo del volumen de suelo perdido

El volumen de suelo perdido (V_{sp}) se obtuvo de la multiplicación del valor de la diferencia de área (A_d) de la sección transversal por la longitud del transecto

$$V_{sp} = A_d * L_t$$

Dónde:

V_{sp} : Volumen de suelo perdido

A_d : Diferencia de área de la sección transversal

L_t : Longitud del transecto

Un valor de suelo perdido medio se obtuvo de sumar los resultados de cada transecto de suelo perdido y dividido entre el número de transectos sumados (Nt).

$$V_{sm} = \sum V_{sp} / N_t$$

Dónde:

V_{sm}: Volumen de suelo perdido medio

V_{sp}: Volumen de suelo perdido

N_t: Número de transectos sumados

El valor del suelo perdido medio se dividió entre los metros de la longitud del transecto y se puede expresar la pérdida de suelo en volumen de suelo perdido por metro lineal de cárcava (m³/m).

2.4 Proyección de sitios susceptibles a la erosión hídrica por cárcavas

Existen diversas formas de conocer que zonas, áreas o sitios son susceptibles a la erosión, y en este caso a la erosión hídrica, los cuales usan desde modelos estadísticos hasta proyecciones con base en lo que conforman la zona, como que suelo, geología, geomorfología, uso de suelo, pendientes, cantidad de precipitación que existe.

Visto desde el enfoque geográfico lo más usado son proyecciones con base en variables físico-antrópicas que posteriormente los resultados o en este caso las proyecciones se visualizan en una representación cartográfica.

2.4.1 Método multivariado para identificar zonas susceptibles a erosión hídrica

Se eligió el método multivariado, debido a que en el estudio se utilizaron variables tanto físicas como humanas, las que se analizaron a partir de una matriz de interrelaciones, las variables se colocaron en la matriz para tener un análisis completo, involucrando todos los datos disponibles.

El método multivariado es la rama de la Estadística y del análisis de datos, que estudia, interpreta y elabora el material estadístico sobre un conjunto de $n > 1$ de variables, que pueden ser cuantitativas, cualitativas o una mezcla (Cuadras, 1981).

Es ideal este método, ya que permite resumir datos, obtener indicadores, clasificarlos, agruparlos y relacionar las variables, todo esto a través de una matriz x de dimensiones $n \times p$, llamada matriz de datos, la cual representa el individuo y las variables. Llamamos X a la variable multivariante, formada por las p variables escalares, que toman valores en los n elementos observados.

Fue necesario realizar un procedimiento usando variables tanto físicas como antrópicas, las cuales fueron las unidades geomorfológicas, la edafología, pendientes, precipitación y el uso del suelo.

El procedimiento inició ponderando cada base de datos de las diferentes capas que se usaron, esto añadiéndoles un campo para agregar los valores del 1 al 5, teniendo como menor erosión el 1 y como mayor erosión el 5.

Una vez que se agregaron las ponderaciones, se procedió a transformar las capas de formato vector a raster, esto para homogeneizar la información, lo cual se realizó con la herramienta de conversion tools, polygon to raster.

Cuadro 2.4.1.1: Ponderaciones de las capas

(A)	Suelo	Ponderación	Precipitación	Ponderación	(B)
	andosol húmico	2	300-700	1	
	andosol ócrico	2	700-850	2	
	feozem háplico	3	850-1000	3	
	Litosol	5	1000-1100	4	
	regosol eútrico	4	1100-1300	5	

(C)	Geoforma	Ponderación	Pendientes	Ponderación	(D)
	ladera con ígnea extrusiva básica	5	0°-3°	1	
	cima con ígnea extrusiva básica	2	3°-6°	2	
	valle erosivo	5	6°-15°	3	
	cima con brecha volcánica	3	15°-30°	4	
	pedemonte con brecha volcánica	4	30°-45°	5	
	planicie aluvial	1	<45°	6	
	lomerío brecha volcánica	3			

(E)	Uso suelo y veg	Ponderación
	área sin vegetación	5
	Minería	5
	bosque de oyamel	2
	bosque de pino	1
	bosque de pino-pastizal	3
	cultivo papa	4
	Desmonte	4
	suelo desnudo	5
	bosque de oyamel-pastizal	3
	Pastizal	4
	pino pseudostrobus y vegetación arbustiva	3
	Pastoreo	4
	vegetación arbustiva	3
	cultivo maíz	3
	áreas en descanso	2
	bosque de oyamel-cedro	2

Fuente: Trabajo de gabinete (2014), trabajo de campo (2014), revisión de ponderaciones realizadas por el Maestro Julio César Carbajal Monroy

Cuadro 2.4.1.1: Ponderaciones de las capas. Los diferentes tipos de suelo existentes en la zona se ponderaron de acuerdo a lo erosionables que son a la erosión hídrica (A), la precipitación se ponderó de acuerdo a lo erosionante que es (B), las geoformas se ponderaron de acuerdo a lo erosionable que son (C), las pendientes se ponderaron de acuerdo a su grado de inclinación (D), los usos de suelo y vegetación se ponderaron de acuerdo a lo propensos que son a la erosión hídrica (E).

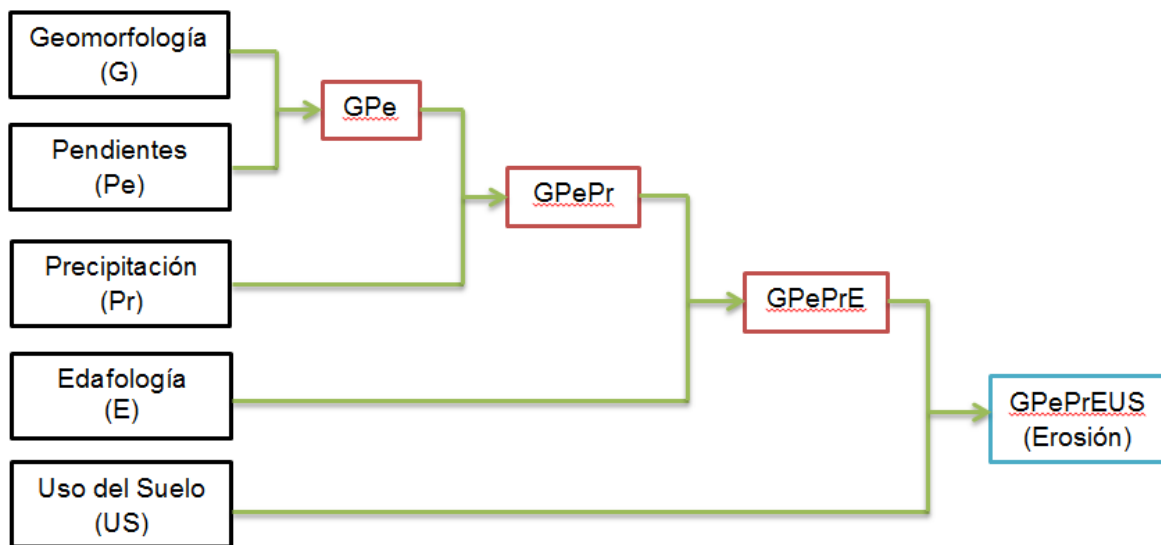
La capa de la precipitación se obtuvo de las estaciones meteorológicas y de la base de datos de estas (CONAGUA, 2010), donde se calculó la precipitación

anual de cada una de las estaciones dentro y en las cercanías próximas de la zona de estudio.

Para poder pasar de formato puntual a poligonal la precipitación fue necesario realizar una interpolación con el IDW, para que se pudiera hacer el procedimiento de manera homóloga.

Ya obtenidas las capas en formato raster, se realizó un diagrama conceptual, para que con base en este se hiciera todo el procedimiento, es decir, como se iban a ir realizando las operaciones para poder ir uniando las diferentes capas de información que se usaron.

Figura 2.4.1: Diagrama Conceptual



Fuente: Elaboración propia

Con base en el diagrama conceptual se fueron uniando las capas, mediante la herramienta de spatial analyst tools, math, plus, y se seleccionaron las primeras dos capas, que en este caso fueron Geomorfología y Pendientes.

Hecho dicho procedimiento, se realizó una reclasificación, debido a que la operación da más de cinco valores, por lo cual se tuvo que realizar, para que solamente quedaran los cinco valores que se tomaron en cuenta desde el inicio.

El primer y segundo proceso se hizo tres veces más a fin de obtener el producto final, el cual fue el mapa de zonas susceptibles a erosión hídrica de la zona de estudio.

Para este procedimiento no es necesario el cambio de uso del suelo, solamente se tomó en cuenta el uso del suelo que tiene la subcuenca, esto debido el cambio de uso del suelo es una variable que necesita dos periodos de tiempo y que en la zona de estudio no existe un gran cambio; mientras que el uso es indispensable porque es la que está afectando o no en el presente.

**CAPÍTULO III:
CARACTERIZACIÓN
GEOGRÁFICA DE
LA ZONA DE
ESTUDIO**

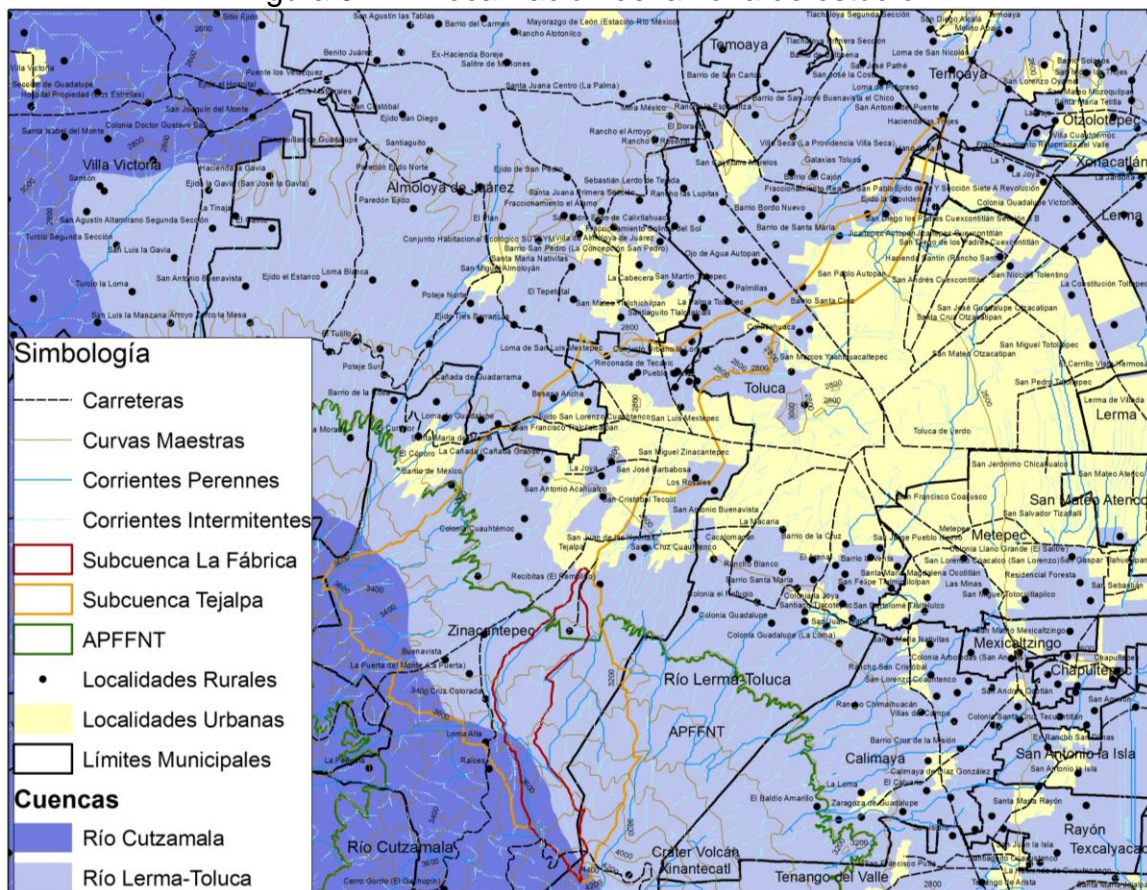
3.1 Localización

La Subcuenca La Fábrica se ubica en la parte media del municipio de Zacatepec, Estado de México; dicha área pertenece a la subcuenca del río Tejalpa, localizado en la cuenca del río Lerma.

Tiene una superficie de 22.91 km², y nace en la parte alta del volcán Xinantecatl, teniendo a la localidad rural de Ojo de Agua en la parte norte, la cual se localiza dentro de la zona de estudio.

Dicha zona limita al sur con el pico del Águila, al este con la subcuenca del afluente Terrerillos y al oeste con la subcuenca del afluente San Pedro.

Figura 3.1.1: Localización de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2013; CONAGUA, 2010 y CONANP, 2014

Se encuentra dentro de la Subcuenca del Río Tejalpa, que a su vez esta pertenece a la Cuenca del Río Lerma-Toluca. Cabe resaltar que la zona de estudio es una subcuenca y se encuentra dentro de otra subcuenca ya que la superficie del lugar de estudio tiene más de 100 ha. y para poder ser microcuenca debe de ocupar menos de 100 ha. de superficie.

3.2 Geología

Por su ubicación pertenece al Eje Neovolcánico Transversal (ENT). Las formaciones geológicas son de la edad del Plioceno, y su era es del Cenozoico, correspondiente al periodo del Terciario y Cuaternario (Bloomfield y Valastro, 1974).

Durante la edad del Plioceno se dio el afloramiento de rocas volcánicas, los cuales se ubican en la ladera noreste del volcán Nevado de Toluca; dichos afloramientos están formados por domos y conos de composición intermedia.

Las rocas volcánicas del Plioceno forman el volcán Nevado de Toluca. El complejo más antiguo (Secuencia Andesítica del Nevado de Toluca) forma el edificio principal y se compone de lavas andesíticas de edades de entre 1.6-1.23 millones de años. El más reciente (Secuencia Dacítica del Nevado de Toluca) está compuesto de depósitos piroclásticos localizados en los flancos, principalmente el lado Noreste en forma de abanico coalescente (García-Palomo *et al.*, 1996).

Los dos tipos de rocas principales que se identifican en la zona de estudio son las Rocas ígneas extrusivas básicas y Brecha volcánica. Las primeras son ígneas en su totalidad y son las que se encuentran en la parte más cercana al cráter del volcán.

La andesita es una roca magmática efusiva de composición química intermedia dado que contiene un porcentaje de sílice comprendido entre el 52% y el 65%. Su estructura por lo general es masiva, aunque algunas veces aparece zonada

debido a bruscos cambios cromáticos y de tamaño de grano. También son frecuentes las inclusiones constituidas por diferentes tipos litológicos arrancadas de las rocas circundantes y englobadas por el magma durante su ascenso a través de fracturas o conductos volcánicos. El color de la andesita varía del marrón negruzco al verde (cuando contiene mucho vidrio volcánico) o el rojizo (Lipmann, 1996).

Tienen una textura microcristalina porfídica, con fenocristales de plagioclasas y de ferromagnesianos. Presentan color gris en algunos tonos claros y oscuros que intemperizan en tonos de ocre, este tipo se encuentra asociado a la Brecha Volcánica presentándose como depósitos acumulados al pie de este volcán; están constituidas por fragmentos angulosos con un rango granulométrico muy amplio, desde granos pequeños hasta grandes bloques, tienen un color amarillento con tonos de ocre, al sufrir intemperización (CETENAL, 1976).

Por lo general las andesitas forman coladas de lavas o domos, es decir masas de lava en forma de cúpula, con frecuencia asociadas a basaltos. Derivan de la solidificación de un magma basáltico debido a un rápido ascenso hacia la superficie (Lipmann, 1996).

La segunda es brecha volcánica compuestas por clastos de roca y minerales preexistentes acumulados mecánicamente que se han vuelto a consolidar en mayor o menor grado, y son volcánicas debido a que son rocas ígneas, las cuales se originaron a través de las diversas erupciones del volcán y por ende han quedado consolidadas en esa zona (Bloomfield y Valastro, 1974).

Figura 3.2.1: Brecha volcánica



Fuente: González, 2005

Las brechas se generan en erupciones explosivas por rotura de la roca de caja y/o de tapones de lava que obturan los conductos de emisión. También se asocian a la extrusión de domos y a la formación de algunos diques (Lutgens, 2005).

El enfriamiento de la superficie de las coladas de lava, unido al desplazamiento diferencial de las zonas más calientes da lugar a procesos de brechificación en dicha superficie (Lutgens, 2005).

En el siguiente cuadro se muestran las superficies que ocupan las rocas.

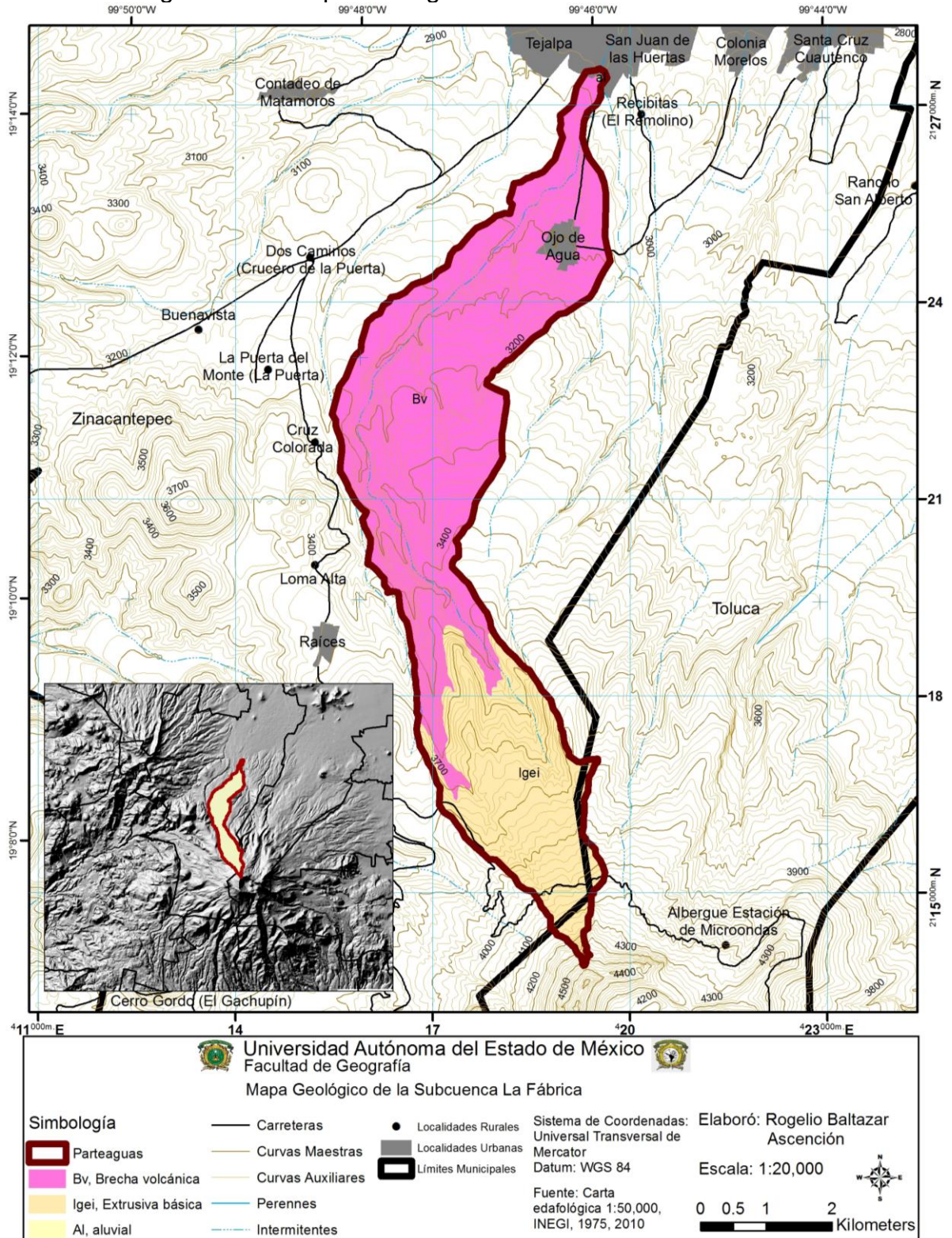
Cuadro 3.2.2: Superficies y porcentajes de la geología

Roca	Superficie	Porcentaje
Brecha volcánica	15.91 km ²	69.5%
Extrusiva básica	6.97 km ²	30.4%
Aluvial	0.02 km ²	0.1%

Fuente: Elaboración propia

Se muestra que la brecha volcánica es la roca dominadora en cuanto a superficie, mientras que la roca ígnea es la que le sigue.

Figura 3.2.2: Mapa Geológico de la Subcuenca La Fábrica



Para entender un poco mejor sobre los procesos geológicos que se llevaron a cabo en la zona, es necesario saber de qué está compuesto el volcán como tal, ya que se fue modelando a través de los años por los diferentes materiales que arrojó en las erupciones.

Es un volcán de tipo compuesto, cuyos productos más antiguos datan de hace 2.6 millones de años, mientras que los más recientes han sido fechados en 3,300 años del presente (Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2002). La estructura volcánica está conformada tanto por derrames de lava como por depósitos piroclásticos: cenizas y pómez (García-Palomo *et al.*, 2002).

La historia activa en cuanto a erupciones del Nevado de Toluca, ha sido muy intensa, con diferentes tipos de erupciones, las cuales van desde emisiones tranquilas de lava hasta erupciones explosivas de gran magnitud que afectaron el entorno natural y depositaron cenizas hasta distancias de 90 km desde el cráter (Bloomfield *et al.*, 1977; Arce *et al.*, 2003).

La actividad volcánica del volcán inició hace 2.6 millones de años, la cual constó de emisión de derrames de lava de composición andesítica y dacítica, que edificaron la estructura volcánica principal (García-Palomo *et al.*, 2002). Posteriormente tuvo erosión intensa entre 1.2 y 0.1 millones de años produciendo depósitos de lahar y depósitos de lodo, los cuales se emplazaron principalmente hacia el sur, con distancias de hasta 50 km (Cantagrel *et al.*, 1981; Macías *et al.*, 1997; Capra y Macías, 2000).

La estructura moderna del Nevado de Toluca, de acuerdo con registros estratigráficos, se formó aproximadamente hace 100 mil años, con la erupción de productos esencialmente de composición dacítica y principalmente por erupciones explosivas (Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2002).

El Nevado de Toluca ha tenido al menos tres colapsos del edificio volcánico, dos de los cuales ocurrieron hace más de 40 mil años en el flanco sur del volcán (Capra y Macías, 2000). El tercer evento de este tipo ocurrió hace 28 mil años (Caballero, 2007), hacia el sector este del volcán.

Posteriormente a las avalanchas de escombros, la actividad se tornó demasiado intensa con explosiones de gran magnitud que produjeron flujos piroclásticos de pómez, emplazados alrededor del volcán. Este tipo de flujos se lanzan a grandes velocidades y altas temperaturas, destruyendo todo a su paso y carbonizando la materia orgánica.

La actividad volcánica más importante ocurrió durante los últimos 50 mil años, siendo la emisión de domos de lava dacíticos y su posterior destrucción un fenómeno muy común. La destrucción parcial o total de estos domos generó flujos piroclásticos de bloques y cenizas, los cuales se emplazaron por las barrancas principales de los alrededores del volcán (Schmincke, 2004). Los depósitos dejados por estos flujos son de color gris-azul con una gran cantidad de fragmentos volcánico de distintos tamaños (bloques, grava y arena), por lo que en la actualidad se observan varias canteras alrededor del volcán. Debido a que estos flujos piroclásticos carbonizaron toda materia orgánica que estaba a su paso, ayudaron a determinar la edad de estos sucesos, que van del más antiguo al más reciente y fueron hace 37 mil, 32 mil, 28 mil, 26,500, <13 mil años (Bloomfield y Valastro, 1974; Cantagrel *et al.*, 1981; Heine, 1988; Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2002). Estos depósitos de flujos piroclásticos están distribuidos alrededor del volcán, hasta a 25 km desde el cráter.

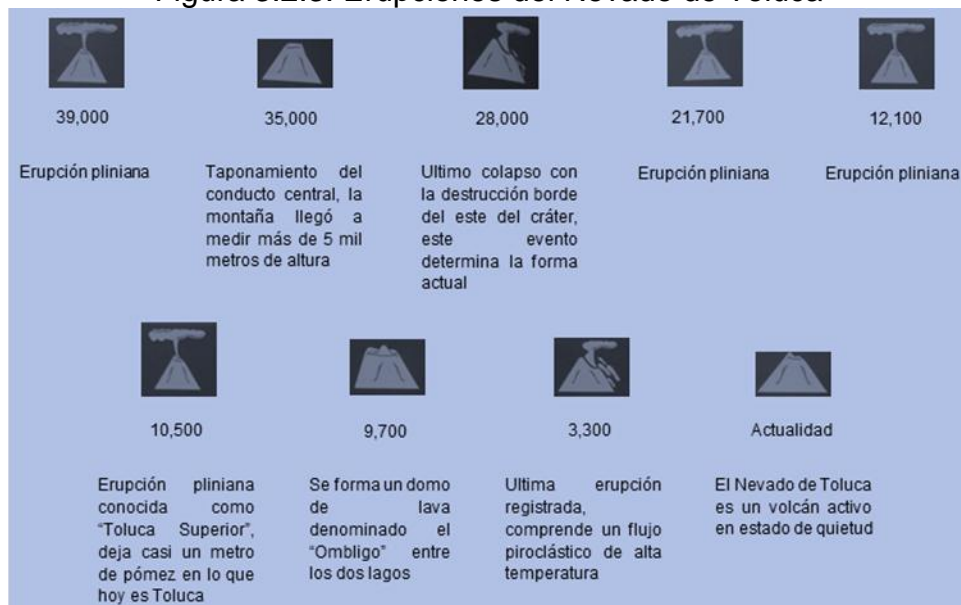
También han ocurrido erupciones de tipo pliniano, las cuales se caracterizan por el desarrollo de una columna vertical de cenizas y pómez, mezcladas con gases y expulsadas a altas velocidades y temperaturas. Las columnas alcanzan alturas estratosféricas de entre 20-42 km; una vez que cesa su ascenso, se inicia una

lluvia de pómez y ceniza, además estos materiales son transportados por los vientos dominantes, motivo por el cual llegan a cubrir áreas muy extensas.

Se han registrado al menos cuatro erupciones plinianas, que fueron hace 39 mil, 21,700, 12,100 y 10,500 años (Bloomfield y Valastro, 1974; Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2002; Arce *et al.*, 2003, 2005; Capra *et al.*, 2006). El último de estos sucesos, conocido en la literatura como Pómez Toluca Superior, depósito aproximadamente un metro de espesor de pómez en la ciudad de Toluca y alrededor de 30 cm de cenizas en el poblado de Tocuila, Estado de México, ubicado a 90 km al noreste del Nevado en línea recta.

La última erupción que se ha documentado depósito un flujo piroclástico de cenizas con intercalaciones de horizontes delgados de pómez. El depósito contiene abundante carbón, que sugiere una alta temperatura durante su emplazamiento, las características de textura del depósito sugieren una interacción con agua externa, esta pudo haber sido proporcionada ya sea por un lago dentro del cráter, por la presencia de un glaciar o hielo en el mismo cráter.

Figura 3.2.3: Erupciones del Nevado de Toluca



Fuente: Elaboración propia con base en Arce y Vázquez, n.d.

En cuanto a las unidades geomorfológicas identificadas dentro de la zona de estudio, se tienen siete, en donde todas ellas han tenido diferentes procesos de formación, y por ende algunas son endógenas y otras exógenas.

Hablando de las de origen volcánico se identificaron cuatro, las cuales son ladera convexa, esta geoforma tuvo su origen en las diferentes erupciones volcánicas que presento el Nevado de Toluca, la cual se ha ido modelando por los mismos motivos, aunado a esto por las corrientes que descienden de las partes más altas del volcán y que han hecho a través de miles de años que se erosione la roca que conforma a esta unidad geomorfológica.

Las siguientes son las cimas, en donde se diferenciaron dos diferentes tipos conforme a su tipo de roca sobre el que están constituidas, más no por su proceso; la primera es una cima sobre rocas de tipo ígneo básico (andesitas), en donde se infiere que se formó en alguna de las múltiples erupciones volcánicas que ha tenido la zona, y que al igual que la ladera, ha sido modelada por estas mismas a lo largo del tiempo.

Las otras cimas son geoformas que se encuentran formadas por brecha volcánica, y que se encuentran en la parte norte o baja de la subcuenca, aunque se encuentren más retiradas al cráter no se descarta la posibilidad que haya sufrido los mismos procesos que las dos geoformas descritas anteriormente.

Finalmente se tiene al lomerío, el cual es una formación ubicada casi en la parte central de la subcuenca, pero emplazada en la parte este de dicha zona, aquí tuvo un proceso volcánico, ya debido al material arrojado a lo largo de las erupciones, principalmente brechas de origen volcánico, formaron esta unidad geomorfológica, y que ha sufrido modelados a lo largo de los años.

Existen tres estructuras que son de origen exógeno, es decir, que se originaron después o a raíz de los resultados de las erupciones volcánicas, en donde como primer lugar se tienen a los valles erosivos, los cuales se clasificaron de esa forma

por la pendiente que tienen, ya que bajan de lo alto del volcán y por ende sus pendientes son moderadas a fuertes, es decir, van de los 6°-30°; y está es la única geoforma que recorre toda el área de estudio de sur a norte y de este a oeste. Tienen su origen en los glaciares del Nevado de Toluca, en donde desde hace 20 mil (Heine, 1988), han bajado los ríos haciendo que su paso erosivo no sea de apenas, sino que ya tiene tiempo realizando el modelaje.

Ya que termina la zona de ladera, comienza la zona del piedemonte, siendo este la segunda geoforma de origen exógeno, pero con un proceso diferente al del valle, puesto que si el valle es erosivo, todo lo que va erosionando y arrastrando, se tiene que depositar en algún lugar, y ese lugar es en primer lugar el piedemonte, y en segundo la planicie, siendo la tercera geoforma; de ambas unidades geomorfológicas, se tienen terrenos planos y casi planos, ya que sus pendientes principalmente en la planicie, son de 0° a 6°, mientras que en el piedemonte, se tienen algunas zonas con pendientes arriba de los 6°, pero que no exceden los 15°.

Se comienza por la geología, es decir sus procesos geológicos que ha tenido, a lo largo de numerosas erupciones como ya se mencionó con anterioridad, ha arrojado de igual manera varios materiales, que principalmente son cenizas y pómez; con base en esto y por la zona en que se encuentra la subcuenca, en la parte sur, se encuentran los derrames de lava de basalto y de andesita, lo cual indica que es roca sólida esta zona y es donde se encuentra la ladera convexa, y no tiene o casi no tiene problemas de erosión por cárcavas.

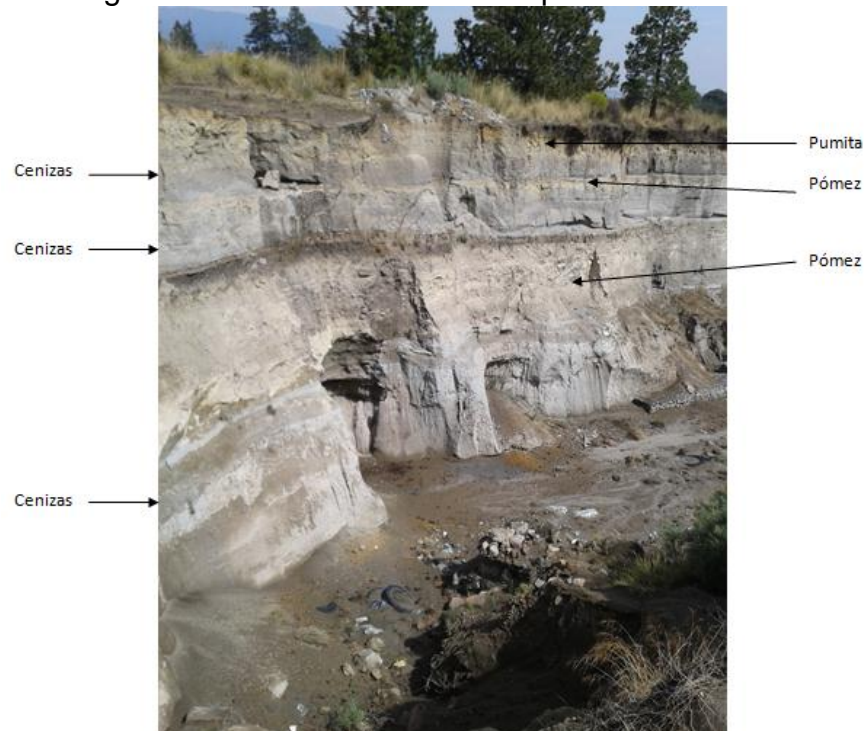
El problema comienza en el piedemonte, ya que en esta geoforma se ubican depósitos que son lahares y volcánicos como tal, es decir ceniza y pómez, principalmente; de acuerdo a las erupciones la conformación de las capas de material volcánico es de la siguiente manera: ceniza, pómez, cenizas (gris-azul), pómez, ceniza-pómez, pumita. Esto da lugar a que la zona sea muy vulnerable a este tipo de erosión hídrica, ya que si bien, el piedemonte se encuentra en brecha

volcánica, este tipo de roca se puede llegar a encontrar varios cientos o miles de metros por debajo, por el hecho de que es de lo que está formado el Nevado de Toluca.

La principal problemática de estos materiales es su composición, la cual es muy porosa y permite pasar el agua, haciendo que se vaya disolviendo el material y por ende empezar a carcaravar la zona; la ceniza se conglomerera con el agua haciéndola un poco más resistente que la pómez, pero cuando se encuentra seca, sufre el mismo proceso que la pómez.

La cárcava va a seguir socavando hasta que se encuentre una capa de material resistente al agua, que no sea poroso, que no sea deleznable y que tenga compactación, es decir, hasta que se encuentre con roca, que en este caso sería brecha volcánica, dejaría de socavar el terreno, pero no dejaría de alargar el proceso de manera longitudinal y transversal.

Figura 3.3.1: Identificación de depósitos volcánicos

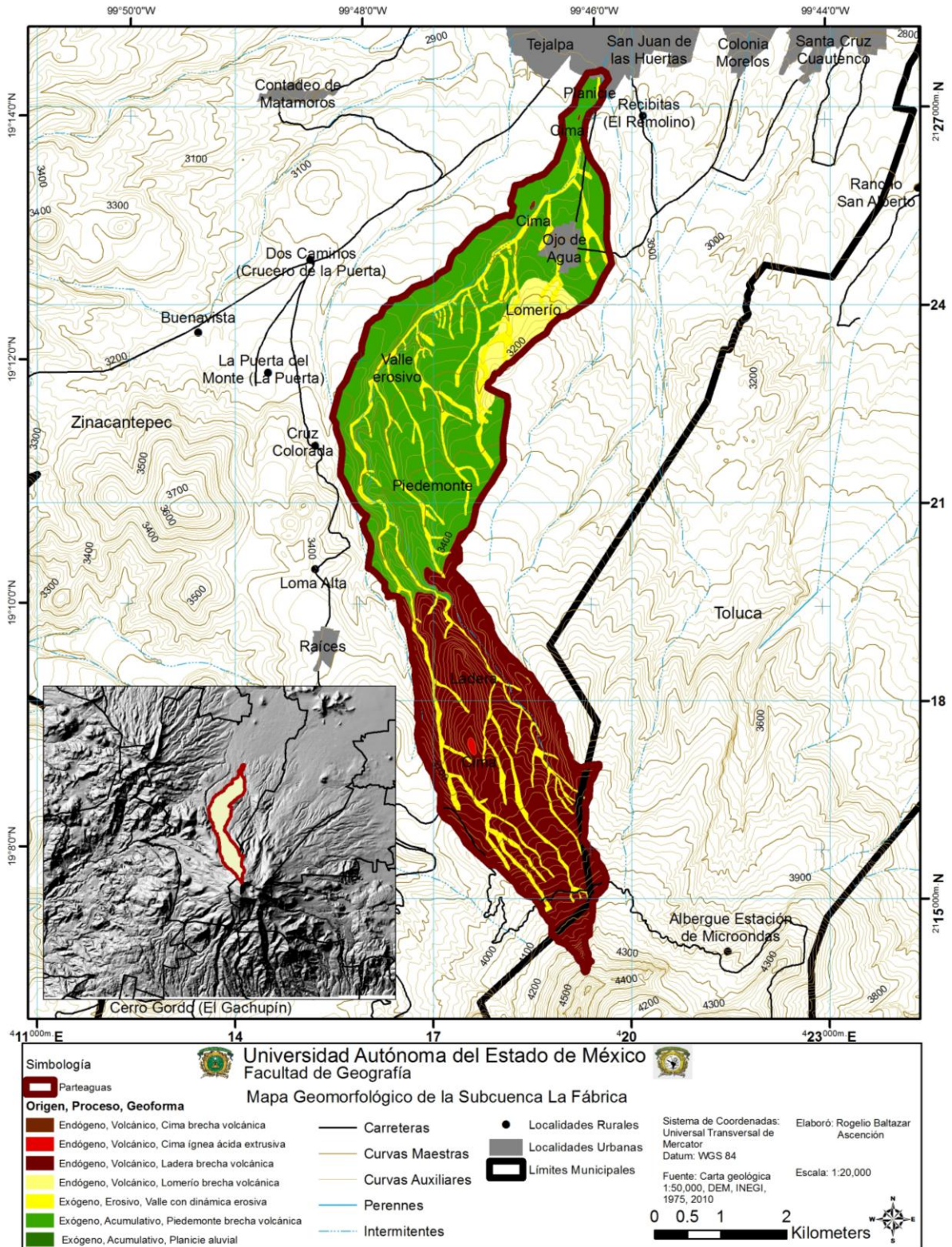


Fuente: Elaboración propia con base en los procesos eruptivos y trabajo de campo, 2014

La otra geoforma que tiene el mismo problema pero a menor escala es el lomerío, y no es tanto por los materiales arrojados de erupciones, sino más bien por la pendiente del terreno, ya que son de 6° a 15°, lo cual provoca que exista erosión hídrica y que forme cárcavas, solo que es este caso, dichas formaciones no son tan profundas como las que se encuentran en el piedemonte, por los motivos ya mencionados, ya que en esta área si se puede detener el socavamiento por el hecho de que el proceso ya se topó con roca sólida, deteniendo la profundización.

Los valles siempre van a estar activos en este caso, pero depende de otros factores como el uso del suelo, tipo de suelo, para que sean destructivos en cuestión de formación de cárcavas.

Figura 3.3.2: Mapa Geomorfológico de la Subcuenca La Fábrica



En el siguiente cuadro se muestra la superficie y porcentaje de cada geoforma existente dentro de la zona de estudio.

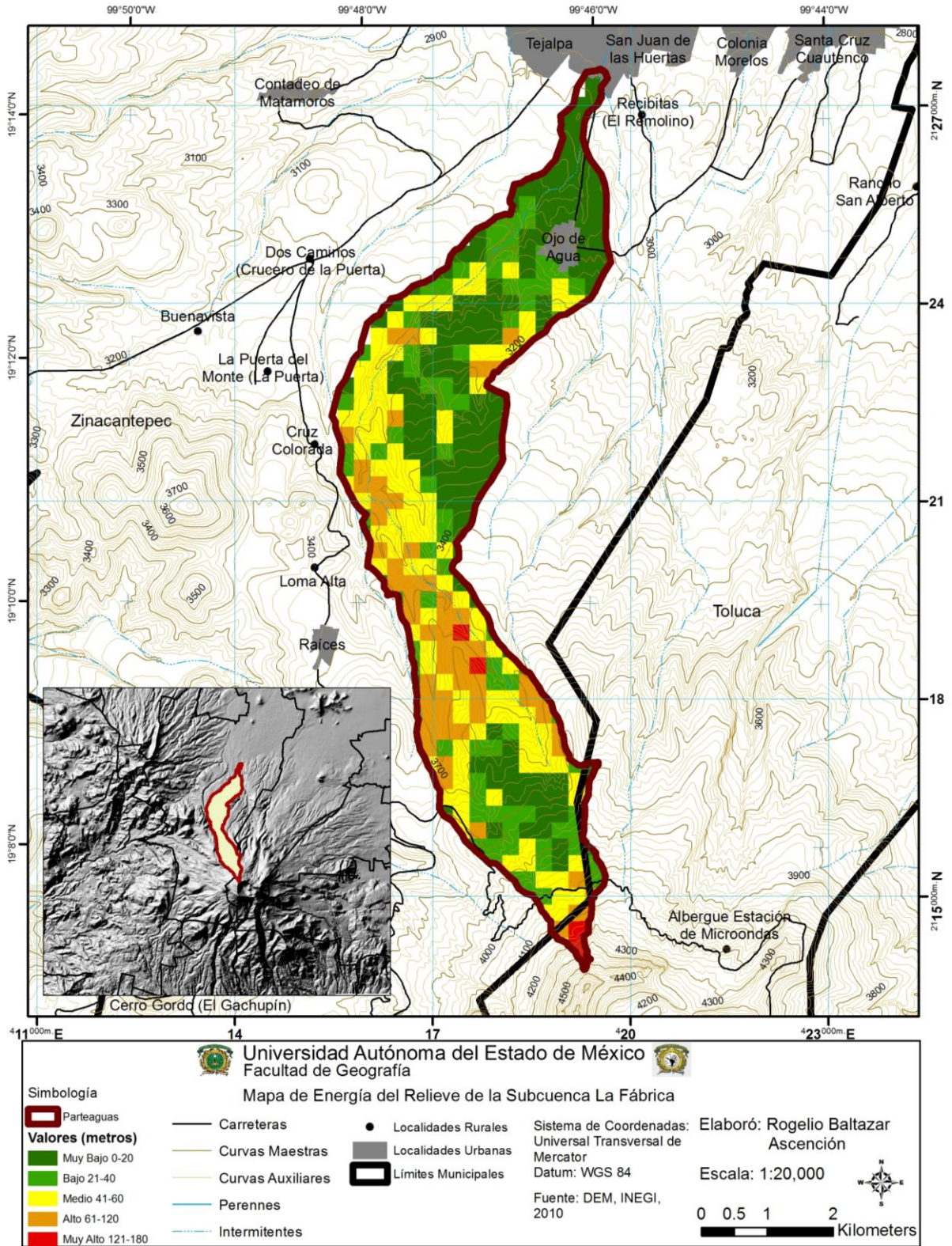
Cuadro 3.3.2: Superficies y porcentajes de geoformas

Geoforma	Superficie	Porcentaje
Cima brecha volcánica	0.01 km ²	0.04%
Cima ígnea ácida	0.02 km ²	0.09%
Ladera convexa	7.99 km ²	34.8%
Lomerío brecha volcánica	0.97 km ²	4.2%
Piedemonte brecha volcánica	10.75 km ²	46.8%
Planicie aluvial	0.03 km ²	0.13%
Valle erosivo	3.18 km ²	13.9%

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las cárcavas se encuentran sobre los valles, teniendo excepciones, pero que siguen siendo influenciadas a que aparezcan y crezcan por los procesos geológicos, puesto que no es necesario que exista una corriente intermitente o perenne, sino que con el elemento precipitación aunado a los materiales volcánicos, permite que se infiltre el agua y comience el proceso de abajo hacia arriba.

Figura 3.3.3: Mapa de Energía del Relieve de la Subcuenca La Fábrica



En la figura 3.3.3 se muestran las diferencias altimétricas que existen dentro de la subcuenca, lo cual indica cuales son los lugares donde ocurre o puede ocurrir mayor erosión.

Dichos lugares se ubican con los colores amarillos, naranja y rojo, ubicándose principalmente en la zona media de la subcuenca, en dirección sur.

Son lugares que se ubican en los cauces de las corrientes, ya sean intermitentes o en la perennes, la cual es la que se hace más evidente, partiendo de la parte sur rumbo al norte por la parte occidental de la zona de estudio.

Mientras que las partes en color verde fuerte y verde claro son áreas que tienen similitud en el relieve, es decir, que no tienen elevaciones y al mismo tiempo tienen barrancos, por dar un ejemplo; esto hace que el terreno al ser parejo sea menos propenso a que pueda existir erosión.

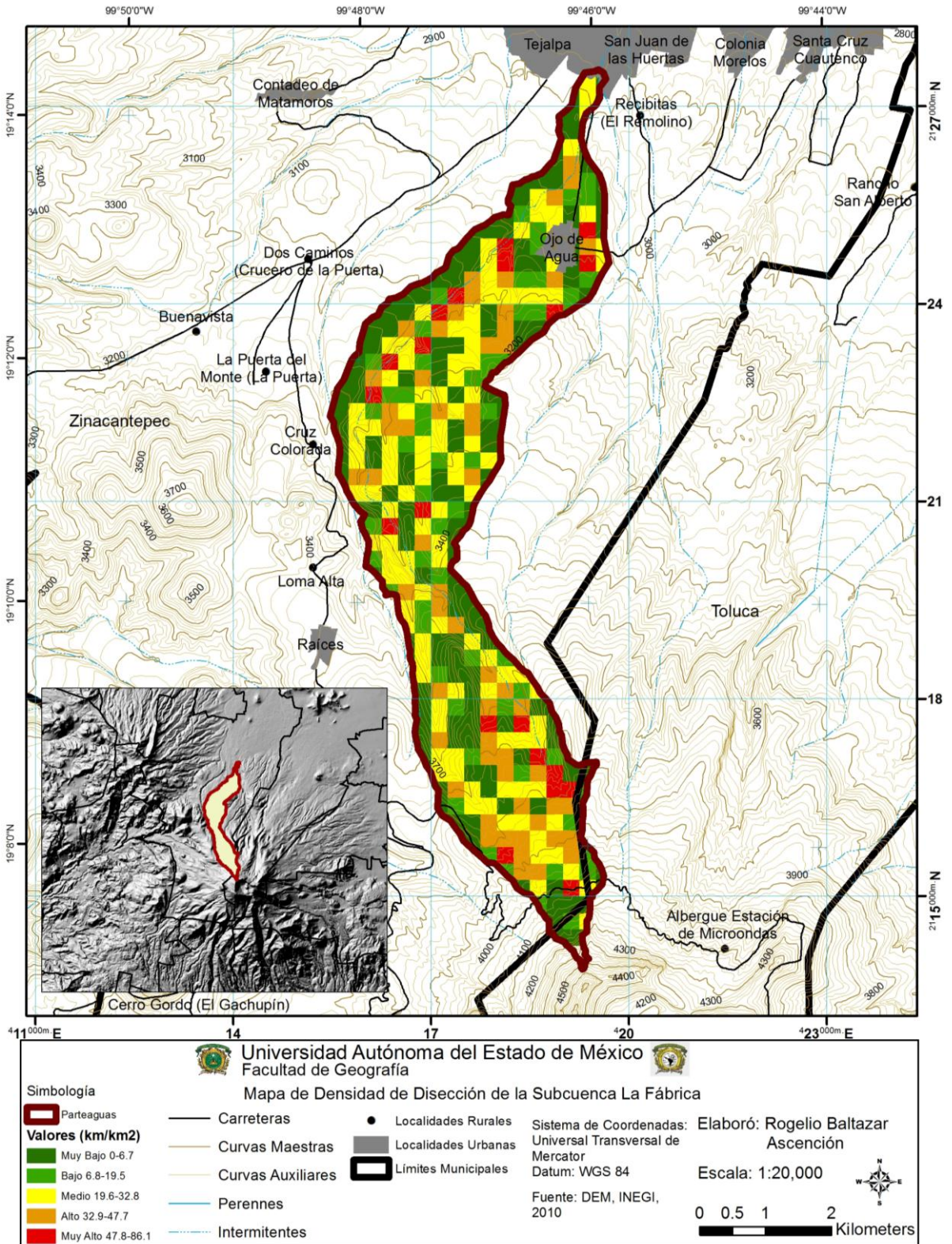
En el siguiente cuadro se observa la superficie y porcentaje que tiene cada valor de la energía del relieve dentro de la subcuenca, en donde el valor muy bajo es el que tiene mayor superficie y todo lo contrario el valor muy alto con solo el 1.05% del porcentaje total.

Cuadro 3.3.3: Superficies y porcentajes de energía

Valor	Superficie	Porcentaje
Muy Bajo	8.96 km ²	39.11%
Bajo	4.31 km ²	18.81%
Medio	6.10 km ²	26.80%
Alto	3.30 km ²	14.40%
Muy Alto	1.05 km ²	1.05%

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3.4: Mapa de Densidad de Disección de la Subcuenca La Fábrica



Mientras que el mapa de densidad de disección muestra el grado de erosión que tienen las corrientes de agua en la subcuenca, esto resulta de realizar la sumatoria de los ríos por cada cuadro de 250 m², y teniendo esto se obtiene, si es muy alto (0-67 m), alto (68-195 m), medio (196-328 m), bajo (329-477 m) o muy bajo 478-861 m) el grado de erosión que se produce sobre la superficie.

Existen valores muy bajos, pero podrían nulos, debido a que donde se encuentran ubicados estos cuadros no pasa ningún tipo de corriente.

Los colores verde claro, tienen un valor bajo, por lo que indica que solamente pasa un fragmento de una corriente ya sea intermitente o perenne, o bien pasa solo una corriente intermitente pequeña, que no supera los 250 m de longitud.

La mayoría de la subcuenca tiene un poder erosivo que va de valor medio a alto, puesto que se observa como está coloreado el mapa de colores amarillo y naranja, teniendo algunas pequeñas zonas con valor muy alto, pero esto solo es en donde corrientes intermitentes se unen a la corriente principal y que se encuentran dentro del mismo cuadro de 250 m².

Cuadro 3.3.4: Superficies y porcentajes de densidad

Valor	Superficie	Porcentaje
Muy Bajo	10.18 km ²	44.2%
Bajo	3.41 km ²	14.8%
Medio	6 km ²	26.1%
Alto	2.91 km ²	12.7%
Muy Alto	0.51 km ²	2.2%

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el cuadro se encuentra un tanto equilibrado el porcentaje, en donde se pueden agrupar en 3 grupos, los de mayor porcentaje que son el valor muy bajo y medio, en donde el primero hace referencia que casi no existen corrientes que crucen por esas áreas, mientras que en el segundo es dentro de los

valores altos donde se encuentran la mayor cantidad de corrientes que cruzan en esas áreas.

El otro grupo es el bajo y el alto, en donde tienen un cierto porcentaje de corrientes en sus áreas; y finalmente se tiene el valor muy alto, el cual cuenta con muy pocas corrientes.

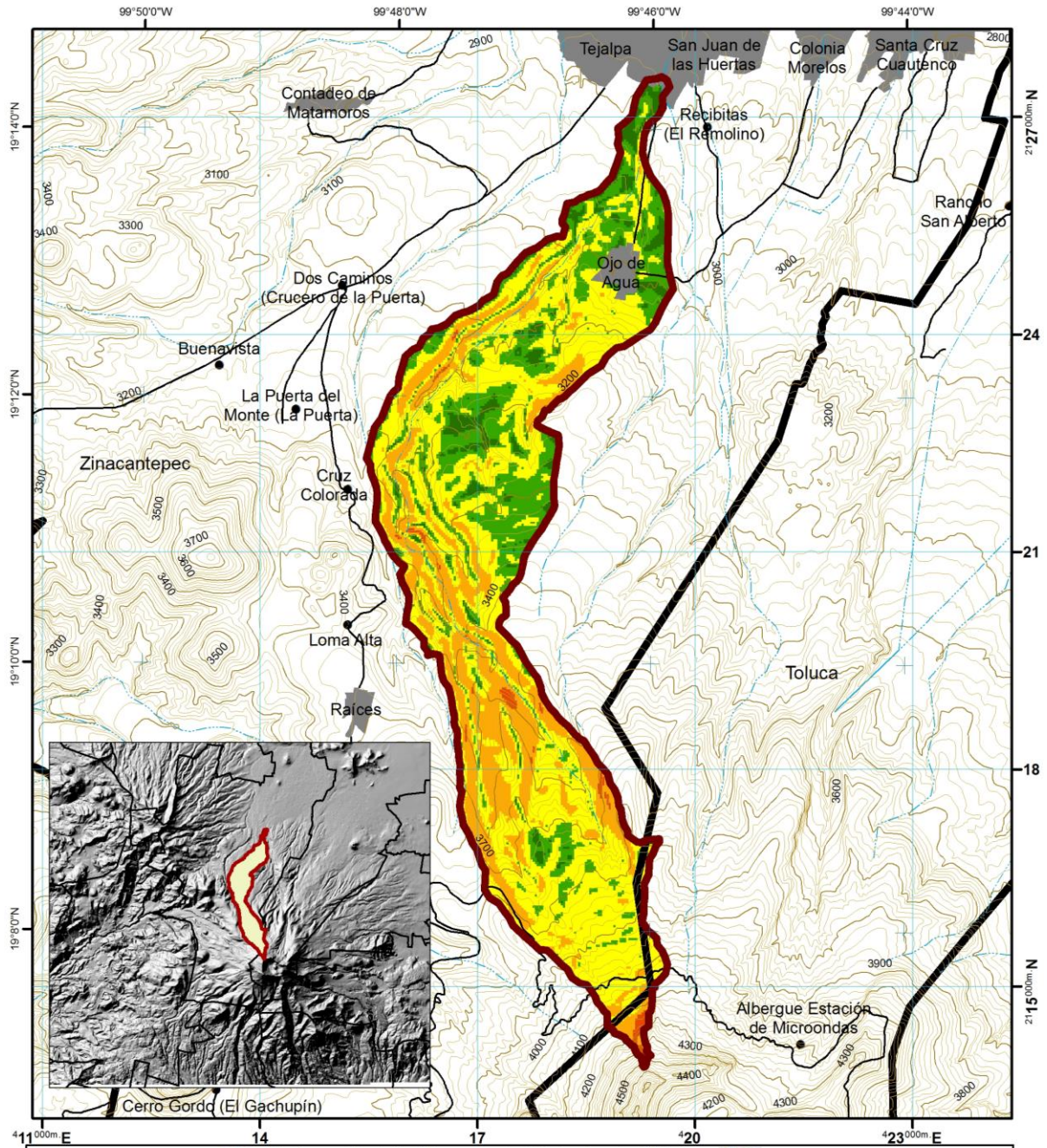
Muy aparte de que si se está tratando el tema de erosión hídrica por cárcavas, es importante señalar que la zona de estudio es muy susceptible a la erosión hídrica, pero que con base en ciertos elementos, factores y procesos, se hace una zona muy susceptible a la erosión por cárcavas.

En el mapa de pendientes se muestran los valores de acuerdo a Lugo (1989), en donde sí existen pendientes mayores a los 45° y que llegan a los 90° , pero son limitadas las zonas, las cuales se encuentran en la parte correspondiente a la ladera, es decir, la parte sur de la subcuenca.

Mientras que en la parte media y norte, se presenta como dominantes las pendientes con una inclinación que van desde 0° hasta los 6° , lo cual hace referencia que son terrenos casi planos.



El resto de la zona presenta pendientes moderadas y fuertes, las cuales se dan principalmente por donde corren los ríos, ya sean perennes o intermitentes.

Figura 3.3.5: Mapa de Pendientes de la Subcuenca La Fábrica




Universidad Autónoma del Estado de México
 Facultad de Geografía

Mapa de Pendientes de la Subcuenca La Fábrica

Simbología  Parteaguas  Ligeramente suave 0°-3°  Suave 3°-6°  Moderada 6°-15°  Fuerte 15°-30°  Muy fuerte 30°-45°  Abrupta >45°	 Carreteras  Curvas Maestras  Curvas Auxiliares  Perennes  Intermitentes	 Localidades Rurales  Localidades Urbanas  Límites Municipales	Sistema de Coordenadas: Universal Transversal de Mercator Datum: WGS 84 Fuente: DEM, INEGI, 2010	Elaboró: Rogelio Baltazar Ascención Escala: 1:20,000 
--	---	---	--	--

En el siguiente cuadro se observa la superficie y porcentajes que ocupa cada rango de pendiente.

Cuadro 3.3.5: Superficies y porcentajes de pendientes

Rango	Superficie	Porcentaje
0°-3°	4.45 km ²	19.4%
3°-6°	13.41 km ²	58.5%
6°-15°	2.63 km ²	11.5%
15°-30°	1.71 km ²	7.5%
30°-45°	0.66 km ²	2.9%
45°-90°	0.05 km ²	0.2%

Fuente: Elaboración propia

Se muestra que tres cuartas partes de la subcuenca tiene pendientes que van de los 0° a los 6°, mientras que las pendientes de 6° 30° ocupan el otro cuarto restante de la superficie.

3.4 Suelos

El suelo, dentro de la temática que se está abordando es una parte fundamental, ya que la erosión radica en él, sobre todo dependiendo el tipo de suelo que es, es decir, si es permeable o no, o si es deleznable o no, ya que estas propiedades del suelo hacen que exista infiltración o no y por consiguiente si son suelos que se presten a que exista un proceso de erosión hídrica agudo.

Dentro del tema de investigación es importante decir que los suelos que se tomarán en cuenta son los de origen volcánico, debido a que es una zona perteneciente al Nevado de Toluca y por consecuencia cuenta con este tipo de suelos, los cuales se formaron a raíz de las múltiples erupciones que ha tenido a lo largo de su historia.

El proceso de formación del suelo comienza con la desintegración de la roca madre que está expuesta en la superficie de la corteza terrestre a partir del

rompimiento físico y químico ocasionado por las lluvias, el viento, la exposición al sol y la actividad mecánico-biológica de raíces de las plantas. En el caso de la actividad biológica, las cianobacterias y los líquenes son los primeros colonizadores del sustrato rocoso, ya que liberan ácidos orgánicos débiles, como el ácido carbónico, que disuelve lentamente la roca madre. Después, el efecto mecánico del crecimiento de las raíces acelera la ruptura de las rocas, además de que la presencia de las plantas permite una gran actividad de micro y meso organismos y la acumulación de materia orgánica en diferentes estados de descomposición, la cual también contribuye a la formación del suelo.

De acuerdo a la clasificación de los suelos de la FAO/UNESCO (1970), los suelos existentes dentro de la Subcuenca del afluente la Fábrica son los Andosoles húmico y ócrico, los cuales abarcan más de la mitad de la superficie de la zona de estudio; dichos suelos son derivados de cenizas volcánicas, presentan una capa de color oscuro en su primer horizonte, son ligeros, ácidos, pobres en nutrientes, con buena capacidad de retención en humedad.

El término andosol deriva de los vocablos japoneses "an" que significa negro y "do" que significa suelo, haciendo alusión a su carácter de suelos negros de formaciones volcánicas (FAO, 2001).

En la figura 3.4.1 se observa un suelo de tipo andosol.

Figura 3.4.1: Andosol



Fuente: FAO, 2012

El material original lo constituyen, fundamentalmente, cenizas volcánicas, pero también pueden aparecer sobre tobas, pumitas, lapillis y otros productos de eyección volcánica.

Se encuentran en áreas onduladas a montañosas de las regiones húmedas, desde el ártico al trópico, bajo un amplio rango de formaciones vegetales.

La mayoría de los Andosoles están cultivados de forma intensiva con una gran variedad de plantas. Su principal limitación es la elevada capacidad de fijación de fosfatos, en otros casos lo es la elevada pendiente en que aparecen, que obliga a un aterrazado previo.

Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Tienen también uso pecuario especialmente ovino; el uso más favorable para su conservación es el forestal. Son muy susceptibles a la erosión eólica y su símbolo es (T).

Mientras que su nivel de susceptibilidad a la erosión hídrica es medio o bajo mientras se encuentre fijado por vegetación arbórea; sin vegetación arbórea presente es alto su nivel de susceptibilidad por el tipo de material por el que está formado.

Otro tipo de suelo presente es el Feozem háplico, el cual ocupa casi la otra parte restante de la subcuenca; presenta una capa de superficial rica en materia orgánica y nutrientes. La textura de los materiales que se presentan son en su mayoría limos, seguidas por las arenas, catalogándose como limo-arenosa lo que ocasiona que su grado de permeabilidad sea medio.

Los Phaeozem (del griego *phaios*, oscuro y del ruso *zemlja*, tierra) se forman sobre material no consolidado. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques. Son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, lo que les confiere un alto potencial agrícola; sin embargo, las

sequías periódicas y la erosión eólica e hídrica son sus principales limitantes. Se utilizan intensamente para la producción de granos (soya, trigo y cebada, por ejemplo) y hortalizas, y como zonas de agostadero cuando están cubiertos por pastos (FAO, 1978).

Son suelos formados principalmente, a partir de rocas silicatadas de origen volcánico: andesitas, traquitas, riolitas, basaltos, veritas, jumillitas, etc., y metamórfico: esquistos, cuarcitas, metabasitas, pizarras, etc. Al igual que en el caso anterior, ocupan áreas montañosas, colinas y cabezos que tienen una densa cobertura vegetal, bien de matorral o de tipo forestal, que aporta abundantes restos orgánicos al suelo (Universidad de Murcia, 2010).

El nivel de susceptibilidad a la erosión hídrica es alto debido a que es un suelo muy poroso y por ende el agua se lo lleva.

Por último están el Leptosol y el Regosol eútrico, los cuales son pequeños polígonos en las partes más altas de la subcuenca y son suelos someros que presentan texturas que van desde arenas gruesas hasta material gravoso, por lo que su grado de permeabilidad es alto.

Los Litosoles o Leptosoles son suelos superficiales, cuyo espesor está limitado por un contacto lítico a 30 cm o menos de profundidad. En estos suelos, el arraigamiento está limitado por la profundidad del solum y únicamente la presencia de grietas o diaclasas en la roca permite la penetración de las raíces a mayor profundidad.

Los Leptosoles aparecen sobre rocas que han resistido la meteorización, proceso favorecido comúnmente por una topografía quebrada que facilita la erosión de los productos resultantes.

Algunos pocos Leptosoles presentan un delgado horizonte subsuperficial que reúne las características de un horizonte cámbico o argilúvico, pero que desaparecería si el suelo fuera arado. Tales horizontes no se consideran

diagnóstico para evitar clasificar suelos vírgenes y cultivados similares en grupos diferentes.

Desde el punto de vista genético, no puede decirse que los Leptosoles son suelos jóvenes, debido a que la mayoría de ellos muestran evidencias claras de una acción prolongada de los procesos de formación del suelo, tales como acumulación de materia orgánica, formación de arcilla, desarrollo de estructura y liberación de óxidos (FAO, 2001).

En la categoría de Regosoles (del griego *reghos*, manto) se agrupa a los suelos que no pueden ser clasificados dentro de los grupos reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. En otras clasificaciones se reconocen como Entisoles. En general, son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica. Se encuentran en todos los climas, con excepción de zonas de permafrost, y en todas las elevaciones, aunque son particularmente comunes en las regiones áridas, semiáridas (incluyendo los trópicos secos) y montañosas. Muchas veces se asocian con los Leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Los Regosoles de zonas áridas tienen escasa vocación agrícola, aunque su uso depende de su profundidad, pedregosidad y fertilidad, por lo que sus rendimientos son variables (FAO, 2001).

La susceptibilidad del Leptosol y del Regosol eútrico a la erosión hídrica es medio, puesto que su material del que están conformados provoca que al casi no ser aptos para vegetación, son suelos desnudos que por consecuencia no tienen nada que los proteja ante el proceso erosivo del agua.

En la figura 3.4.2 se observa un suelo regosol

Figura 3.4.2 Regosol



Fuente: Burkhardt, 1997

En el siguiente cuadro se muestra la superficie que tiene cada suelo dentro de la zona de estudio.

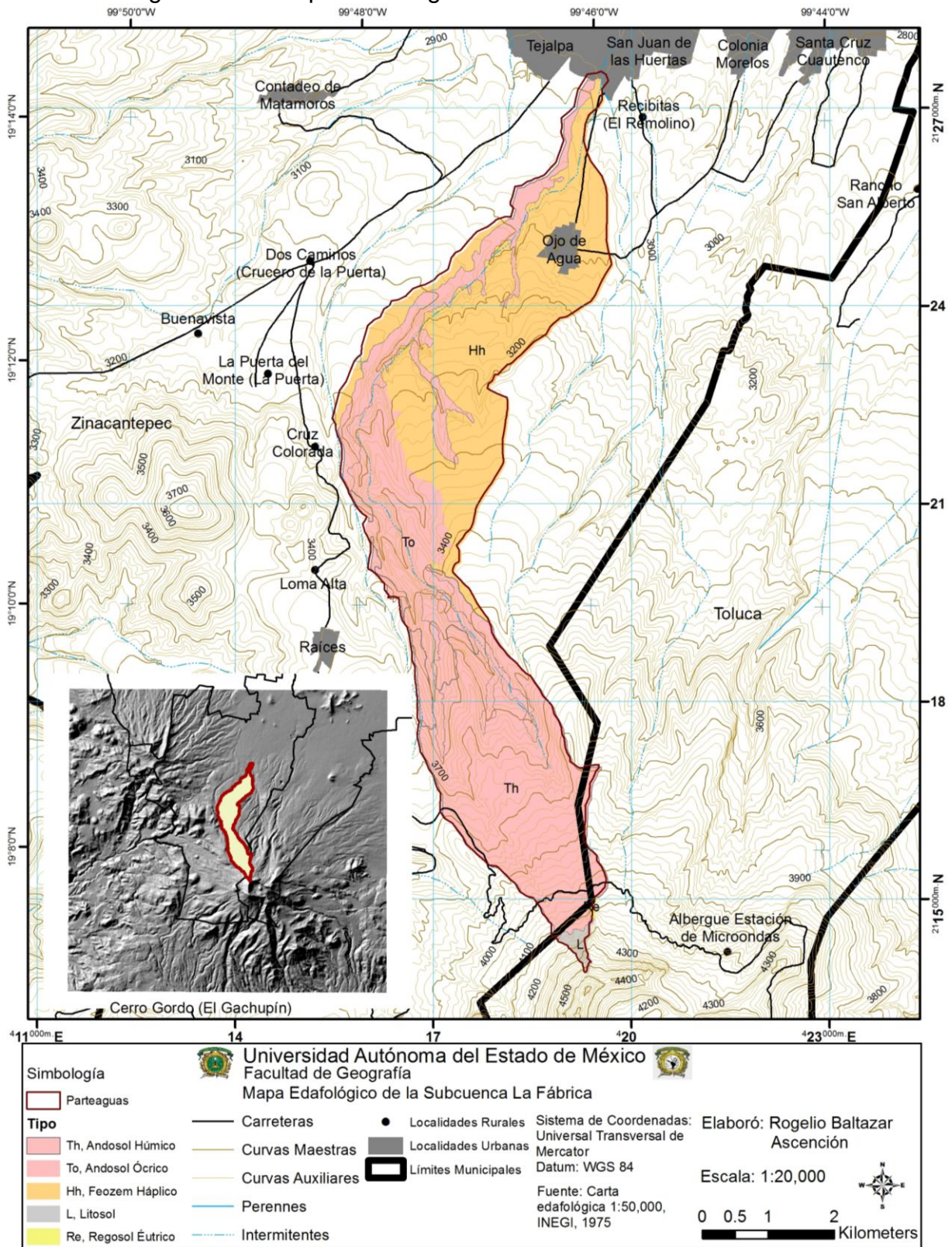
Cuadro 3.4.3: Superficies y porcentajes de suelos

Suelo	Superficie	Porcentaje
Andosol húmico	10.20 km ²	44.52%
Andosol ócrico	3.53 km ²	15.40%
Feozem háplico	8.99 km ²	39.24%
Litosol o Leptosol	0.17 km ²	0.74%
Regosol eútrico	0.02 km ²	0.10%

Fuente: Elaboración propia

Se muestra que son dos los suelos dominantes en cuanto a ocupación siendo el andosol húmico y el feozem háplico, siguiéndoles el andosol ócrico, y casi sin superficie están el leptosol y el regosol eútrico.

Figura 3.4.3: Mapa Edafológico de la Subcuenca La Fábrica



De acuerdo a lo que se muestra en el mapa, se observa como están distribuidos los diferentes tipos de suelos existentes en la subcuenca, en donde como suelos dominantes se tienen al Andosol húmico y el Feozem háplico, siguiendo el Andosol ócrico, Litosol o Leptosol y finalmente el Regosol eútrico.

Se muestra también que las cárcavas se localizan principalmente en el Feozem háplico, esto porque su estructura es muy porosa, lo cual permite que la acción del agua se infiltre en el suelo, haciendo que se vayan formando surcos o arroyadas en primer lugar, para después darle paso a las cárcavas.

El suelo es otro elemento que es propicio para que exista la erosión hídrica, debido a los tipos que presenta la subcuenca, ya que se presentan suelos muy erosionables por naturaleza, y uno en específico lo es con mayor importancia por su ubicación y su composición, el cual es el Feozem háplico, ya que este por su composición es muy deleznable y permite que el agua penetre en él sin ningún problema, ocasionando que se empiece a carcavar la zona, o que se produzcan surcos, el cual es el proceso anterior a la formación de cárcavas.

3.5 Hidrología

La zona de estudio pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago (RH12), teniendo como Subregión Hidrológica el Alto Lerma; dentro de dicha Región y Subregión se encuentra dentro de dos cuencas, las cuales son la Cuenca del Río Lerma-Toluca y la Cuenca Río Cutzamala; la primera cuenca se localiza norte de la zona de estudio, mientras que la segunda está en la parte sur. Ambas cuencas comparten la Subcuenca del Río Tejalpa, en la cual se localiza la Subcuenca del afluente La Fábrica (CONAGUA, 2007).

La zona de estudio es una subcuenca endorreica puesto que no tiene salida al mar, sino que el agua se junta con el caudal del Río Lerma, desfogando sus aguas en el Lago de Chapala, en el Estado de Jalisco.

Cuenta con una red de drenaje de tipo dendrítico, debido a que viene a formar una mano extendida, siendo equivalentes los afluentes del río principal, a cada uno de los dedos de la mano. Es el tipo de drenaje fluvial más común que existe.

Existen dos tipos de corrientes en la zona de estudio, perenne e intermitentes; la corriente perenne presenta el flujo todo el año, siendo la corriente principal que se origina principalmente a los 3,900 msnm, mientras que la intermitente está representada por los afluentes.

Las corrientes de la subcuenca fueron inferidas por medio de las curvas de nivel cada 5 metros.

Pertenecen al 4°- orden de corrientes debido a la magnitud de las modificaciones, las del 1°- al 3°- orden son intermitentes, mientras que la del 4°- está representada por el cauce principal (Plan de Desarrollo Municipal, 2010).

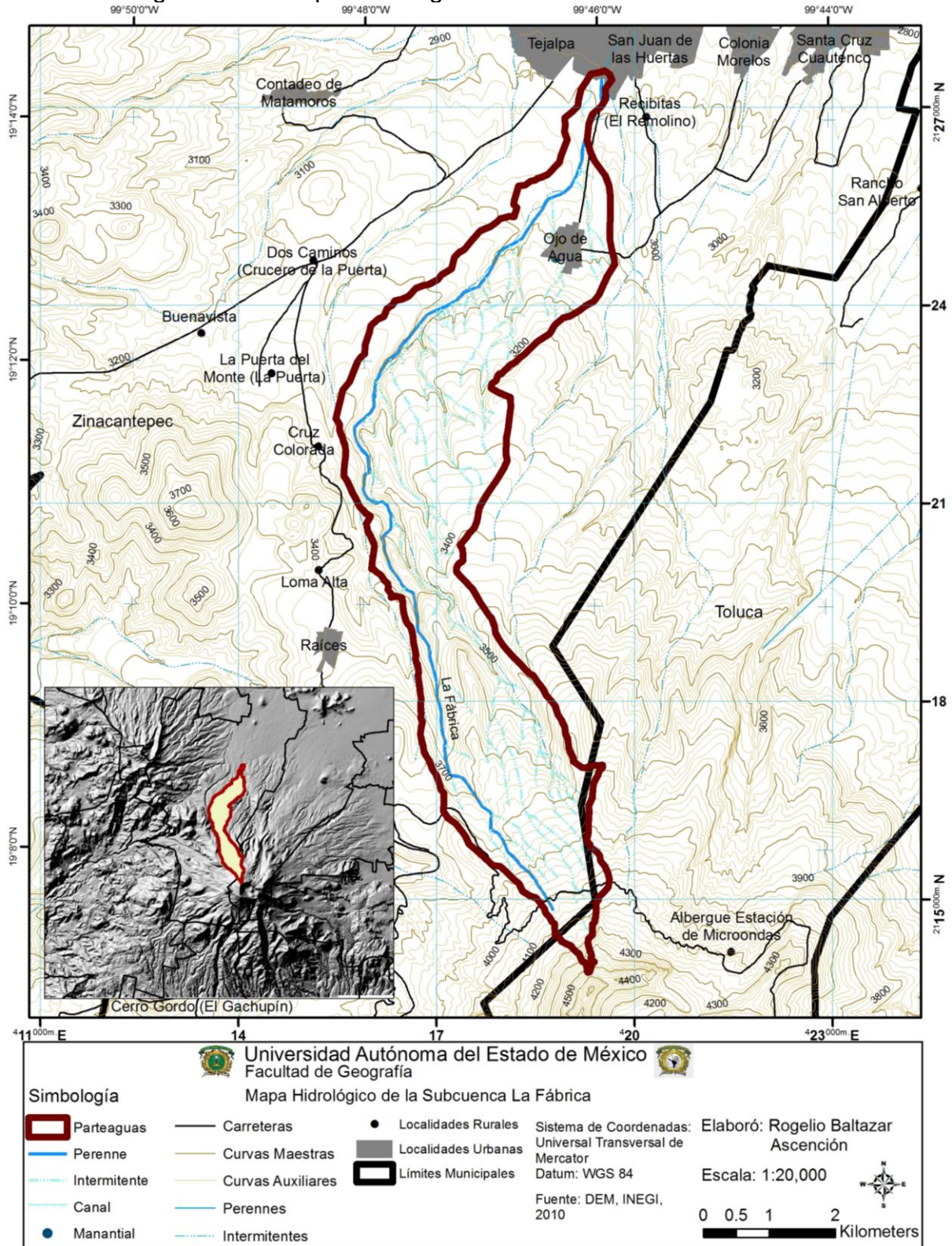
Las fuertes pendientes existentes en la mayor parte de la subcuenca afluente, aunadas a la resistencia de las rocas, originan consecuentemente un modelo de drenaje paralelo.

El río perenne o principal cuenta con una longitud de 15.59 km, mientras que los afluentes intermitentes cuentan con una longitud total de 59.55 km en una totalidad de 81 ríos.

Cuenta con un canal en la parte norte, casi en el límite de la zona, en la proximidad del poblado de San Juan de las Huertas; cuenta también con un manantial, el cual se localiza en el curso de un afluente intermitente en la parte norte de la subcuenca.

Se observa en la figura 3.5.1 que toda la subcuenca cuenta con afluentes intermitentes, es decir que es una zona en donde al existir tantas corrientes intermitentes facilitan el proceso erosivo junto con el tipo de geología que existe.

Figura 3.5.1: Mapa Hidrológico de la Subcuenca La Fábrica



3.6 Uso del Suelo y Vegetación

El uso del suelo del 2014 en la Subcuenca, se conforma por las tres principales actividades primarias, las cuales son la agricultura de temporal con cultivos anuales, los cuales son el maíz cultivado en las partes bajas y la papa en las partes medias y altas de la zona de estudio, teniendo mayor porcentaje de terreno en la zona la papa.

La segunda actividad son las zonas de pastoreo para la ganadería presente en la zona, que es en su totalidad ganado ovino, la cual no es de gran importancia, ya que esta zona es más agrícola y minera, solamente se encuentran pequeñas áreas, en la parte central de la subcuenca.

Mientras que como tercera actividad económica se tienen zonas de minería, de donde se extrae principalmente grava y arena, en la zona existen tres minas en total, dos de ellas ya abandonadas, las cuales quedan en las cercanías de la localidad de Raíces, y la otra que se encuentra activa, siendo la más grande y se lo caliza en las cercanías de la localidad de Ojo de Agua, más precisamente al suroeste.

Otro uso son las áreas en descanso, estas áreas son como su nombre lo dice en descanso, es decir, se dejan reposar cierto periodo de tiempo para poder volver a utilizarlas, principalmente para la agricultura, o en segundo caso para la ganadería existente.

El desmonte es un uso de suelo, ya que este existe principalmente en la zona del oyamel y oyamel-cedro, donde se usan estos terrenos para el uso agrícola, pero que todavía no tienen ese uso.

El último uso es el de los suelos desnudos, y se le coloca en el sector antrópico, debido a que estos lugares son cárcavas altamente activas, motivo por el cual su vegetación arbustiva es escasa o nula, en donde la mano del hombre ha

intervenido de una manera muy importante para que dichas formaciones sigan creciendo.

De acuerdo a la ubicación geográfica y su tipo de clima, la zona de estudio, tiene un tipo de vegetación de bosque templado de coníferas y latifoliadas, la cual se homologa con bosque de quercus o bosque de coníferas (Rzedowski, 1978), bosque de enebros, pinares, encinares, bosque de abetos (Miranda y Hernández, 1963) y bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de táscate, bosque de cedro, bosque de ayarín, matorral de coníferas (INEGI, 2005 b).

Los ecosistemas templados forman parte del conjunto de vegetación típico de latitudes no tropicales, en donde el clima tiene una estacionalidad anual marcada y un invierno durante el cual la temperatura cae por debajo de 0°C, frecuentemente con heladas, nevadas y períodos prolongados de congelamiento. Esta vegetación la integran distintos biomas, o conjuntos de ecosistemas afines. Es muy importante señalar la estrecha relación entre la distribución natural de estos biomas y el clima predominante (Strahler y Strahler, 1984).

Los bosques de encinos, se distribuyen en la parte media de las faldas de las montañas, en cuya parte alta están dominados por las coníferas, debido a su mayor tolerancia al frío. Asimismo, en las serranías de origen volcánico, con suelos ácidos, nuevamente predominan los pinos, cuya evolución como taxón en México se considera estrechamente ligada a los procesos de vulcanismo en el pasado geológico, adaptado a la acidez de los suelos derivados de los flujos de lava y a los incendios provocados por las erupciones volcánicas (Rzedowski 1978; Cevallos-Ferriz y Ramírez 1998).

Los bosques de coníferas de México son comunidades de vegetación siempre verde. Entre sus distintos tipos, los bosques de oyamel, con comunidades vegetales densas y altas (hasta de 30 m), se distribuyen en las zonas de mayor humedad y frío, entre los 2 000 y 3 400 m de altitud. Se concentran en el Eje

Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur, donde forman masas forestales de gran tamaño, y de manera más aislada en otras serranías.

En la figura 3.6.1 se observa un bosque de coníferas ubicado en el Eje Neovolcánico Transversal.

Figura 3.6.1 Bosque de coníferas



Fuente: Imagen tomada en trabajo de campo, 2014

Los pinos se encuentran en todas las serranías del país, formando bosques de altura y densidad muy variables, pero de escasa diversidad en lo que se refiere a las especies dominantes del dosel, ya que muchos de estos bosques son monoespecíficos o bien están dominados por un reducido número de especies.

Mientras que la vegetación existente dentro de la zona de estudio se divide en varios grupos, los cuales son Bosque de *Abies Religiosa* (Oyamel), Bosque de *Abies Religiosa* (Oyamel) con pastizal, Bosque de *Abies Religiosa* con Bosque de *Cupressus Lusitánica* (cedro), Área sin vegetación, Pastizal, Bosque de *Pinus Hartwegii* (Pino), Bosque de *Pino Hartwegii* con pastizal, *Pino Pseudostrobus* con vegetación arbustiva y Vegetación arbustiva.

De acuerdo al mapa de Uso del Suelo y Vegetación, la vegetación se muestra en color verde claro haciendo referencia al bosque de oyamel, el cual se encuentra seccionado en varios polígonos, los cuales se encuentran en primer lugar en con dirección a la parte sur, uno del lado oeste y otro del lado este, las otras dos ubicaciones que tiene se encuentran en la parte media con dirección al norte, la más grande en el este, mientras que la otra en la parte central.

El bosque mixto de oyamel-cedro, se localiza en una franja que corre de sur a norte del lado oeste, siguiendo el cauce de la corriente principal de la subcuenca, se infiere que dicho bosque ha sido reforestado en al menos una ocasión, ya que el cedro no es una especie que se muestre en esta zona, es decir, no es natural, aunado a esto las alturas de dicha especie son pequeñas y medias.

El oyamel con pastizal se encuentra en una franja delgada a un costado del lado oeste del bosque mixto de oyamel-cedro, en donde se puede diferenciar porque su poligonal es de color verde amarillento.

Existe un área sin vegetación, en esta zona, la cual es la porción más al sur, y se entiende porque no tiene vegetación, ya que la altura a la que se encuentra esta área, más el tipo de suelo, el cual es rocoso, no permiten el crecimiento de vegetación salvo algunos zacatonales, principalmente.

El pastizal es otro grupo de vegetación, este se encuentra en poligonales de color amarillo, el cual se encuentra en pequeños polígonos, específicamente en la parte media de la subcuenca, existiendo dos excepciones, una en la parte suroeste y otro en la parte centro-este.

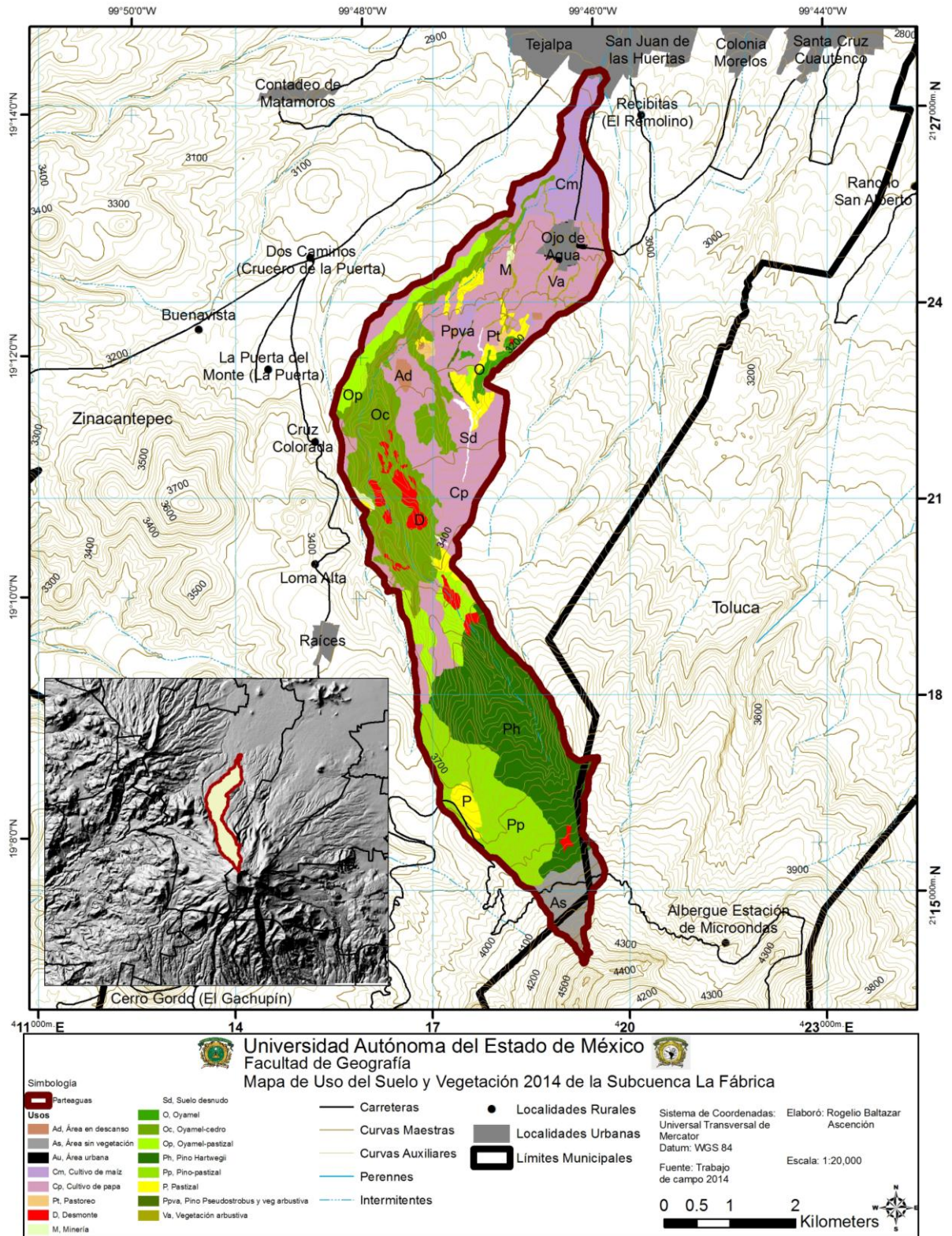
El siguiente grupo de vegetación es el bosque de pino, el cual cubre la parte sureste de la zona en una gran poligonal, y es identificable por su color verde fuerte; esta especie se encuentra en la parte más alta por el hecho que es la que se da a altas alturas.

El bosque de pino con pastizal se localiza en la parte opuesta del bosque de pino, es decir, la parte suroeste, y al igual que el pino de las alturas, el pastizal es otro tipo de vegetación que se puede dar a grandes alturas, con la diferencia que el primero es un árbol, mientras que el segundo es un pasto.

El pino pseudostrobus con vegetación arbustiva se localiza en dos pequeñas franjas en donde este pino junto a varias especies arbustivas como la *Baccharis conferta*, *Ribes affine* y *Symphoricarpos microphyllus*, son encontradas en estos lugares, más específicamente en barrancas o cárcavas en recuperación.

Finalmente el último grupo es el de la vegetación arbustiva, poligonales que se localizan en la parte norte con rumbo o dirección del poblado de Ojo de Agua, en estos lugares que pueden ser o no cauces de ríos intermitentes, barrancos o cárcavas en recuperación, se hallan las especies arbustivas ya antes mencionadas, con alguno u otro ejemplar de capulín o de aile.

Figura 3.6.2: Mapa de Uso del Suelo y Vegetación 2014 de la Subcuenca La Fábrica



En el siguiente cuadro se manejan las superficies y porcentajes que tiene cada uso del suelo y la vegetación presentes en la zona de estudio.

Cuadro 3.6.2: Superficies y porcentajes de uso del suelo y vegetación

Uso del suelo y vegetación	Superficie	Porcentaje
Área en descanso	0.141 km ²	0.6%
Área sin vegetación	0.883 km ²	3.7%
Área urbana	0.229 km ²	1%
Cultivo de maíz	1.648 km ²	6.85%
Cultivo de papa	7.036 km ²	29.26%
Desmonte	0.516 km ²	2.15%
Minería	0.097 km ²	0.40%
Oyamel	0.201 km ²	0.84%
Oyamel-cedro	3.920 km ²	16.30%
Oyamel-pastizal	1.430 km ²	5.95%
Pastizal	0.868 km ²	3.61%
Pastoreo	0.122 km ²	0.51%
Pino hartwegii	4.123 km ²	17.15%
Pino Pseudostrobus con vegetación arbustiva	0.035 km ²	0.15%
Pino-pastizal	2.542 km ²	10.6%
Suelo desnudo	0.070 km ²	0.30%
Vegetación arbustiva	0.183 km ²	0.80%

Fuente: Elaboración propia

Como ya se había comentado con anterioridad el cultivo de papa es el uso que tiene mayor superficie, siguiéndole el cultivo de maíz, pero con una gran diferencia; mientras que en cuanto a la vegetación el Pino Hartweggi es el que tiene mayor superficie, esto en parte a la altitud a la que se da y en donde ningún

cultivo es apto de esas alturas; le sigue el bosque de oyamel-cedro, el cual va a lo largo y ancho del río La Fábrica.

La minería y los suelos desnudos son los usos que menos superficie ocupan, al igual que el Pino Pseudostrobus con vegetación arbustiva y la vegetación arbustiva.

3.7 Población

Existen 13 localidades en total en las cercanías a la Subcuenca La Fábrica, en dónde solamente una se encuentra dentro de esta, siendo Ojo de Agua.

En los siguientes cuadros se enlistan las localidades, así como su población total, PEA, población derechohabiente, total de viviendas.

Cuadro 3.7.1: Características de las Localidades

Localidad	Población Total	Población Masculina	Población Femenina	PEA	PEI
Buenavista	560	293	267	184	226
Contadero de Matamoros	2082	1063	1019	660	807
Colonia Morelos	2915	1416	1499	1022	1135
Loma Alta	530	262	268	189	214
Ojo de Agua	2083	1022	1061	722	806
La Puerta del Monte	253	130	123	87	107
San Juan de las Huertas	12253	6054	6199	4596	4591
Santa Cruz Cuautenco	7460	3640	3820	2797	2807
Tejalpa	2729	1359	1370	964	958
Recibitas	602	296	306	221	228
Cruz Colorada	35	20	15	15	10
Raíces	664	331	333	216	252

Dos Caminos	27	14	13	8	9
Total del Municipio	167759	82109	85650	62919	59918

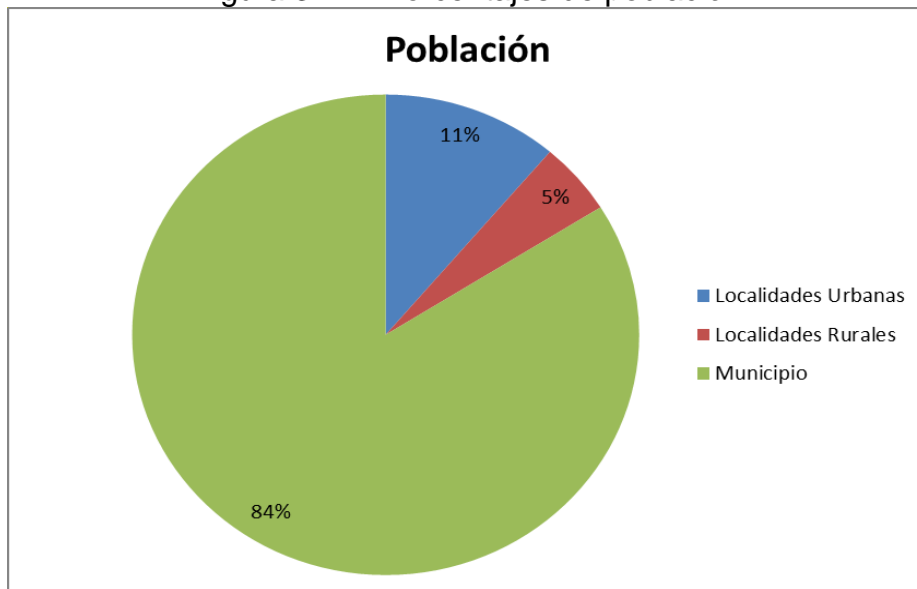
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010

Como se puede observar en el cuadro, son comunidades que en su mayoría son rurales, con algunas urbanas como lo son San Juan de las Huertas, Santa Cruz Cuautenco y Tejalpa.

Existen comunidades que no rebasan los 100 habitantes como Cruz Colorada y Dos Caminos, otras que apenas están por encima de los 500 pero debajo de los 1,000, siendo estas Buenavista, Loma Alta, La Puerta del Monte, Recibitas y Raíces. El resto de las localidades se encuentran por encima de los 2,000 habitantes, estando Contadero de Matamoros como la más baja en ese grupo y San Juan de las Huertas en más población, superando los 12,000 pobladores.

En la siguiente figura se muestra cual es el porcentaje que tienen de población tanto las localidades urbanas como rurales en comparación con la que tiene el su totalidad el Municipio de Zinacantepec.

Figura 3.7.1: Porcentajes de población



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010

La suma de la población total de las localidades urbanas corresponde a 22,436 habitantes, equivalente al 11% del total municipal. Las comunidades que fueron tomadas como urbanas fueron tres que son San Juan de las Huertas, Santa Cruz Cuautenco y Tejalpa.

Mientras que las localidades rurales fueron las demás y cubren solamente el 5% equivalente a 9,751 habitantes, mientras que el municipio tiene una totalidad de 167,759 pobladores.

En términos generales las poblaciones tanto urbanas como rurales no ocupan ni la quinta parte de población de municipio de Zinacantepec, solo es el 16%.

Su población económicamente activa (PEA) es baja a comparación de su población total, en donde en algunos casos es solo un tercio, en otros por encima de la mitad, pero en ninguna de las comunidades se iguala a su población total.

Todo lo contrario sucede con la población económicamente inactiva, la cual es mayor al de la PEA en la mayoría de los casos teniendo como excepciones a Cruz Colorada y Dos Caminos.

Cuadro 3.7.2: Características de las Localidades II

Localidad	Población Sin Derechohabiencia	Población Derechohabiente	Total de Viviendas	Total de Viviendas Habitadas	Total de Viviendas Particulares
Buenvista	143	416	132	123	132
Contadero de Matamoros	602	1477	494	458	494
Colonia Morelos	709	2157	743	653	731
Loma Alta	90	440	139	121	139
Ojo de Agua	902	1170	560	501	559
La Puerta del Monte	65	186	70	67	70
San Juan de	3507	8681	2898	2635	2889

las Huertas					
Santa Cruz Cautenco	2682	4752	1815	1613	1808
Tejalpa	1085	1632	625	556	621
Recibitas	218	379	159	138	158
Cruz Colorada	2	31	7	7	7
Raíces	152	508	150	142	149
Dos Caminos	25	2	7	5	7
Total del Municipio	55604	110450	45218	37665	44762

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010

En el cuadro se muestra la población derechohabiente, la no derechohabiente, el total de viviendas, habitadas y particulares, todo esto para saber qué tan protegida se encuentra la población en cuestiones médicas, así como su disponibilidad de vivienda.

3.8 Clima

Dentro de la subcuenca existen tres tipos de clima, los cuáles de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1988) son semifrío, templado y frío.

El clima semifrío CEwg es el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con un cociente de precipitación entre temperatura es de >55, porcentaje de lluvia invernal <5 de la anual, temperatura del mes más caliente entre 6.5 y 22° (García, 1988), ubicándose en la mayoría de la subcuenca.

Este tipo de clima se da arriba de los 2,500 msnm, y al igual que el clima templado cuenta con similitud de vegetación.

El clima templado Cwbg, se caracteriza porque la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C y la del mes más cálido es superior a

10 °C. Las precipitaciones exceden a la evaporación, y que presenta precipitaciones de entre 500 mm y 1.000 mm. El invierno es seco por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más bajas. La estación más lluviosa no tiene por qué ser el verano. El verano es suave pues no se alcanzan los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C a los menos cuatro meses al año. Localizándose en un pequeño manchón en la parte norte o más baja de la subcuenca.

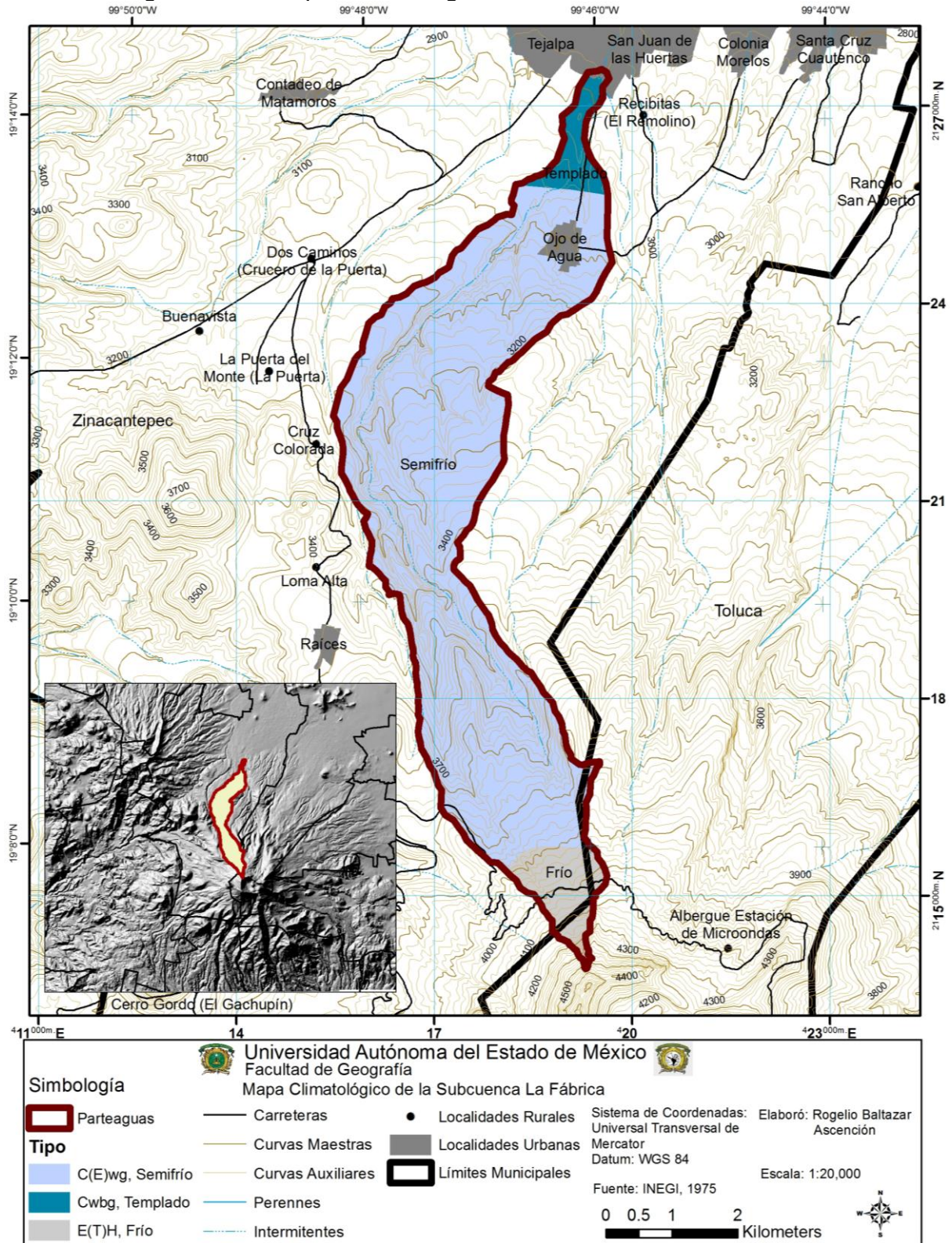
Presenta influencias tropicales conocidas como las lluvias de verano y las polares que no son más que las lluvias de invierno. En esta los veranos son cálidos, presentando un 22°C de promedio y los inviernos moderados, aunque éstos suelen tener bruscas alteraciones frías procedentes del sur.

El tipo de vegetación de este tipo de clima es esencialmente los bosques de coníferas, bosques de pino, bosques de abeto u oyamel, bosques de ayarín, bosques de cedro y táscate, bosques de encino y bosques mixtos de pino y encino.

El tercer y último clima es el frío E(T)H, el cual se caracteriza porque la temperatura media del mes más cálido es inferior a 10 °C. La vegetación suele ser escasa o nula. La temperatura media del mes más cálido está entre 0 °C y 10 °C. La vegetación es únicamente de hierbas en estos meses donde se superan los 0 °C. La humedad relativa en el aire es muy baja y el viento suele ser bastante intenso, lo que hace aún más hostiles las condiciones de vida en este clima. Son climas condicionados por la altura, superior a 3500 msnm y que pueden encuadrarse en las clasificaciones anteriores ya que suponen la modificación del clima local originada por la altitud. Se encuentra en la parte más alta o la parte sur de la subcuenca.

Su tipo de vegetación son principalmente pastos, áreas de zacatonales, sin presencia de vegetación arbórea por cuestiones de altitud.

Figura 3.8.1: Mapa Climatológico de la Subcuenca La Fábrica



En el siguiente cuadro se integran las superficies y porcentajes de cada clima presentes en la subcuenca.

Cuadro 3.8.1: Superficies y porcentajes de climas

Clima	Superficie	Porcentaje
Semifrío	20,508 km ²	89.60%
Templado	0.906 km ²	3.96 %
Frío	1,498 km ²	6.54 %

Fuente: Elaboración propia

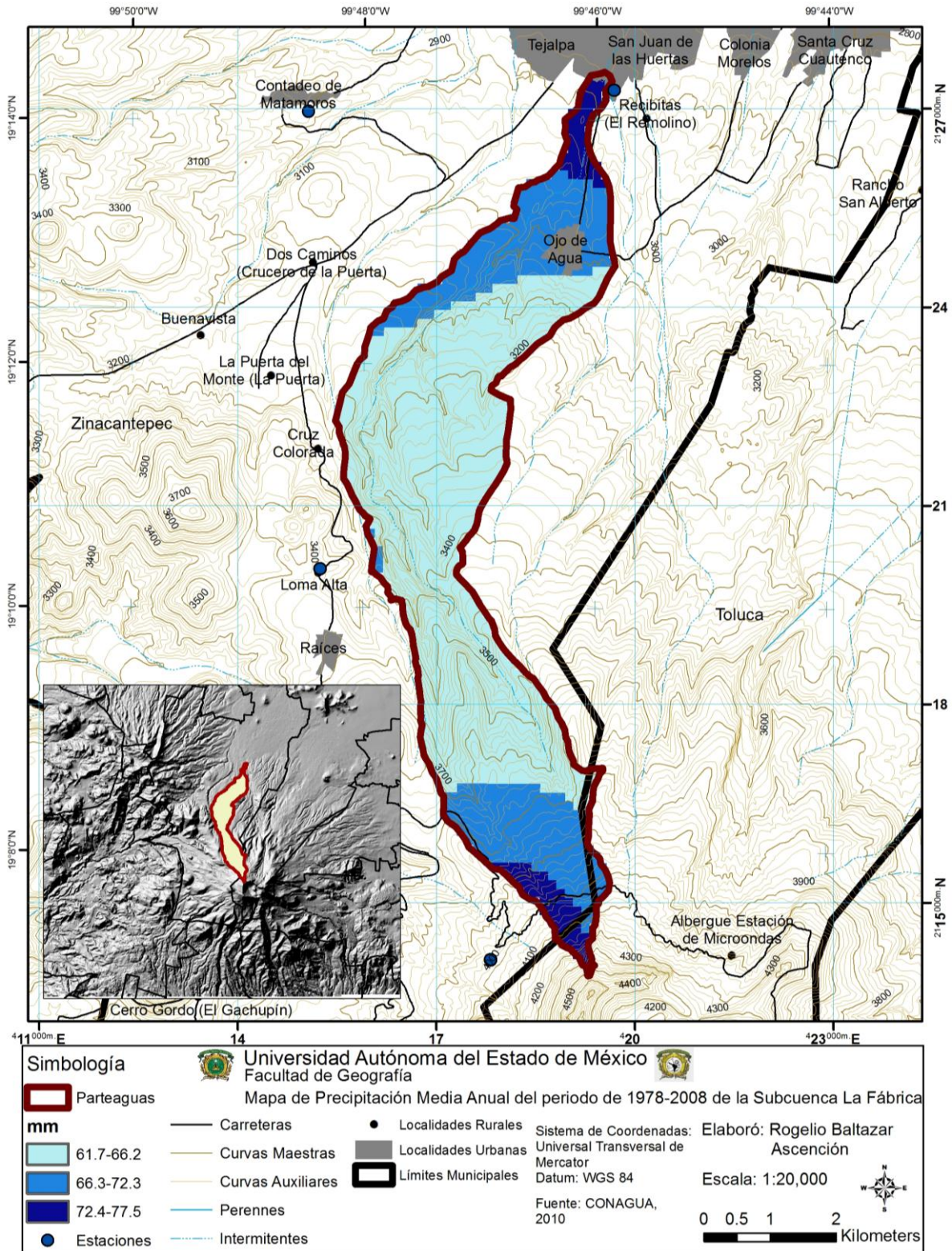
La figura muestra la precipitación media anual que existió en la subcuenca durante el periodo 1978-2008, en donde es una zona lluviosa, sobre todo en las partes norte y sur, ya que durante el periodo las precipitaciones rebasaron los 70 mm, principalmente en las partes norte y sur de la subcuenca.

Se tomaron en cuenta los datos de 13 estaciones meteorológicas aledañas a la zona, las cuales fueron Nevado de Toluca, San Francisco Tlalcalalcalpan, Santa María del Monte, Toluca (DGE), Palo Mancornado, Loma Alta, San Francisco Putla, El Molino E-16, Agua Bendita, San José del Contadero, Cajones E-26, La Comunidad D-8 y San Juan de las Huertas.

Mientras que en la parte cercana al cráter del volcán tuvo precipitaciones de entre los 66 mm hasta por encima de los 77 mm, es decir durante los meses más lluviosos que ocupan el periodo de mayo a octubre, precipita en demasía haciendo que las corrientes intermitentes se activen y sobretodo en las primeras lluvias hagan el mayor daño en cuestiones de erosión hídrica. Mientras que los meses donde la precipitación es escasa es en el periodo de noviembre a abril.

La parte central de la subcuenca es en donde los mm de precipitación anual son bajos a comparación de la parte sur y norte, pero aun así es lluviosa, ya que tiene un promedio de 61 a 66 mm. La parte intermedia entre la parte central y los extremos de la zona de estudio, cuenta con valores de 66 a 72.

Figura 3.8.2: Mapa de Precipitación Media Anual del periodo 1978-2008 de la Subcuenca La Fábrica



En cuanto a la temperatura media anual del periodo 1978-2008 presente en la zona de estudio, la siguiente figura muestra a la subcuenca dividida en tres valores diferentes, en los cuales sus temperaturas son de muy bajas a medias y ninguno de los grupos rebasa los 13°C, esto quiere decir que es una zona fría, sobre todo durante las mañanas y las noches, ya que en el día pueden llegar a elevarse arriba de los 15° principalmente en los meses de marzo-junio.

Se tomaron en cuenta los datos de 13 estaciones meteorológicas aledañas a la zona, las cuales fueron Nevado de Toluca, San Francisco Tlalcilalcalpan, Santa María del Monte, Toluca (DGE), Palo Mancornado, Loma Alta, San Francisco Putla, El Molino E-16, Agua Bendita, San José del Contadero, Cajones E-26, La Comunidad D-8 y San Juan de las Huertas.

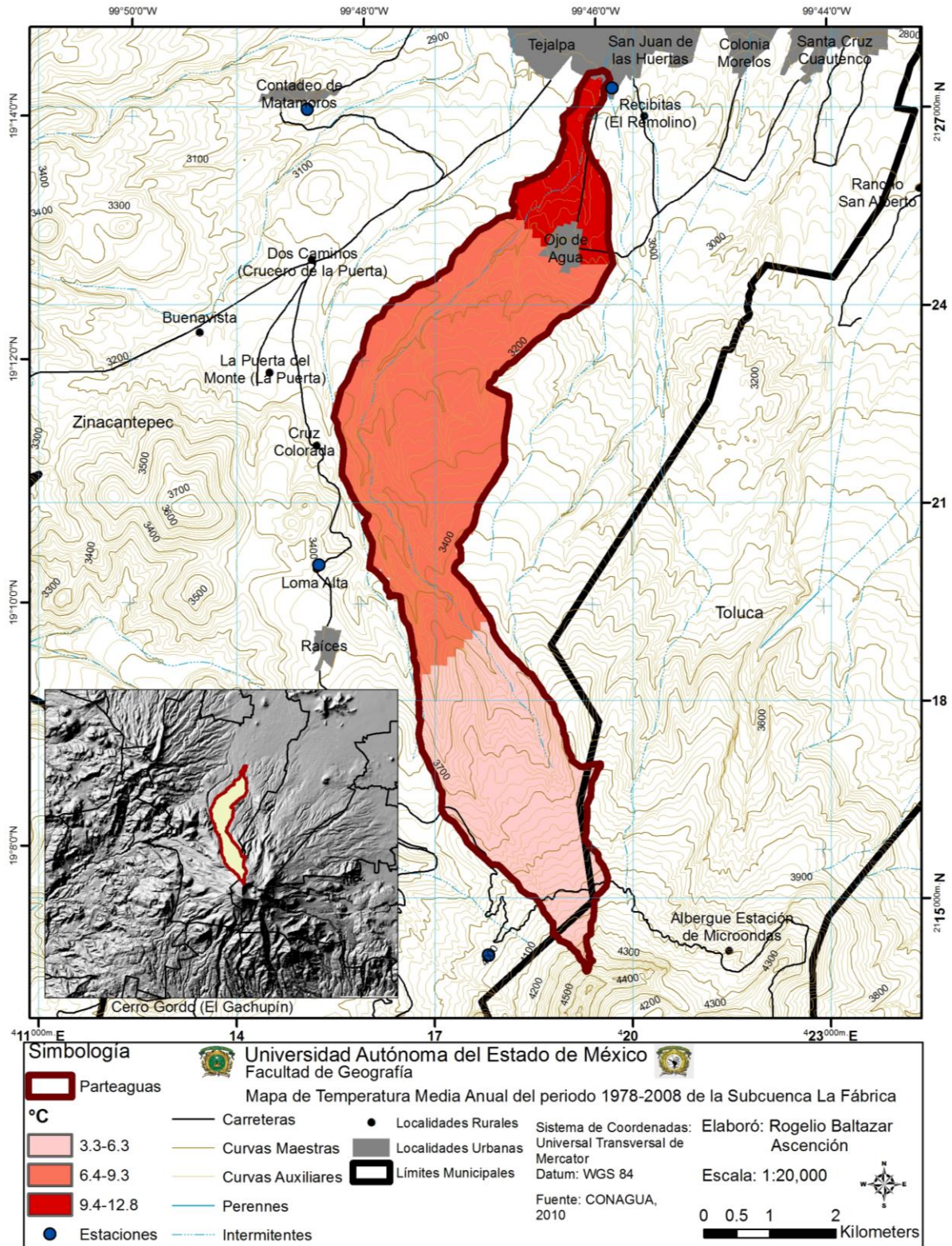
La zona con las temperaturas más bajas en la sur, ya que esta no rebasa los 6.5°C y se mantiene apenas en los 3.3°C, no es extraño esto puesto que es el área cercana al cráter del volcán y se encuentra a una altitud por encima de los 3,800 msnm.

La siguiente parte de la subcuenca con dirección norte, es la de mayor superficie y cuenta con temperaturas de 6.4 a 9.3°C, se mantiene el frío, puesto que apenas y se llega a los 9°C, pero ya no está a 3°C, estas temperaturas se localizan por encima de los 3,000 msnm.

El grupo restante se localiza en la parte norte y tiene las temperaturas más cálidas de 9.4 a 12.8°C, encontrándose con una altitud por debajo de los 3,000 msnm.

Tal vez el último grupo de temperaturas puedan considerarse como cálidas, pero no es así, ya que en la subcuenca se presentan vientos muy fuertes haciendo que la temperatura se sienta más baja de lo que es, esto debido a la sensación térmica que provocan los vientos fríos.

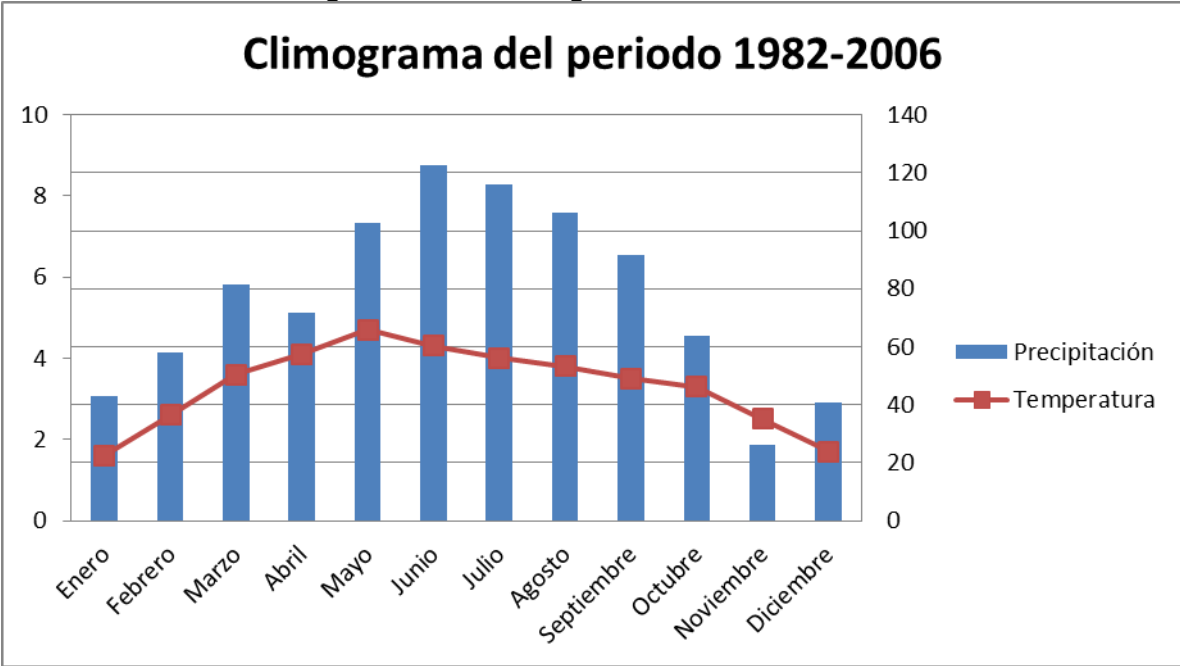
Figura 3.8.3: Mapa de Temperatura Media Anual del periodo 1978-2008 de la Subcuenca La Fábrica



De acuerdo a la precipitación y temperatura, existen diversas estaciones meteorológicas y climáticas de CONAGUA, en donde cuatro son las que se encuentran dentro o en los límites de la subcuenca, las cuales son 15062 Nevado de Toluca, 15229 Loma Alta, 15276 San José del Contadero, 15293 San Juan de las Huertas.

Para saber cuál es la precipitación y temperatura media mensual en la zona, se muestran las siguientes climogramas, tomando solamente en cuenta los últimos 12 años de registro con las que cuenta cada una de las estaciones.

Figura 3.8.4: Climograma estación 15062



Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA, 2010

Como se observa en el climograma de la estación 15062, prácticamente en los 12 meses del año precipita con abundancia, teniendo como el mes “seco” a noviembre con un promedio de 25.9 mm, mientras que el mes más lluvioso es junio con 122.7 mm.

A pesar de que los 12 meses son lluviosos de acuerdo a los datos de esta estación, se puede observar que en el periodo de lluvias contemplado de la zona

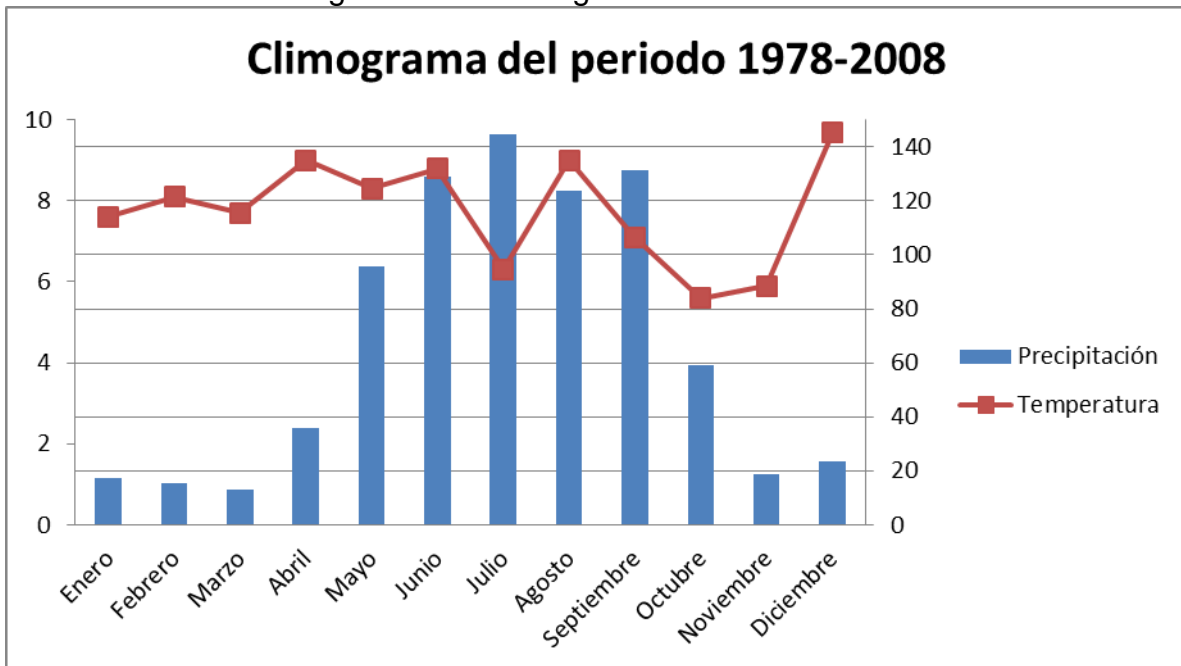
(mayo-octubre) es cuando más precipita, elevándose en mayo y descendiendo en octubre; mientras que los meses restantes, sus precipitaciones muestran una alza pero de menor jerarquía (noviembre-marzo), teniendo a abril como el descenso marcado entre los dos periodos ya mencionados.

En lo que corresponde a la temperatura, el rango que tienen los 12 meses es de 1.5°C a 5°C, es decir, en general son temperaturas frías, en donde no se rebasan los 6°C, principalmente por la localización de la estación.

Los meses de abril a julio presentan en promedio las temperaturas más altas, es decir por encima de los 4°C, todo lo contrario de noviembre a febrero, con un rango de 1.5°C a 2.5°C.

Con relación a los datos del climograma de la estación del Nevado de Toluca y el mapa de clima, se denota que la zona de estudio en su parte más alta cuenta con lluvias intensas y temperaturas bajas, siendo un clima frío y por consecuencia que sea un área lluviosa.

Figura 3.8.5: Climograma estación 15229



Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA, 2010

La estación de Loma Alta muestra dos claros grupos de precipitaciones, en el primero (noviembre-abril) son bajos los niveles de precipitación, teniendo un rango de 15 a 35 mm; mientras que el segundo grupo (temporada de lluvias) su rango es de 59 a 145 mm.

Marzo es el mes con menos cantidad de precipitación con tan solo 13.1 mm, mientras que julio es el más abundante con 144.6 mm.

Las precipitaciones descendieron a comparación de los datos de la estación Nevado de Toluca, pero es por la simple razón de la localización que tiene cada una de las estaciones, ya que por consecuencia no van a registrar los mismos datos.

En lo que respecta a la temperatura, tienen un rango general de 5.6°C a 9.7°C, y que a su vez se comporta de una manera lineal, teniendo dos descensos, el primero en el mes de julio con 6.3°C y el segundo en el periodo de septiembre-octubre (7.1°C-5.6°C), volviendo a la alza en el mes de noviembre.

Lo más interesante es que la temperatura más alta en promedio se registró en el mes de diciembre, algo atípico debido a que es un mes en el que se da fin al otoño y comienzo al invierno, pero en general, la temporada invernal registrada en esta estación fue relativamente cálida en el periodo tomado.

En lo que corresponde a la estación de San José el Contadero, muestra una semejanza en cuestión de precipitación con la estación de Loma Alta, mientras que con la estación Nevado de Toluca su similitud es en la temperatura.

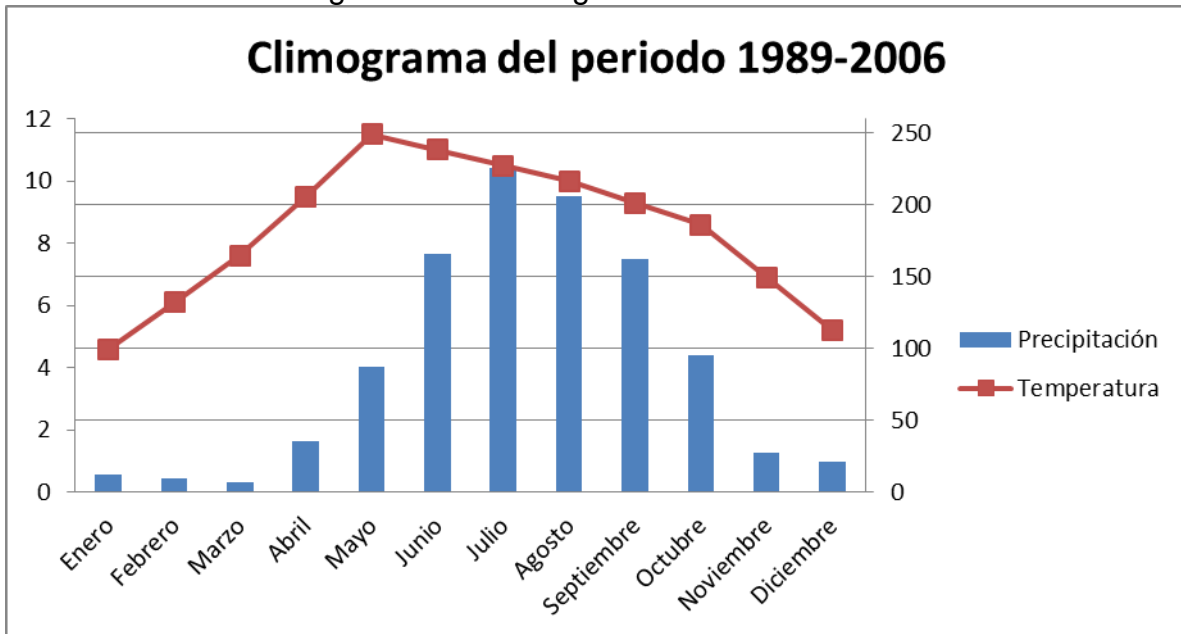
Se dice que muestra cierta semejanza en la precipitación con la estación anterior debido a que se distinguen dos periodos de abundancia o escases de lluvia, en donde el primer grupo lo integran los meses de noviembre a abril con un rango de 6.4 a 35.3 mm; mientras que el segundo grupo es la temporada de lluvias con valores de 87.4 a 226.1 mm.

Marzo es el mes con menos precipitación teniendo 6.4 mm, mientras que julio es el más lluvioso con 226.1 mm.

En esta estación es en donde se encuentran de acuerdo a los datos las lluvias con mayor volumen de mililitros en comparación con las otras tres tomadas en cuenta.

En lo correspondiente a temperatura se tiene que del mes de enero a mayo una alza de temperatura que va de 4.6°C a 11.5°C, en donde después comienza un descenso que termina hasta el mes de diciembre.

Figura 3.8.6: Climograma estación 15276



Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA, 2010

Mientras que la estación de San Juan de las Huertas muestra al igual que las dos estaciones anteriores dos grupos de precipitación, uno escaso y otro abundante; en el primero están los meses de noviembre a abril con un rango de 9.4 a 36.7 mm, mientras que el segundo es de mayo a octubre o temporada de lluvias en la zona con valores de 52.7 a 186.8 mm.

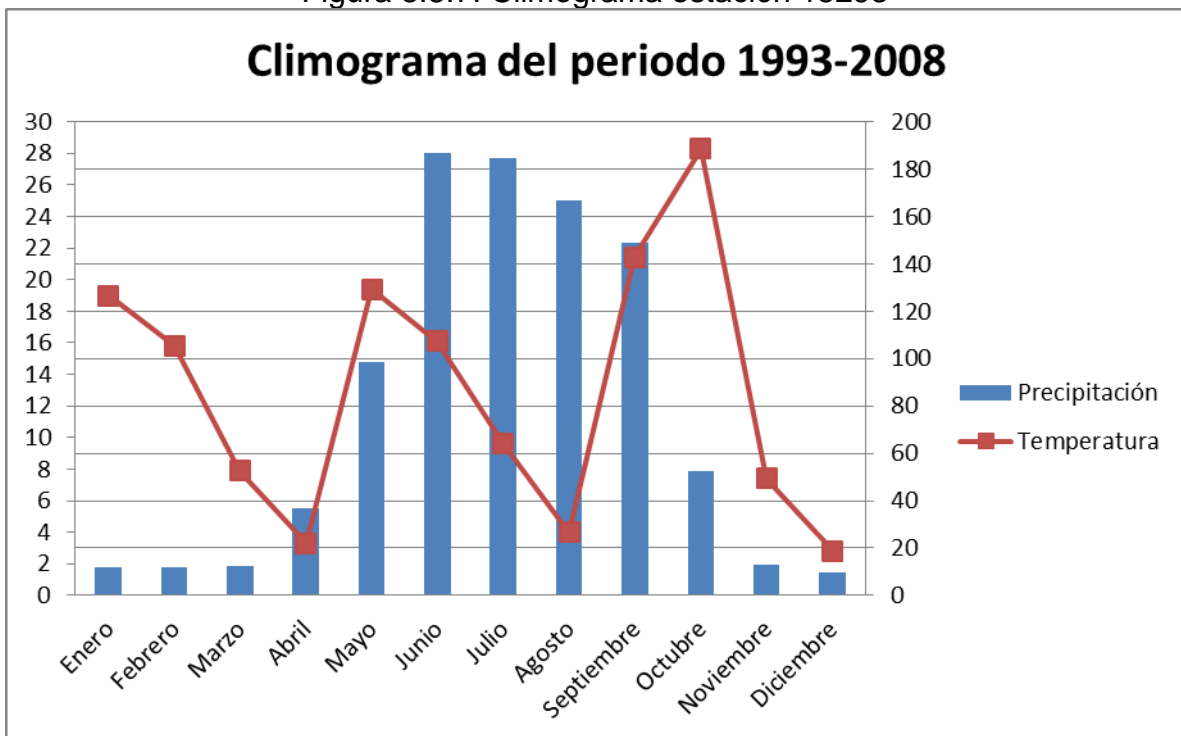
El mes con menor precipitación es diciembre con 9.4 mm, mientras que junio es el más abundante con 186.8 mm.

En la temperatura se observan tres descensos y dos alzas, en donde los descensos se dan en el siguiente orden, de enero a abril, mayo a agosto y de octubre a diciembre; mientras que las alzas se dan en abril a mayo y de agosto a octubre.

Los meses con menos temperatura son abril, agosto y diciembre con 3.3°C, 7.4°C y 2.8°C, respectivamente; septiembre y octubre tienen las temperaturas más altas con 21.4°C y 28.3°C.

Esta es la zona de las cuatro que registra temperaturas más altas, ya que las otras estaciones son de temperaturas frías a medias.

Figura 3.8.7: Climograma estación 15293



Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA, 2010

Después de analizar la precipitación que existe en la zona de estudio y alrededores a través de los promedios mensuales, es obvio que la precipitación es alta e incluso en algunos años es demasiado alta, por lo cual es factor determinante para que puedan existir procesos erosivos en la subcuenca La

Fábrica, y más específicamente la erosión hídrica, sobre todo en la temporada de lluvias.

La zona de estudio se encuentra en un área que es muy lluviosa en gran parte por la presencia del Volcán Nevado de Toluca, el cual con su altitud que tiene hace que precipite más de normal, afectando de manera directa a la Subcuenca La Fábrica.

Esto hace que si de por sí ya existen demasiadas corrientes intermitentes, las precipitaciones tan abundantes o intensas hacen que dichas corrientes se vuelvan demasiado erosivas, ocasionando que el problema de formación de cárcavas siga creciendo pero de una manera más rápida e intensa.

De acuerdo a los datos de CONAGUA (2010), los meses comprendidos para las lluvias en la zona son de mayo a octubre, con algunas lluvias extraordinarias en marzo y en noviembre, pero cabe aclarar que no todo este periodo es susceptible la zona al proceso de erosión hídrica por cárcavas, el periodo puede dividirse en dos, el cual decidió dividirse después de ir a valorar las cárcavas en los dos momentos ya mencionados con anterioridad.

El primer momento comprende la erosión de los taludes de las cárcavas y ocurre cuando se comienzan las primeras precipitaciones (mayo y junio), esto sucede debido a que los suelos en los que se localizan dichas formaciones son suelos muy porosos, que no se encuentran compactados y que son muy susceptibles a ser acarreados con el agua.

En el momento en que comienza a precipitar, el material que conforma las taludes (ceniza, pómez y suelo), todos con características similares, se va diluyendo en el agua, provocando que comience a quebrarse, hasta dar como resultado el ensanchamiento de la cárcava.

El segundo momento está dividido a lo largo del periodo de lluvias (julio-octubre), el cual provoca el alargamiento de la cárcava, así como la socavación haciendola más profunda, conforma van pasando las precipitaciones.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El capítulo IV está enfocado a los resultados del trabajo de investigación, en donde lo primero son las causas que provocan la formación de cárcavas por erosión hídrica, es decir, todos los factores que intervienen así como su relación que tienen cada uno de ellos; de igual manera se tiene el cambio de uso del suelo como la principal causa, la cual se analiza a detalle.

Posteriormente se observarán las medidas que se obtuvieron de las cárcavas en los dos diferentes periodos de tiempo contemplados, para conocer qué tan activas o inactivas se encuentran y en el caso de encontrarse activas, cuál es su crecimiento en determinado periodo de tiempo, al igual saber si se están recuperando.

Las zonas susceptibles a erosión hídrica se enmarcan a continuación de las medidas, cuyo objetivo fue saber que tan erosionable es la subcuenca y si corresponden los sitios donde se ubican las cárcavas con los sitios altamente erosionables.

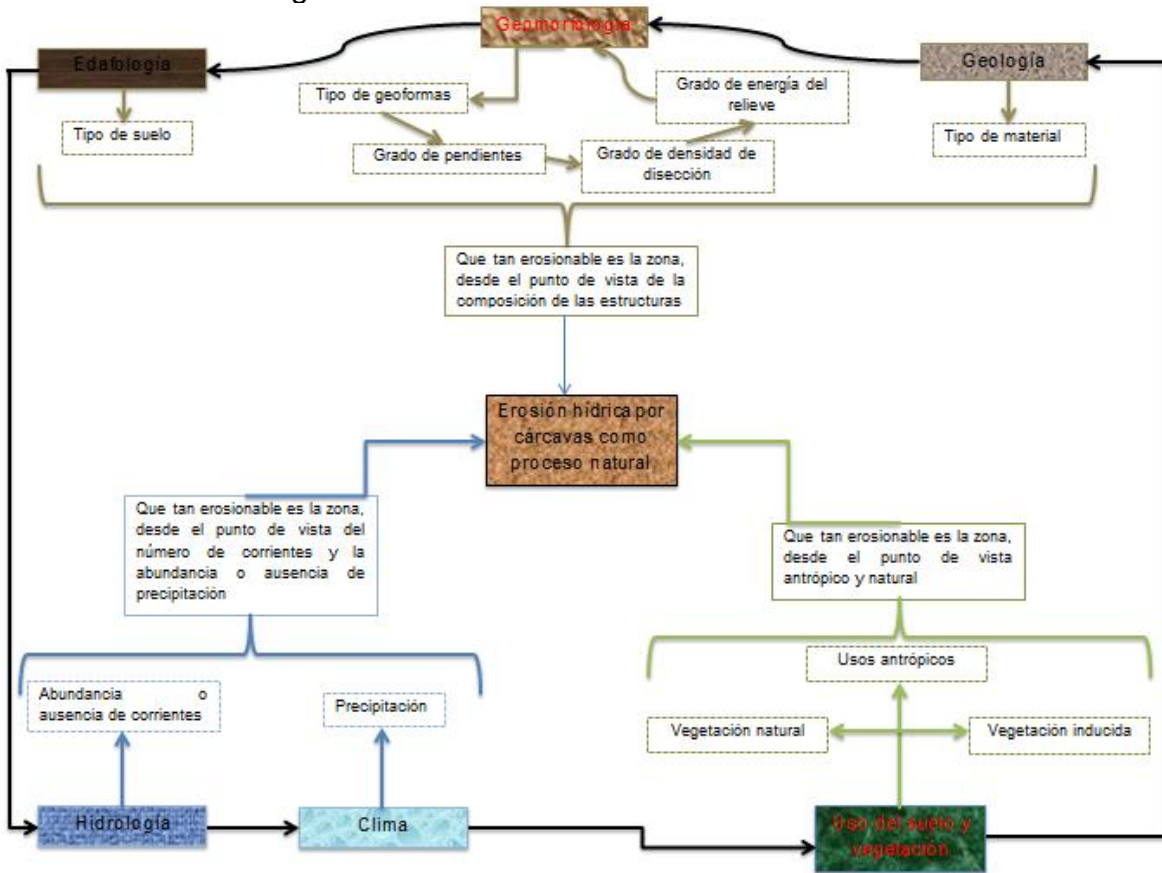
Finalmente se tienen las propuestas para el control y/o reducción de las cárcavas, las cuales serán con base en los resultados obtenidos de la investigación, con el fin de que se lleven a cabo y no solamente hacerlas por hacerlas; dichas propuestas se realizarán en dos etapas, la primera es la de controlar el crecimiento y la segunda la de reducirlas.

4.1 Causas de la erosión hídrica por cárcavas

En este apartado se analizan las causas para que suceda el proceso de erosión hídrica para la formación de cárcavas, es decir se explican los factores que intervienen, así como la relación que tienen entre sí.

Como ya se mencionó el proceso de la formación de cárcavas es de origen natural, y siguiendo esa línea se realizó el siguiente esquema que señala los factores, interrelaciones, así como el orden que se tendría que tener para que el proceso sea natural.

Figura 4.1.1: Proceso Natural de una Cárcava



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.1.1 se observan los factores que producen la formación de cárcavas, los cuales se estructuraron de forma en la cual se vean las relaciones que tienen, comienzan en grupos y se dividen en tres, divisiones que se dieron a partir de las características claves para el proceso que se está estudiando. Dichas características hacen que se conjunten los factores dando como resultado que tan erosionable es la zona dependiendo del grupo de factores en que se encuentre, es decir, cada división aporta un grado de erosionabilidad debido a que el factor desencadenante en esta esquema es la hidrología, pero cada grupo tiene el porqué de su razón.

En primer lugar se tiene a la geología, geomorfología y edafología, las cuales engloban la primera división, en donde se tomó con base en el siguiente

racionamiento, la primera capa de adentro hacia afuera es la geología, que se conforma por distintos tipos de materiales, ya sean rocas o materiales volcánicos, como es el caso de la zona de estudio; le sigue la geomorfología, cuya formación es con base en a procesos exógenos y endógenos en el tipo de material donde se encuentran, tendrán esa composición, y que engloba todo este factor a las unidades geomorfológicas, siendo la ladera la principal forma donde comienzan los ríos intermitentes, motivo por el cual el agua baja por las moderadas a abruptas pendientes hasta el piedemonte, y es ahí donde las cárcavas crecen y se asientan, las pendientes juegan su papel, ya que si bien la gran parte de la zona cuenta con pendientes de 0° a 6°, donde empieza la cárcava o en el cabeceo de esta se encuentran de 6° a 45°, haciendo que el proceso de erosión hídrica comience en esas áreas, densidad de disección y energía del relieve; finalmente se tiene la edafología, que se forma a partir de los materiales geológicos existentes. Los suelos que se encuentran en la subcuenca son porosos como es el caso del Feozem háplico, someros como el Leptosol y el Regosol eútrico, y suelos con alto contenido de materia orgánica como son los Andosoles, siendo estos últimos los menos propensos a la erosión hídrica.

La forma en que se planteó que tan erosionable es la zona desde el punto de vista del primer grupo, es con base en el tipo de material, geoformas existentes, grados de pendientes y tipos de suelos existentes en la subcuenca.

El segundo grupo lo estructuran la hidrología y el clima, en donde sus características fueron la abundancia o ausencia de corrientes y la precipitación, puesto que dependiendo del número de cauces y el tipo de clima, si es lluvioso o seco, se sabrá que tan erosionable es la subcuenca con base en este grupo.

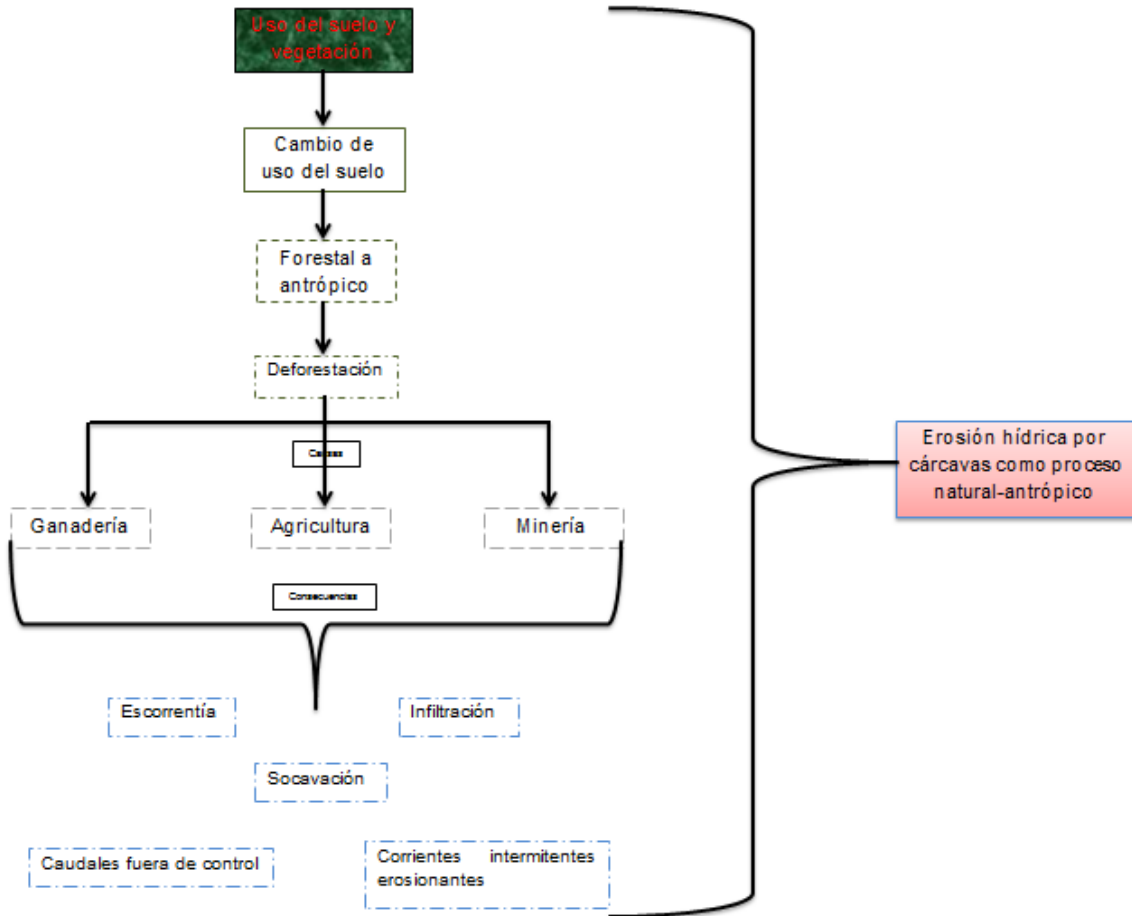
El tercer grupo lo conforma el uso del suelo y vegetación, cuyas características fueron los usos antrópicos, vegetación natural y vegetación inducida, ya que con las actividades humanas y la vegetación natural e inducida se conoce lo erosionable que es la subcuenca.

Finalmente se tiene el resultado de la figura que es el de erosión hídrica por cárcavas como proceso natural, en donde para llegar a esto se estructuraron los factores, se enlistaron sus características principales, se dividieron en grupos para con base en eso se diera que tan erosionable es la zona para cada grupo, es decir, todos los factores tienen un papel que cumplir para que se dé el proceso, ya que no se daría dicho proceso si faltara alguno o varios de los factores.

Pero para que el proceso natural de formación de cárcavas por erosión hídrica se salga de control y pase a ser un proceso antropizado, uno de los factores debe de ser alterado, específicamente el de uso del suelo y vegetación, ya que aquí es donde el hombre altera el proceso en el momento en que abre terrenos para el cultivo, lo cual desencadena en que el proceso visto como un sistema se altere por completo.

En la siguiente figura se muestra como se altera el proceso con base en el uso del suelo y vegetación.

Figura 4.1.2: Proceso Antrópico de una Cárcava



Fuente: Elaboración propia

La figura ejemplifica que es lo que sucede una vez que el hombre decide cultivar, cuyo primer paso es abrir terrenos para el cultivo, en otras palabras comienza la deforestación, momento clave ya que la vegetación entre una de sus múltiples funciones, hace que se fije el suelo, lo cual evita que el caudal crezca y se salga de control, al mismo tiempo al desaparecer la vegetación se permite que el agua se infiltre dando como resultado que se socave el terreno; y/o escurra, haciendo que las pendientes mayores a los 15° sean más erosionantes. Es aquí en donde el proceso deja de ser natural y pasa a ser natural-antrópico.

4.1.1 Cambio de Uso del Suelo y Vegetación

Esta es la causa más significativa que existe para la formación de cárcavas por erosión hídrica, esto debido a que son tierras ejidales la zona de estudio, al momento de la repartición de las tierras, la Ley mencionaba que si no se trabaja la tierra antes de un año de haber sido repartida, el gobierno tenía la facultad de quitar las tierras repartidas, es por ese motivo que para poder trabajar las tierras se tenían que deforestar hectáreas tras hectáreas de bosques, lo que propició que el equilibrio de la cuenca se viera mermado, es en ese punto donde la formación de las cárcavas tuvo su inicio.

La deforestación solamente se realizó debajo de los 3,700 msnm, ya que después de esa altitud es muy difícil que se pueda dar un cultivo, es por eso que en la parte más alta se localiza vegetación nativa de la zona, es decir Pino Hartwegii.

Las tierras se comenzaron a trabajar con cultivo de papa principalmente, ya que este cultivo en primer lugar resiste condiciones ambientales como las que se encuentran en la Subcuenca La Fábrica y en segundo lugar, porque el tipo de suelo existente es idóneo para su crecimiento. Existe cultivo de maíz pero en menor porcentaje, y se localiza por debajo de los 3,000 msnm, principalmente.

Esta actividad genera beneficios económicos pero ocasiona problemas en el terreno, es decir, provoca que el proceso de erosión hídrica se acelere, y es más cuando se encuentra sobre pendientes que dan directo hacia los cauces de los ríos, esto porque los agricultores realizan los surcos de manera perpendicular al cauce, lo cual es lo que dinamita la erosión y hace que las cárcavas ya existentes aumenten su dimensión de forma longitudinal y transversalmente.

Esto se ejemplifica con las siguientes figuras, en donde la primera muestra cómo deberían de ser los surcos del cultivo de papa para que sea menos propenso a la erosión, es decir, el surco debería ser en dirección a la curva de nivel.

Figura 4.1.1.1: Surcos en cota del cultivo de papa



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, 2010

Mientras que la figura 4.1.1.2 muestra cómo se encuentran los surcos en el cultivo de papa en la zona de estudio, es decir en dirección a la pendiente, propiciando que el proceso de formación y crecimiento de cárcavas se acelere.

Figura 4.1.1.2: Surcos erosivos del cultivo de papa



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, 2010

El mapa de Cambio de Uso del Suelo, muestra en contorno rojo las áreas que tuvieron cambio, mientras que en color café están las áreas que no tuvieron cambio de uso.

Las áreas que tuvieron cambios se localizan principalmente en la parte norte, con algunos polígonos pequeños con dirección al sur, los cuales se van separando y desapareciendo conforme se dirigen hacia la zona sur de la subcuenca.

Las zonas con cambio, se subdividieron en si aumentó el uso o disminuyó, en donde las áreas que tuvieron un aumento en su superficie dentro de la subcuenca fueron el cultivo de papa, el bosque de oyamel, bosque mixto de oyamel-cedro, bosque mixto de oyamel-pastizal, el bosque de pino hartwegii y el bosque mixto de pino hartwegii-pastizal.

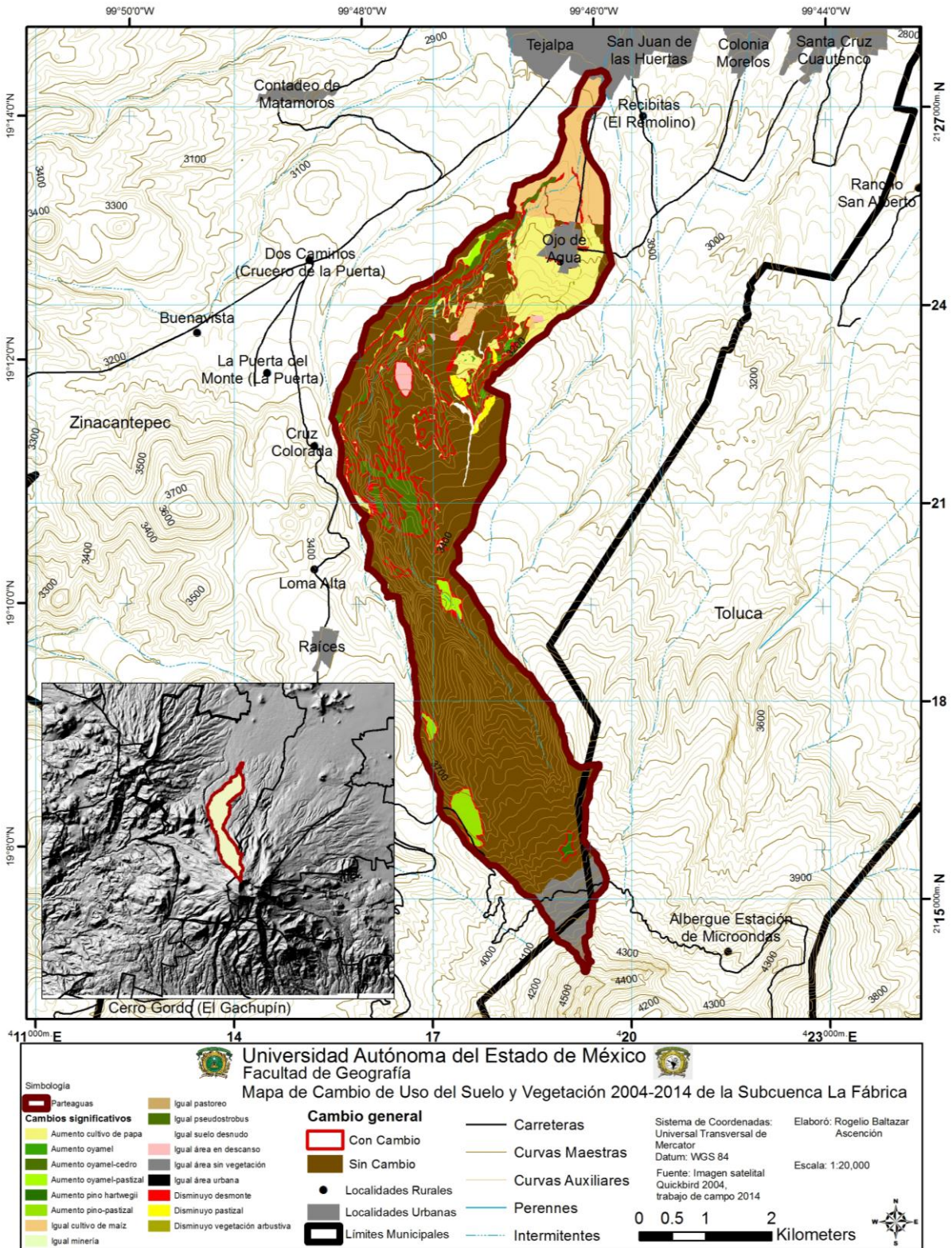
El aumento de los tipos de vegetación es benéfico para lo correspondiente a la recuperación de las cárcavas, ya que controlan las corrientes y evitan que erosionen o por lo menos limitan su poder erosivo.

En lo que corresponde a los usos que disminuyeron su superficie, solamente se tuvieron tres, los cuales fueron el desmonte, pastizal y la vegetación arbustiva.

De la misma manera que es benéfico que los tipos de vegetación hayan aumentado su superficie, la disminución del desmonte es su similar, ya que se detiene la deforestación y evita que el suelo se encuentre desprotegido.

Mientras que las partes que no muestran cambio se localizan en la gran mayoría de la subcuenca, siendo la parte media hacia el sur donde está completa sin áreas con cambios, y conforme se dirige hacia el norte va teniendo áreas de partes con cambios. Las zonas sin cambio, se clasificaron como las que se mantuvieron igual o fue mínimo su cambio, en donde son ocho y son las áreas en descanso, áreas sin vegetación aparente, área urbana, cultivo de maíz, la minería, pastoreo, el pino pseudostrobus con vegetación arbustiva y el suelo desnudo.

Figura 4.1.1.4: Mapa de Cambio de Uso del Suelo 2004-2014 de la Subcuenca La Fábrica



De una manera desglosada, en el cuadro 4.1.1.3 se muestran los diferentes usos de suelo que hubo en el año 2004 y los que hay en el año 2014, mostrando superficies y porcentajes en ambos años.

Cuadro 4.1.1.3: Superficies y porcentajes de uso del suelo del 2004 y 2014

2004			2014		
Uso	Sup (km ²)	Por (%)	Uso	Sup (km ²)	Por (%)
Área en descanso	0.148 km ²	0.62%	Área en descanso	0.141 km ²	0.6%
Área sin vegetación	0.883 km ²	3.71%	Área sin vegetación	0.883 km ²	3.7%
Área urbana	0.202 km ²	0.85%	Área urbana	0.229 km ²	1%
Cultivo de maíz	1.609 km ²	6.75%	Cultivo de maíz	1.648 km ²	6.85%
Cultivo de papa	6.748 km ²	28.33%	Cultivo de papa	7.036 km ²	29.26%
Desmonte	0.772 km ²	3.24%	Desmonte	0.516 km ²	2.15%
Minería	0.061 km ²	0.26%	Minería	0.097 km ²	0.40%
Oyamel	0.188 km ²	0.79%	Oyamel	0.201 km ²	0.84%
Oyamel-cedro	3.622 km ²	15.21%	Oyamel-cedro	3.920 km ²	16.30%
Oyamel-pastizal	1.399 km ²	5.9%	Oyamel-pastizal	1.430 km ²	5.95%
Pastizal	1.339 km ²	5.62%	Pastizal	0.868 km ²	3.61%
Pastoreo	0.150 km ²	0.63%	Pastoreo	0.122 km ²	0.51%
Pino hartwegii	4.087 km ²	17.16%	Pino hartwegii	4.123 km ²	17.15%
Pino Pseudostrobus con vegetación arbustiva	0.021 km ²	0.09%	Pino Pseudostrobus con vegetación arbustiva	0.035 km ²	0.15%
Pino-pastizal	2.319 km ²	9.74%	Pino-pastizal	2.542 km ²	10.6%
Suelo desnudo	0.068 km ²	0.29%	Suelo desnudo	0.070 km ²	0.30%

Vegetación arbustiva	0.205 km ²	0.90%	Vegetación arbustiva	0.183 km ²	0.80%
-----------------------------	-----------------------	-------	----------------------	-----------------------	-------

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.1.1.4 se muestran las superficies que tuvieron cambio y las que no tuvieron.

Cuadro 4.1.1.4: Superficies y porcentajes del cambio de uso

Cambio	Superficie	Porcentaje
Con cambio	3.41 km ²	14.9%
Sin cambio	19.5 km ²	85.1%

Fuente: Elaboración propia

Se observa en el cuadro claramente que el área sin cambio ocupa el 85% o 1/3 de la subcuenca, mientras que el restante se localiza principalmente en el área urbana y alrededores.

Dentro de la subcuenca existen como ya se habló con anterioridad factores que favorecen la formación de cárcavas, pero se mencionaron de manera individual, más no de manera integral.

La integración de los factores es simple puesto que todo sucede con base en las causas que lo originan, que en este caso es el uso de la tierra, el cual es la agricultura, como la causa más importante, seguida de la minería y ganadería.

Al momento de querer trabajar la tierra, se tuvo que deforestar una parte de la subcuenca para la agricultura, fue en ese momento que el proceso se hizo problema, puesto que al talar la vegetación nativa existente, dejaron de existir raíces lo suficientemente profundas para fijar el suelo y evitar que al momento de la temporada de lluvias el agua se lleve el suelo, más aparte la vegetación servía para delimitar los caudales, algo que dejó de suceder al ya no existir vegetación.

Con la ausencia de la vegetación el agua que precipitaba podía infiltrarse al suelo, el cual es muy poroso y facilitaba la socavación de ciertas partes de la subcuenca,

aunado a esto aparte del suelo poroso existente, estaban los materiales volcánicos los cuales son porosos y no podían impedir la socavación.

El agua que no se infiltraba se escurría, haciendo que se fuera llevando el suelo de manera superficial e ir erosionando a lo largo de los años hasta que se formaba una cárcava en donde era un caudal intermitente.

El agua que escurría era ayudada por las pendientes mayores de 6° y que en algunas partes de la subcuenca superan los 45°, haciendo que si el poder y la fuerza del agua ya era erosionante, con el factor pendiente se hacía todavía más problemática en cuestiones de erosión.

Es por eso que con base en los resultados obtenidos de las mediciones se afirma que el proceso de formación de cárcavas por erosión hídrica en la subcuenca la Fábrica lleva varias décadas, las cuales comenzaron en el momento en que se empezó hacer el cambio de uso del suelo de forestal a agrícola.

Las otras causas aparte de la agricultura, son de menor peso ya que es muy poco el porcentaje que ocupan dentro de la subcuenca, pero que no se implementaron de apenas, sino que al igual que la agricultura en la zona, tienen décadas de existir la minería y la ganadería, principalmente la minería ya que es una zona con yacimientos de materiales pétreos, haciendo que se escarbe para obtener el material.

4.2 Mediciones de las cárcavas

El objetivo de haber realizado las mediciones en dos periodos de tiempo, en primer lugar saber si se encuentran activas o inactivas, en el caso de estar activas conocer cuánto es su crecimiento en un determinado periodo de tiempo, y si se están recuperando de manera natural; y en tercer lugar poder con base en las mediciones implementar medidas de control y recuperación para las cárcavas que se encuentren en crecimiento.

En el cuadro 4.2.1 se enlistan las cárcavas con su rango de tamaño, medidas de control estructurales, si cuentan con vegetación dentro o no, si cuentan con veredas dentro de ellas y cuál es su forma que tienen.

Cuadro 4.2.1: Características de las Cárcavas

Cárcava	Tamaño longitudinal	Tamaño profundidad	Forma	Medidas de control	Vegetación	Veredas
1	Mediana	Mediana	V	No	Si	Si
2	Mediana	Chica	U	No	Si	No
3	Grande	Gigante-mediana	U	No	Si (seca)	Si
4	Grande	Grande	U	No	No	Si
5	Gigante	Gigante	U	Si	No	Si
6	Chica	Chica	V	No	Si	No
7	Chica	Chica	U	No	Si	No
8	Gigante	Chica-grande-gigante	V	Si	No	Si
9	Grande	Grande-gigante	V	Si	Si	Si
10	Grande	Grande-gigante	U	Si	Si	No
11	Grande	Grande-gigante	U	Si	Si	Si
12	Grande	Gigante	U	No	No	No
13	Grande	Gigante	U	No	Si-No	No
14	Chica	Chica	U	No	Si	No

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Cuadro 4.2.2: Rangos de profundidad y longitud para Cárcavas

Tamaño	Rango longitudinal	Rango de profundidad
Chica	0-90 metros	0-3.5 metros
Mediana	91-200 metros	3.6-7.00 metros
Grande	201-700 metros	7.01-12.99 metros
Gigante	701-adelante	13-00-adelante

Fuente: Elaboración propia con base en bibliografía y trabajo de campo, 2014

En el cuadro 4.2.1 se observan tamaños conjuntos en la profundidad, esto es debido a que existen partes de la cárcava en donde su tamaño es chico y posteriormente crece a grande y en ocasiones a gigante, es por eso que se les asignaron dos o incluso tres rangos a algunas cárcavas.

En la figura 4.2.1 se localizan las cárcavas presentes en la zona de estudio.

Figura 4.2.1: Mapa de Localización de Cárcavas de la Subcuenca La Fábrica

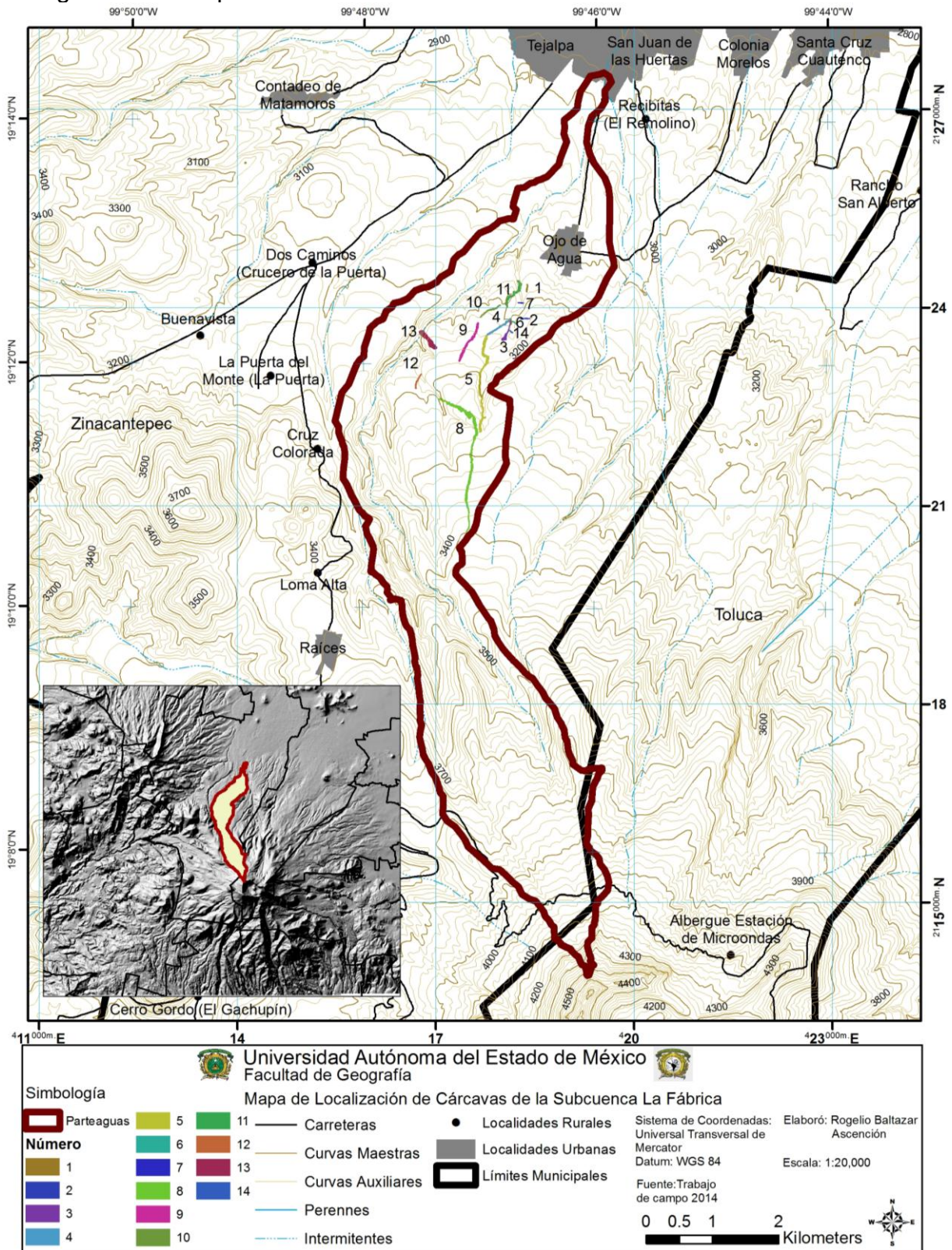
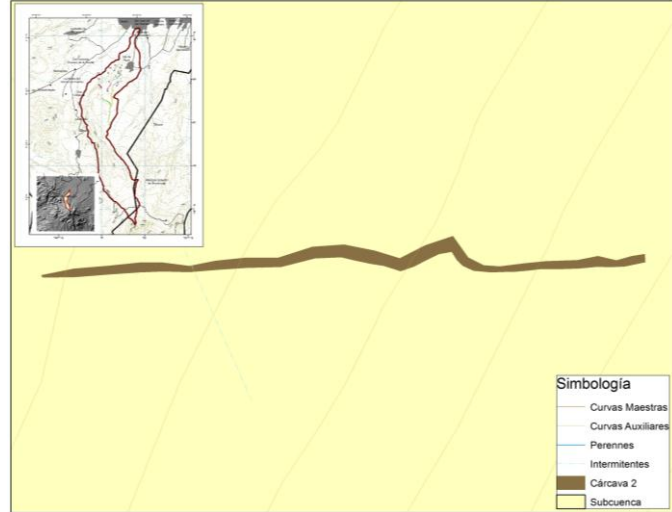


Figura 4.2.1.1: Localización cárcava 1



Figura 4.2.1.2: Localización cárcava 2



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.3: Localización cárcava 3

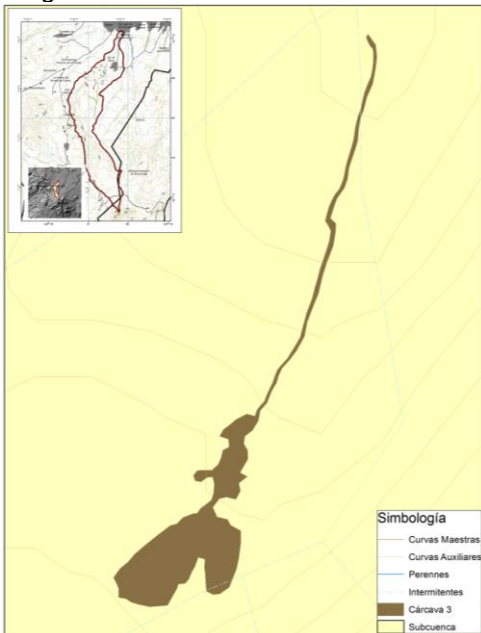
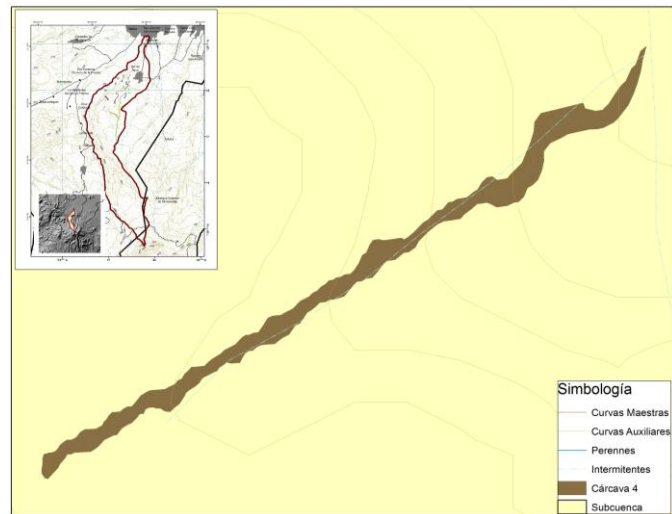


Figura 4.2.1.4: Localización cárcava 4



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.5: Localización cárcava 5

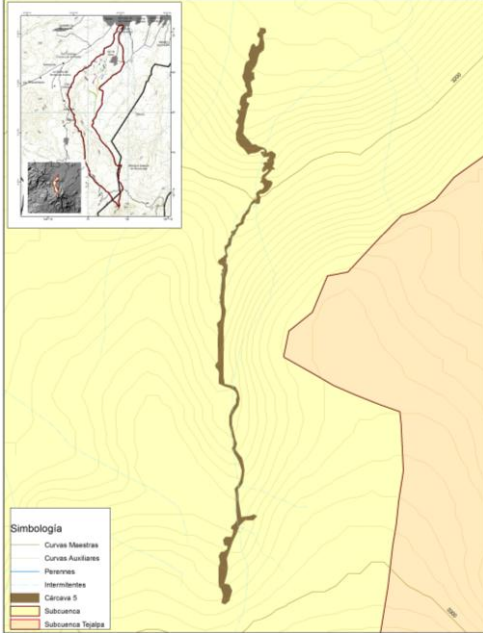
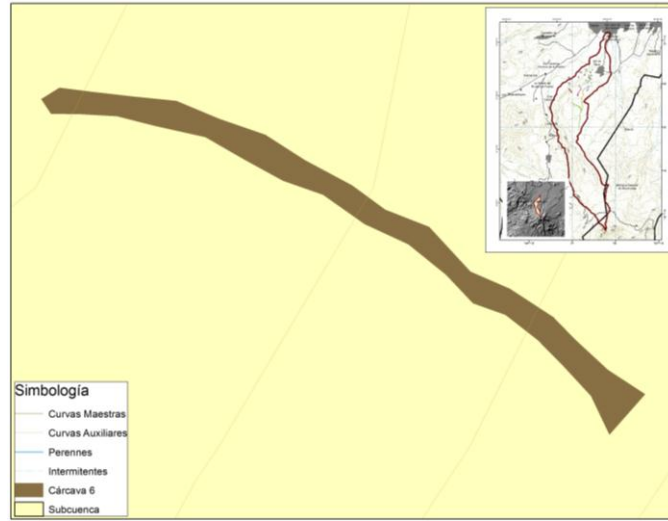


Figura 4.2.1.6: Localización cárcava 6



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.7: Localización cárcava 7

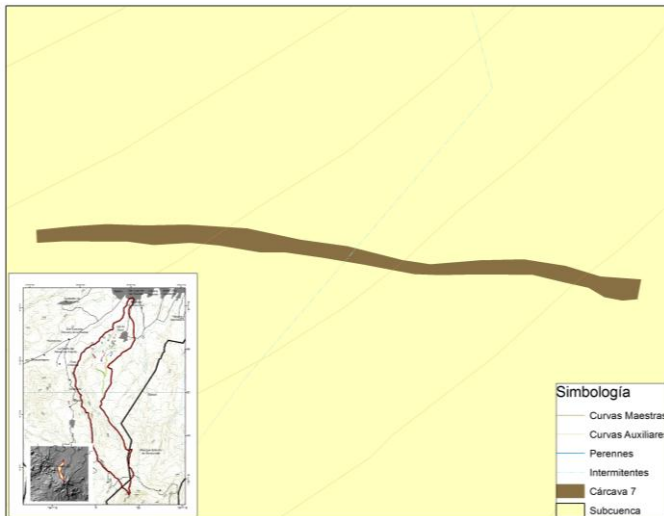
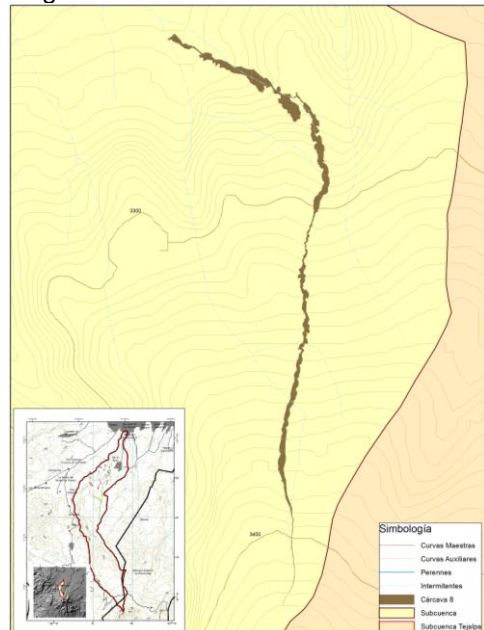


Figura 4.2.1.8: Localización cárcava 8



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.9: Localización cárcava 9

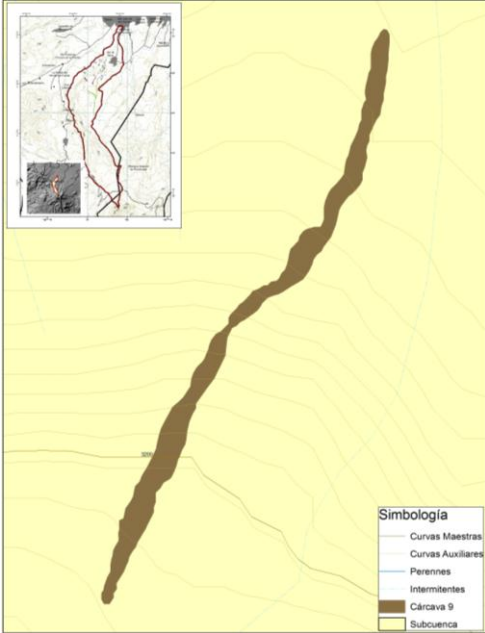
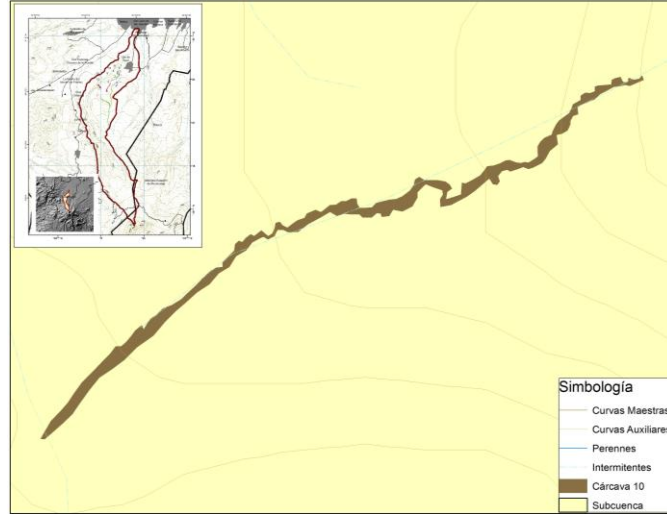


Figura 4.2.1.10: Localización cárcava 10

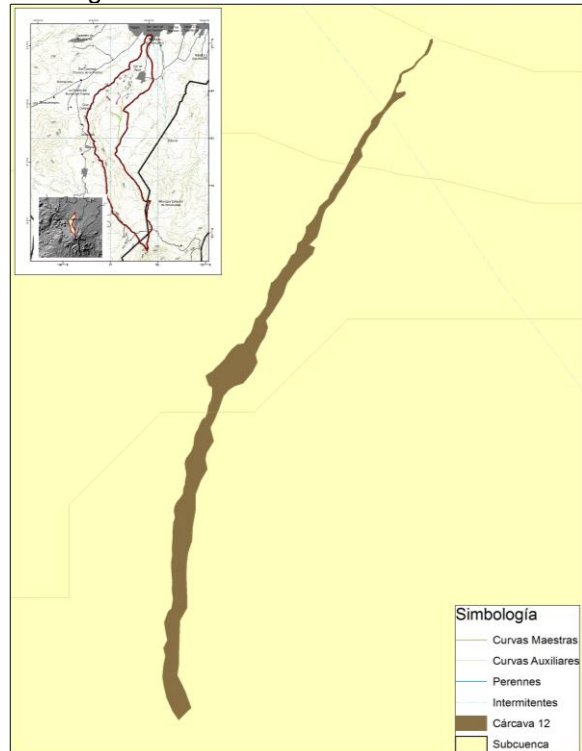


Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.11: Localización cárcava 11

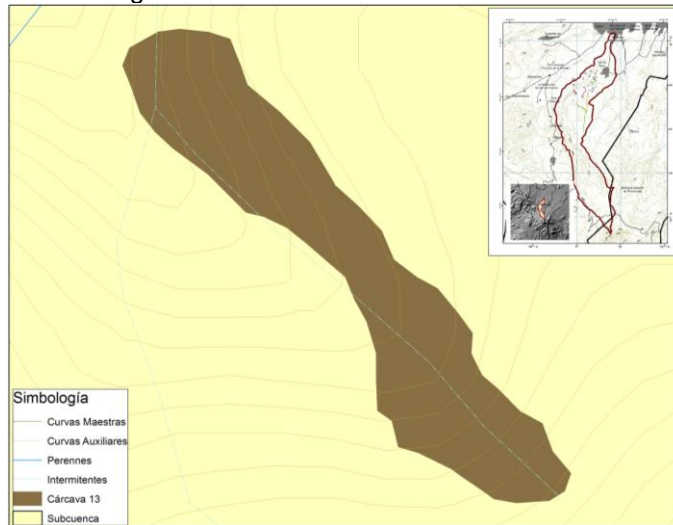


Figura 4.2.1.12: Localización cárcava 12



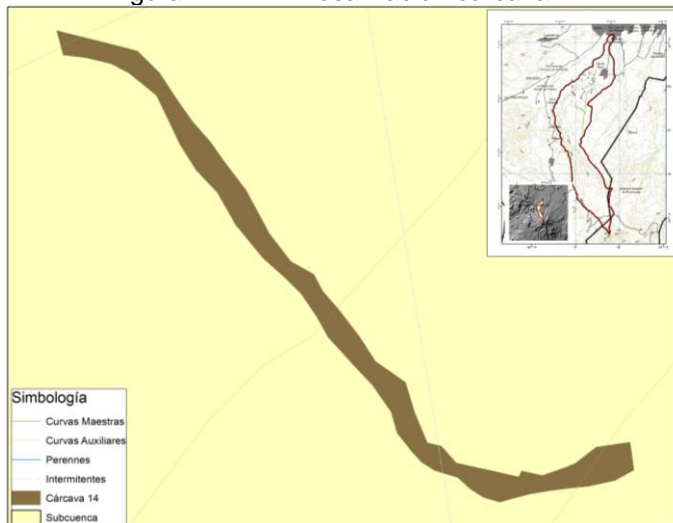
Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.13: Localización cárcava 13



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Figura 4.2.1.14: Localización cárcava 14



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Los resultados arrojados de las dos mediciones realizadas (abril y noviembre) reflejan que el 57% de las cárcavas creció en profundidad y achura, mientras que el 43% decreció en su profundidad y anchura.

Las 14 cárcavas presentes en la zona de estudio tuvieron crecimiento longitudinal, crecimiento que varió en cada cárcava, en donde fueron desde centímetros hasta en algunos casos metros.

En el cuadro 4.2.3 se muestran los resultados de cada medición por cárcava, así mismo su volumen de suelo perdido que tuvo cada una.

Cuadro 4.2.3: Áreas, longitudes y volúmenes de suelo perdido por Cárcava

Cárcava	Área de la Sección Transversal (Secas) (m ²)	Longitud de la cárcava (m)	Área de la Sección Transversal (Lluvias) (m ²)	Longitud de la cárcava (m)	Volumen de suelo perdido (m ³)
1	499.05 m ²	113.152 m	475.00 m ²	113.68 m	-240.50 m ³
2	310.25 m ²	131.226 m	360.25 m ²	131.89 m	1,250.00 m ³
3	2,706.75 m ²	330.495 m	3,813.50 m ²	330.97 m	27,668.75 m ³
4	4,802.50 m ²	423.112 m	5,061.75 m ²	423.79 m	6,481.25 m ³
5	15,645.50 m ²	1,612.419 m	16,110.25 m ²	1,613.59 m	11,618.75 m ³
6	246.50 m ²	77.876 m	276.25 m ²	78.35 m	743.75 m ³
7	321,72 m ²	80.399 m	261.75 m ²	80.84 m	-1,499.25 m ³
8	33,190.25 m ²	2,325.548 m	35,826.00 m ²	2,329.96 m	65,893.75 m ³
9	5,829.75 m ²	669.419 m	5,287.50 m ²	669.79 m	-13,556.25 m ³
10	3,885.00 m ²	350.407 m	3,624.50 m ²	350.93 m	-6,512.50 m ³
11	6,832.00 m ²	530.249 m	6,811.25 m ²	532.75 m	-518.75 m ³
12	2,248.25 m ²	241.646 m	2,824.75 m ²	242.88 m	14,412.50 m ³
13	6,220.00 m ²	356.144 m	7,095.00 m ²	363.59 m	21,875.00 m ³
14	250.00 m ²	60.368 m	172.75 m ²	60.69 m	-1,931.25 m ³

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

Cuadro 4.2.4: Tasas de crecimiento de las Cárcavas

Cárcava	Tasa de Crecimiento Longitudinal	Tasa de Crecimiento Transversal	Tasa de Crecimiento de profundidad
1	0.528 m	-0.12 m	-0.30 m
2	0.664 m	0.27 m	0.40 m

3	0.475 m	0.26 m	3.87 m
4	0.678 m	0.34 m	0.61 m
5	1.171 m	0.67 m	0.29 m
6	0.474 m	0.23 m	0.25 m
7	0.441 m	-0.38 m	-0.80 m
8	4.412 m	0.75 m	2.015 m
9	0.371 m	0.60 m	-0.505 m
10	0.523 m	0.25 m	-0.78 m
11	2.501 m	0.62 m	-0.505 m
12	1.234 m	0.54 m	2.52 m
13	7.446 m	0.87 m	2.50 m
14	0.322 m	-0.20 m	-1.03 m

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2014

En el cuadro 4.2.3 se observan que las cárcavas 1, 7, 9, 10, 11 y 14 tuvieron una recuperación en cuanto a su profundidad y área transversal; las causas por las cuales disminuyeron son básicamente a que son cárcavas llenas de vegetación arbustiva y arbórea, lo cual permite que se vaya recuperando de manera natural, ya que ocasiona que las raíces puedan fijar el suelo e impedir en primer lugar que el caudal sea lo suficientemente fuerte para seguir erosionando y en segundo lugar evitar que la fuerza de la corriente se lleve el suelo y siga socavando.

Figura 4.2.2: Cárcava 9



Figura 4.2.3: Cárcava 10



Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

En la figura 4.2.2 se observa como la vegetación hace que se esté recuperando la cárcava, para que ya no avance en cuestión de profundidad; en el caso de la figura 4.2.3 no existe vegetación puesto que es la parte final de la cárcava y es donde mantiene un cierto crecimiento, aclarando que en la parte inicial y media cuenta con vegetación.

Mientras que las cárcavas 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 y 13 tuvieron un crecimiento y en algunos casos en demasía, como son las cárcavas 3, 8 y 13 las cuales fueron las de mayor crecimiento, en donde la primera de estas cuenta con vegetación, pero se encuentra seca en su totalidad, la cual no se puede recuperar de una manera autónoma como las otras cárcavas; mientras que la segunda se encuentra sin vegetación dentro así como las demás que tuvieron crecimiento.

Figura 4.2.4: Cárcava 3



Figura 4.2.5: Cárcava 13



Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

En la figura 4.2.4 se muestra como la cárcava tiene vegetación pero no está ayudando a reducirla, al contrario sigue creciendo; mientras que la figura 4.2.5 es la más profunda, y que no cuenta con vegetación en la parte inicial ni en la parte media, teniendo solamente pequeños oyameles y cedros en la parte final, haciendo que siga creciendo.

Como se observa en el cuadro 4.2.4, en cuanto a la tasa de crecimiento longitudinal todas las cárcavas tuvieron crecimiento, cinco de ellas con un crecimiento no mayor al medio metro, siendo las 14 y 9 las de menor crecimiento. Cuatro con un rango del medio metro al metro, encontrándose la 1, 2, 4 y 10 en ese rango; y cinco rebasando el metro, teniendo como la cárcava de mayor profundidad a la cárcava 13 seguida por la 8 y 11.

En cuanto a la tasa de crecimiento transversal tres cárcavas tuvieron un decremento, siendo la 1, 7 y 14; las restantes crecieron pero ninguna superó el metro, todas quedaron por debajo de los 0.90 metros.

La tasa de crecimiento de profundidad muestra que seis cárcavas se recuperaron en ese aspecto, las cuales son la 1, 7, 9, 10, 11 y 14, con un rango de recuperación de 0.30 metros a 1.00 metro. Las restantes se clasifican en dos grupos, el primero lo componen la 2, 4, 5 y 6 con un incremento no mayor al metro, mientras que el segundo grupo lo integran la 3, 8, 12 y 13 con un aumento superior a los dos metros, encabezando la lista la 3, seguida por la 12.

En términos generales tres cárcavas son las que se recuperaron en profundidad y de manera transversal, siendo la 1, 7 y 14; mientras que las que no tuvieron recuperación en ninguna de las tres tasas fueron la 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 y 13 y en el rango intermedio, es decir las que tuvieron una de dos tasas en recuperación son la 9, 10 y 11.

El crecimiento de estas cárcavas va encaminado a que la población hace canales de riego que van directo del cultivo hacia la cárcava, provocando que se haga más fuerte el caudal y más erosivo, debido a que caen corrientes en la cárcava de todos lados.

Otro factor es la abertura de veredas a través de las cárcavas provocando que en tiempo de lluvias, estas veredas sean cauces que se unen al caudal principal haciendo que se erosione más de lo que debería la cárcava.

Finalmente, los pobladores sacan material de las cárcavas (arena) para la reparación de sus caminos para poder acceder a sus terrenos de cultivo, este proceso hace que la erosión sea de mayor magnitud, ya que no solamente el agua la ocasiona, sino también los pobladores al reparar sus caminos con arena procedente de estas formaciones.

Cabe señalar que 5 de las 14 cárcavas presentes en la subcuenca cuentan con medidas de control, es decir, tienen presas de gaviones pero en todos los lugares en donde se han colocado han sido superadas, infiriendo que no hicieron el control del caudal para el que fueron hechas.

Figura 4.2.6: Cárcava 5



Figura 4.2.7: Cárcava 8



Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

Eso pasó porque no se hicieron todos los estudios necesarios para saber la fuerza del caudal, tampoco se tomaron en cuenta las lluvias extraordinarias, no se hicieron estudios de suelo, ni se calculó la pendiente; lo que da como resultado en que las presas hayan sido superadas y en vez de evitar que la cárcava siga creciendo (figuras 4.2.6 y 4.2.7).

4.3 Zonas susceptibles a erosión hídrica

Su objetivo es el de identificar las zonas erosionables en la subcuenca, lo cual se realizó con base en varias capas de información.

Esto ayudará a en primer lugar ubicar las zonas altamente erosionables y con base en eso como segundo lugar ubicar las medidas de control y recuperación de las cárcavas.

El mapa de Zonas Susceptibles a Erosión Hídrica, representa cartográficamente los sitios que pueden ser susceptibles a dicho proceso, estas zonas se identificaron gracias a diversas capas de información realizadas a lo largo de esta investigación.

El mapa se hizo con valores de 1 a 5, en donde su equivalencia es muy bajo a muy alto; como se puede observar en donde se tiene en primer lugar el valor muy bajo que corresponde a zonas con muy baja susceptibilidad a la erosión hídrica, las cuales se localizan principalmente en la porción sureste, porción media-occidental y una franja localizada en porción noroeste, que corre de norte a sur.

En este valor, las cinco capas de información utilizadas, se sumaron dando como resultado este valor, en el cual se encuentran la planicie aluvial, las pendientes de 0° a 3°, la precipitación de 300-700 mm y el bosque de pino hartwegii, cuya relación es que esta información utilizada y ponderada a 1 no es factor para que se desarrolle la erosión hídrica para la formación de cárcavas.

El siguiente valor es el bajo, el cual se encuentra principalmente en dos grandes poligonales, encontrándose en la parte sureste y parte media-occidental, sin embargo no son los únicos lugares en donde existe este valor, al contrario, existen tres zonas de menor tamaño, las cuales se ubican en la parte central, en la parte norte y de forma mixta con la franja de verde fuerte (valor muy bajo).

La ponderación tomada para este valor fue 2, en donde la información utilizada fue la cima con roca ígnea extrusiva básica, pendientes de 3° a 6°, andosol húmico y andosol ócrico, precipitación de 701-850 mm, áreas en descanso, bosque de oyamel y bosque de oyamel-cedro; en donde sí se ven de manera independiente las variables y de manera conjunta, coinciden con las zonas de baja susceptibilidad, debido a que dicha información usada sigue sin ser factor para que se desarrolle la erosión hídrica y forme cárcavas.

Debido a que el tema son las cárcavas, la parte sur, que es altamente susceptible a la erosión hídrica, no es para tomar en cuenta con demasiada importancia, esto debido a que es una zona que no tiene vegetación por su altura, cuenta con rocas andesitas, sus suelos son rocosos, y es una ladera, lo que hace que es difícil que se forme una cárcava por el hecho que no existen corrientes.

Las zonas susceptibles a la erosión hídrica con un valor medio, son las que tienen más presencia en la subcuenca, puesto que su poligonal más grande se ubica en la parte suroeste, pero que se encuentra mezclada con las zonas de valor alto, estas partes mixtas se encuentran en la parte media y media-norte de la zona de estudio.

En estos valores las ponderaciones usadas fueron la 3 y 4, integrando el primer grupo la cima con brecha volcánica, lomerío con brecha volcánica, pendientes de 6° a 15°, el feozem háplico, precipitación de 851-1000 mm, bosque de oyamel-pastizal, bosque de pino-pastizal, cultivo de maíz, pino pseudostrobus con vegetación arbustiva y vegetación arbustiva; este valor ya es susceptible porque la información utilizada ya es erosionante puesto a que se toman en cuenta elevaciones, con pendientes moderadas, suelos muy porosos que permiten que se infiltre el agua o que el agua se lleve el suelo, aunado a esto la presencia de cultivo y de falta de vegetación arbórea.

Mientras que el segundo grupo está compuesto por el piedemonte con brecha volcánica, pendientes de 15° a 30°, regosol eútrico, precipitación de 1001-1100

mm, cultivo de papa, desmonte, pastizal y pastoreo; siendo las variables claves las pendientes, la precipitación y el uso de suelo, ya que todo tiene relación en el sentido que se van interrelacionando partiendo desde la geomorfología, que en este caso es el piedemonte.

La zona de valor medio que se localiza en la parte suroeste es similar al de la parte sur (muy alto), debido a que es un área con bosque de pino mezclado con pastizal, siendo la especie arbórea la que impide que se formen cárcavas.

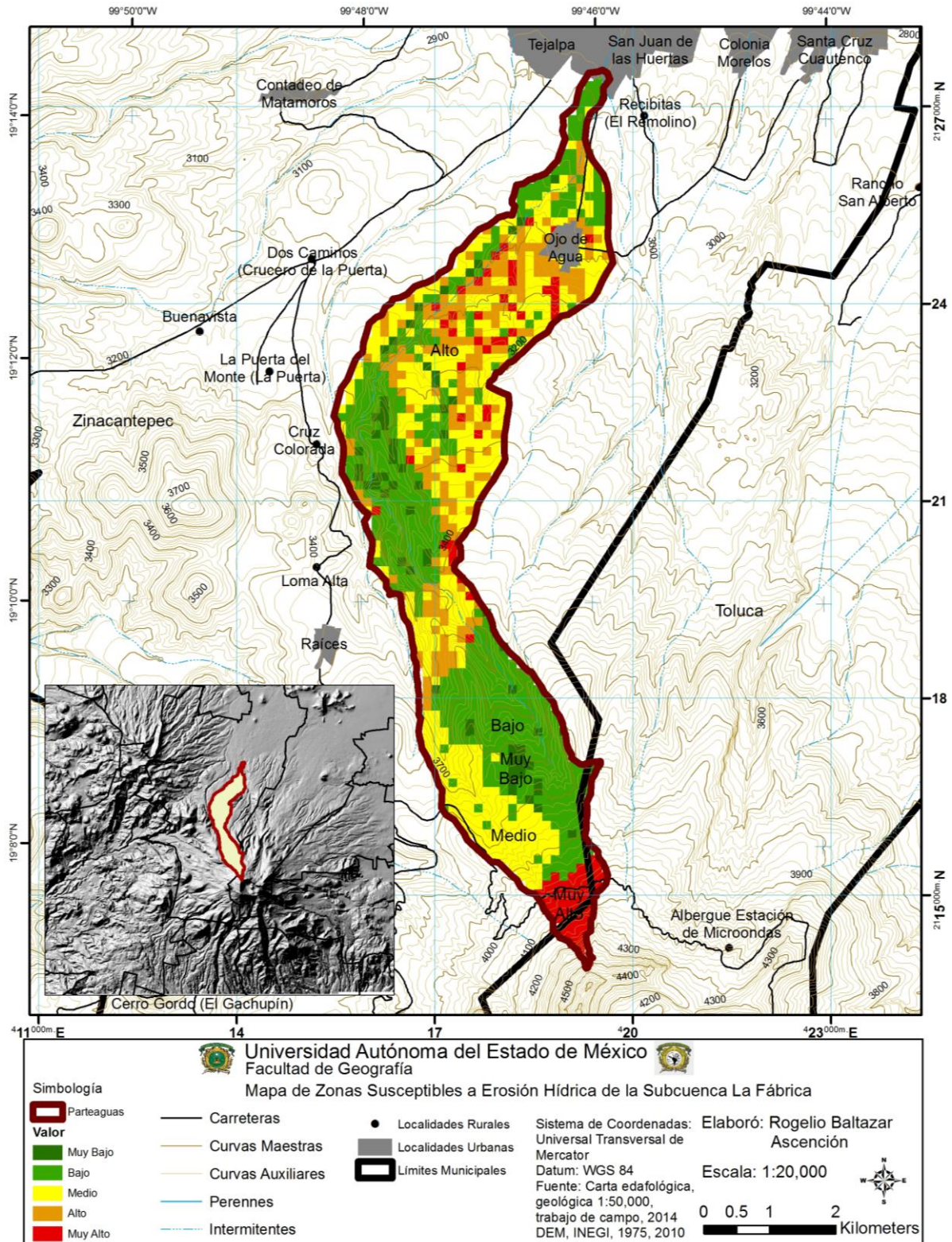
Pero las partes importantes las cuales se tienen que tomar con alta prioridad son las partes media y media-oriental con dirección al norte, ya que aquí se encuentra la mayor concentración de zonas susceptibles de valores medio, alto y muy alto y teniendo como claro ejemplo las cárcavas ya existentes.

Finalmente se tienen las zonas altamente susceptibles, encontrándose esencialmente en un polígono en la parte sur de la subcuenca, es decir en la parte más alta, teniéndose pequeñas zonas en la parte media-norte; dichas zonas son representadas en el mapa de color rojo.

La ponderación usada para este valor fue el 5, la cual se conformó por la ladera con roca ígnea extrusiva básica, el valle con dinámica erosiva, pendientes $<45^\circ$, el litosol, precipitación de 1101-1300 mm, áreas sin vegetación, suelos desnudos y la minería, cuya representación cartográfica fue principalmente a lo largo del valle erosivo, de las áreas sin vegetación y el litosol, puesto a que fueron las variables dominantes por la superficie que ocupan dentro de la subcuenca.

Esta zona es en gran medida susceptible porque existe una alta cantidad de corrientes intermitentes, las cuales se activan en temporada de lluvias, otro elemento es la pendiente, las cuales son de moderadas a fuertes, el tipo de suelo el cual es Feozem, dando como característica principal que es altamente erosionable al agua, y como último elemento se tiene el uso del suelo, que en su mayoría es cultivo de papa.

Figura 4.3.1: Mapa de Zonas Susceptibles a Erosión Hídrica de la Subcuenca La Fábrica



Cuadro 4.3.1: Superficies y porcentajes de zseh

Zonas	Superficie	Porcentaje
Muy Baja	1.362 km ²	5.94%
Baja	8.632 km ²	37.7%
Media	7.142 km ²	31.2%
Alta	3.832 km ²	16.73%
Muy Alta	1.932 km ²	8.45%

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.3.1 se muestran los porcentajes y superficies que tiene cada zona o valor dentro de la subcuenca, teniendo mayor porcentaje la zona alta, mientras que la muy baja es la de menor superficie, es decir, el área de estudio es altamente susceptible a la erosión hídrica para la formación de cárcavas.

El mapa como ya se mencionó antes, se realizó con varias capas de información, las cuales fueron tomadas debido a que son factores que influyen directamente en la formación de cárcavas por erosión hídrica, cuyas capas fueron las unidades geomorfológicas, pendientes, suelo, uso del suelo y vegetación y la precipitación.

Solamente se tomaron estas cinco capas, puesto que otras capas como la geología no eran aptas, debido a que no existen gran variedad de rocas dentro de la subcuenca y no iba a ser de utilidad al momento de la generación del mapa.

La relación que tienen estas capas es que son factores que ocasionan la formación de cárcavas, puesto que en cuestiones geomorfológicas, dependiendo de las geoformas existentes y de los grados de pendientes que existen en la subcuenca, se sabe que tan posiblemente erosionantes son; así mismo pasa con el suelo, ya que esté de acuerdo a su estructura se conoce que tan poroso y/o deleznable es, lo cual propicia que se lo lleve la corriente o en su caso permite la infiltración del agua.

En cuanto al uso del suelo y vegetación, es el principal factor ya que con base en trabajo de campo se comprobó que es un área que ha tenido mucho cambio de suelo, lo que provoca que los demás factores se alteren y en consecuencia todo.

Finalmente se tiene la precipitación, en donde se conoce que la subcuenca es un área muy lluviosa, en gran parte porque se encuentra dentro de un volcán, lo que genera que la precipitación sea abundante e intensa.

En pocas palabras la relación que tienen estas capas para poder ser seleccionadas para el mapa de zonas susceptibles a erosión hídrica es demasiada ya que una capa por sí sola no puede causar este proceso, deben de estar en conjunto para que se dé el proceso, es decir, los factores no deben de verse de manera independiente, sino como todo un sistema.

En la forma en que se interrelacionan cada una de las capas para que de cada categoría en el mapa es de la siguiente manera; cada categoría que se obtuvo viene dada de todo un proceso en el cuál se iban sumando las capas para que con base en esas sumas dieron como resultado el mapa, cabe señalar que de acuerdo al orden de las sumatorias es como se va a ver el resultado, es decir, la última capa que se suma es la que se va a observar más distinguida en el mapa, como en este caso que fue el uso del suelo y vegetación, pero que a su vez contiene información de las otras capas utilizadas.

4.4 Propuestas para el control y/o reducción de cárcavas

Para el apartado se consideraron varios criterios, los cuales fueron el tamaño que tienen de manera longitudinal, transversal y profundidad, puesto que es el criterio más importante debido a que existen cárcavas que ya necesitan medidas estructurales de mayor magnitud que las pequeñas.

El siguiente fue el grado de pendiente que hay en cada cárcava, es decir, entre mayor grado tenga la pendiente, más poder erosivo va a tener el caudal y por

ende el cabeceo se va recorriendo en menor tiempo y como consecuencia el cuerpo de la cárcava hace lo mismo.

El tercer criterio fue el de las actividades antrópicas, esto porque con base en dichas actividades ubicar las cárcavas que se encuentran entre los cultivos o que amenazan con disminuir el terreno cultivado, puesto que lo que se quiere evitar es que sigan creciendo y a su vez vayan disminuyendo la superficie agrícola.

En cuanto a lo que concierne al control y/o reducción de las cárcavas existentes en la Subcuenca La Fábrica, no se pueden aplicar las mismas alternativas, principalmente por su dimensión, puesto que el tamaño es heterogéneo.

Para esto se tendrían que involucrar no solo los ejidatarios de la zona, sino que a la par tendrían que participar autoridades gubernamentales, puesto que a ambos lados les debe o debería de preocupar solucionar este problema, ya que por un lado los ejidatarios pierden terreno que es cultivable, mientras que a las autoridades desde el punto de vista de cuantas toneladas de suelo se pierden, ya que esto podría a la larga acabar con la producción agrícola de la zona, dejando sin sustento económico a las personas que dependen directa o indirectamente de la agricultura.

Las acciones que se proponen son de efecto a largo plazo, principalmente, teniendo al rellenado del cabeceo y el recubrimiento de los taludes con geotextil como las únicas acciones a corto o mediano plazo, debido a que el problema de las cárcavas es muy severo y que se han formado a lo largo de décadas, y para poder reducirlas, primero se tiene que controlar el problema.

Así mismo se tendrían que involucrar visitantes de la zona, universidades, sobre todo para que se pueda tener el apoyo no tanto económico, sino de labor social como sería el de realizar reforestaciones en las áreas señaladas, principalmente.

Con estas medidas, los actores involucrados serán beneficiados, incluido el ambiente, ya que al realizar las medidas, dicho actor podrá volver a funcionar como un sistema en equilibrio o en su gran totalidad.

Se debe de entender que la subcuenca no puede ser reforestada en su totalidad, que sería lo mejor, pero por la presencia de actividades humanas es imposible que se haga, la meta final de esto es que la subcuenca vuelva a ser un sistema en equilibrio junto con las actividades económicas, es decir, que de cierta manera se tenga una convivencia, en donde los beneficios sean igualitarios y disparejos.

En la figura 4.4.2 se muestra el mapa en donde se localizan las medidas que se propusieron para el control en primera etapa y en segunda la recuperación de las cárcavas, las cuales fueron elegidas por el tamaño que tiene cada una de estas formaciones.

Entre las medidas que se tienen se encuentran como primera acción el rellenado del cabeceo de todas las cárcavas, la cual se pretende que se realice mediante el uso de rocas bien acomodadas, para evitar que la cabeza siga recorriéndose y por consecuencia que la cárcava siga creciendo; otra razón por la cual sirve esta medida es por el hecho que va a frenar el torrente y evitará que sea tan erosivo.

Figura 4.4.1: Relleno del cabeceo de la cárcava



Fuente: SAGARPA, 2009

En la figura 4.4.1 se ilustra la manera en que debe de ser rellenado el cabeceo de la cárcava, esto para que deje de crecer la parte inicial y con ello el resto.

La segunda acción en lista es la reforestación arbórea, que se tiene que hacer en el contorno de la cárcava, es decir, a su alrededor y no adentro, esto para que el suelo se fije mediante las raíces de los árboles y evite que se siga desprendiendo dicho material de los taludes. Se aconseja que se realice con especies nativas de la zona como serían el aile, oyamel y el pino pseudostrobus, principalmente.

La tercera se subdivide en tres, puesto que estas son obras de ingeniería que van desde escala pequeña hasta escala grande, como lo son las presas de llantas, las presas de gaviones y las presas de mampostería. La función y colocación de cada de una de este tipo de presas está con base en el tamaño de la cárcava, es decir, las presas de llantas son para las pequeñas, las presas de gaviones son para las medianas, grandes y en algunos segmentos de las medianas, mientras que las presas de mampostería son para algunos segmentos de grandes, pero específicamente para las gigantes.

Figura 4.4.2: Presa de llantas



Fuente: SAGARPA, 2009

En la figura 4.4.2 se muestra cómo deben de ir acomodadas las llantas para que la presa de este material pueda tener resultados positivos, ya que de otra manera no servirá de nada.

Figura 4.4.3: Presas de gaviones



Fuente: SAGARPA, 2009

En la figura 4.4.3 se ejemplifica la manera en que deben de realizarse las presas de mampostería para que sean eficientes y eficaces.

Figura 4.4.4: Presa de mampostería hidráulica



Fuente: SAGARPA, 2009

El recubrimiento con geotextil, es una medida para cárcavas que tienen gran profundidad, es decir, más de 17 metros, cuyo material se colocaría en los taludes de las cárcavas, esto para ayudar a la reforestación arbórea a fijar el suelo de una manera más efectiva y en menos tiempo y evitar que se siga ensanchando.

Figura 4.4.5: Geotextil en los taludes de la cárcava



Fuente: SAGARPA, 2009

En la figura 4.4.5 se ejemplifica la manera en que debe de ser colocado en geotextil en los taludes de la cárcava.

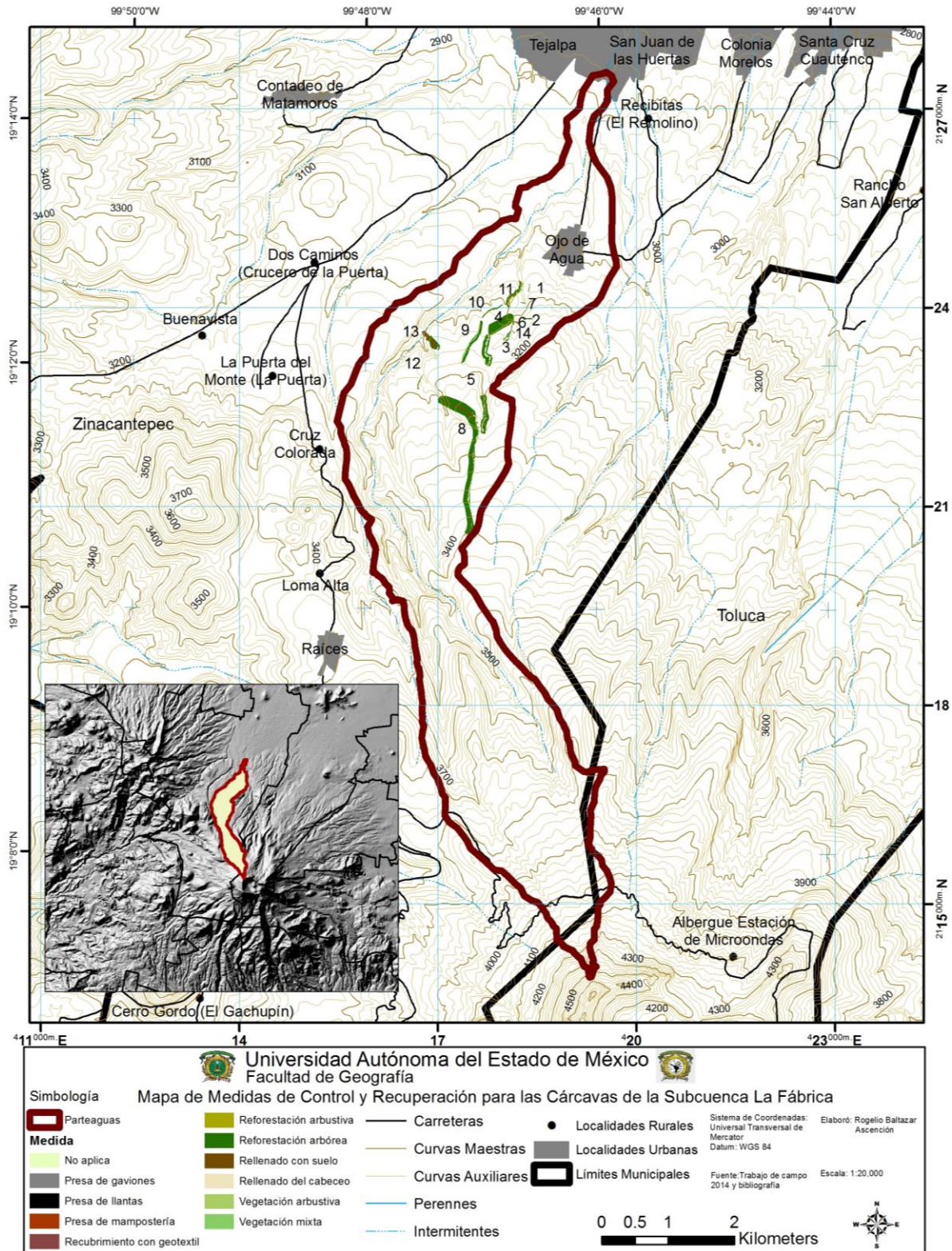
La quinta medida es la reforestación arbustiva, con la que se busca recuperar la cárcava de abajo hacia arriba, la cual tendría que ser entre los segmentos que existen de separación que tiene una presa a otra presa, solamente es aplicable para las cárcavas que cuentan con presas de gaviones y mampostería.

Finalmente el relleno con suelo es la última medida, la cual consiste en que las cárcavas o segmentos que no puedan ser recuperados mediante las demás medidas, la forma de hacerlo es relleno por completo con suelo.

En lo que corresponde a la vegetación arbustiva, son las partes donde se encuentra dicha vegetación dentro de la cárcava de manera natural y lo que se

aconseja es que no la quiten y la mantengan, ya que esta ayuda a que se recuperen las cárcavas de menor envergadura de manera autónoma. Pasa lo mismo con la vegetación mixta, que es vegetación arbustiva con arbórea.

Figura 4.4.6: Mapa de localización de las medidas de control y recuperación de las Cárcavas de la Subcuenca La Fábrica



En lo que corresponde a las cárcavas de tamaño chico, por su anchura, profundidad y longitud, las alternativas adecuadas para su control y que no vayan creciendo más, es realizar en primera instancia el relleno con llantas de vehículos que ya no se usan de manera ordenada, es decir, acomodarlas en forma horizontal una sobre otra, en forma de fila a lo largo y ancho de la cárcava, a fin poder colocar tubos en los centro de las llantas para afianzar estas.

La segunda fase es su recuperación vía arbustiva, es decir, dejar que la cárcava se vaya recuperando de una manera natural con los arbustos que se dan dentro de ellas; a la par realizar una siembra de árboles propios de la zona (Oyamel, Aile, Capulín o Pino Pseudostrobus) en la parte inicial de la cárcava para impedir que la fuerza del agua llegue con toda la fuerza y que los árboles puedan fijar el suelo e impedir que se vaya. Esto es aplicable para las cárcavas 2, 6, 7 y 14.

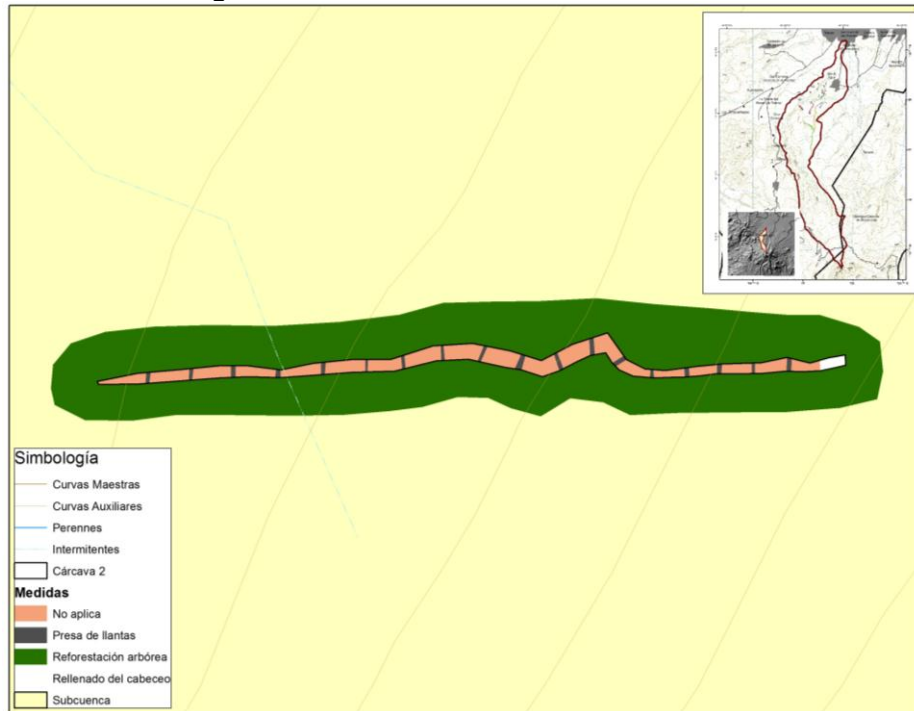
Figura 4.4.7: Cárcava 6



Fuente: Imagen tomada en trabajo de campo, 2014

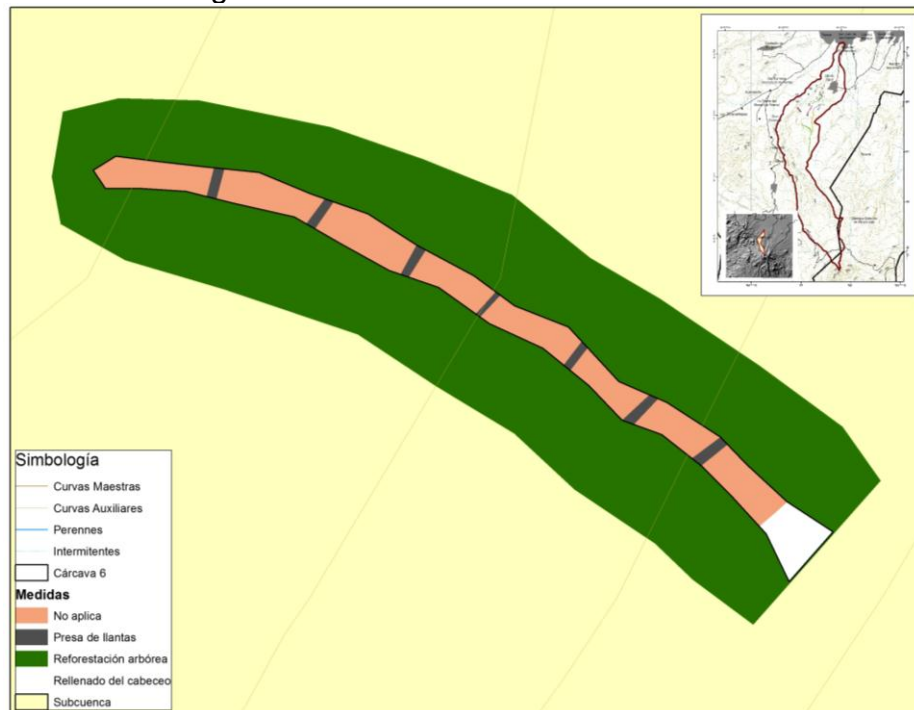
En la figura 4.4.7 se muestra la cárcava, en donde la presa de llantas es ideal debido a su anchura, ya que es idónea para hacer que se recupere.

Figura 4.4.6.1: Medidas de la cárcava 2



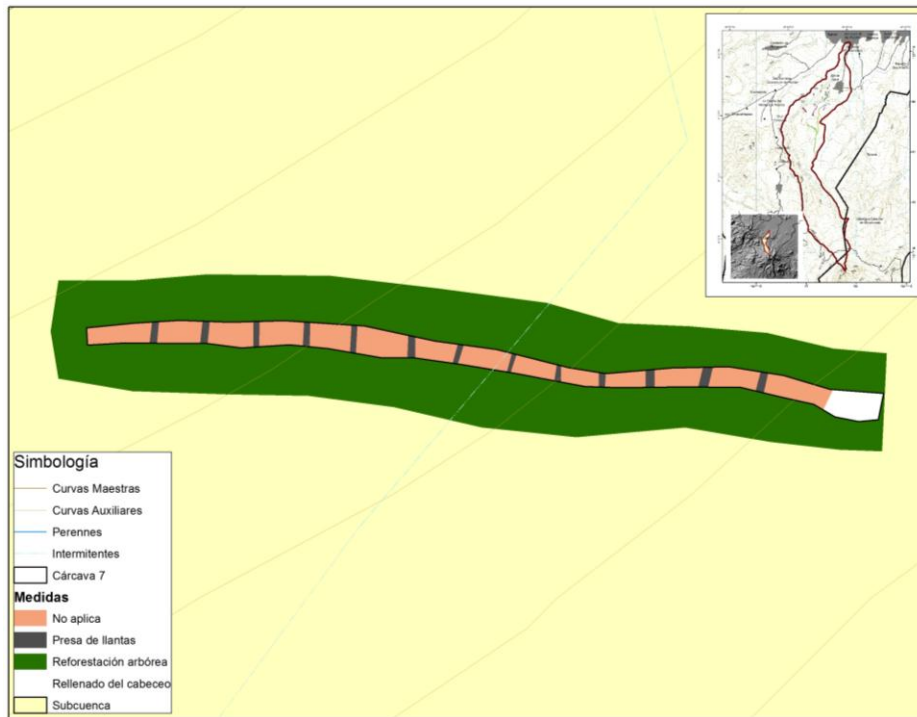
Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.6.2: Medidas de la cárcava 6



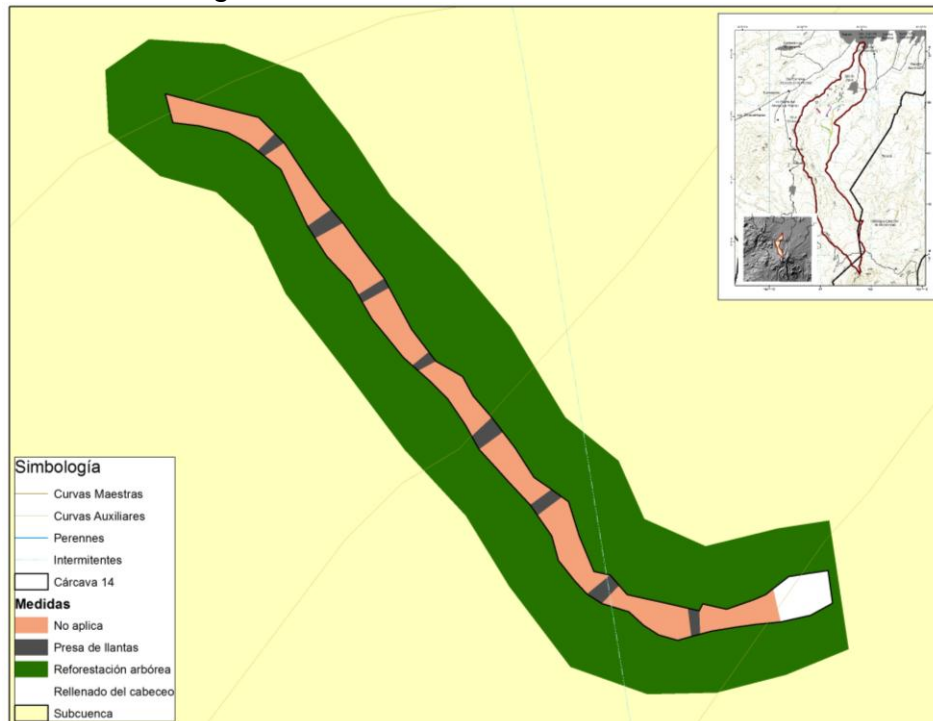
Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.6.3: Medidas de la cárcava 7



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.6.4: Medidas de la cárcava 14



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Para las cárcavas de tamaño medio, debido a que son más anchas, más profundas y más largas que las pequeñas, las llantas no es una alternativa, la opción para impedir que siga avanzando la cárcava es realizar una reforestación en la parte alta y en la parte baja de la cárcava con vegetación arbórea, esto para hacer que el proceso de crecimiento se detenga de manera longitudinal, mientras que en la temporada de secas sembrar semillas de los arbustos que presentan dentro de las cárcavas para que crezcan y en tiempo de lluvias permitan que el proceso de profundización siga avanzando al igual que de manera lateral, esto con el tiempo va a ver resultados y es aplicable para la cárcava 1.

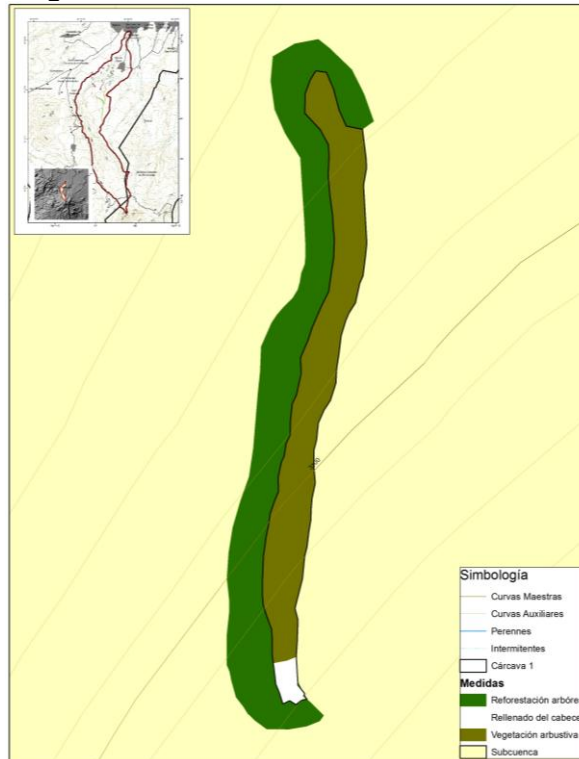
Figura 4.4.8: Cárcava 1



Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

La figura 4.4.8 muestra como la vegetación arbustiva va haciendo que la cárcava se vaya recuperando de manera independiente.

Figura 4.4.6.5: Medidas de la cárcava 1



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

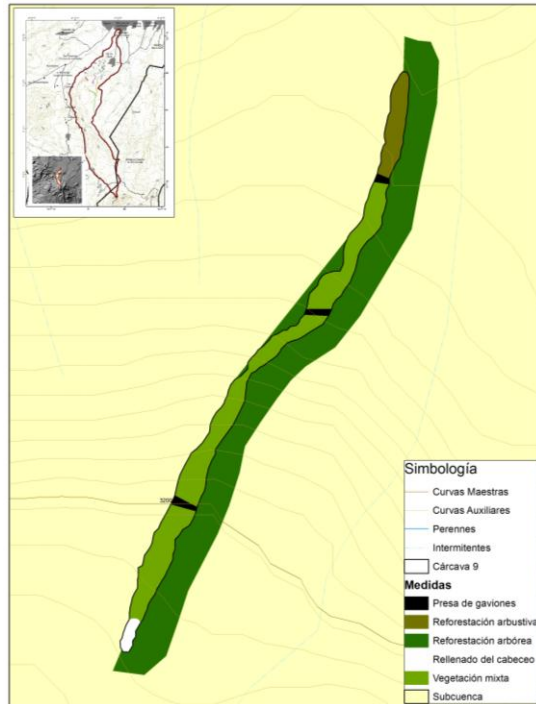
Las cárcavas grandes, se pueden clasificar en dos, las que se están recuperando y las que siguen en completo crecimiento, dentro de la primera categoría se ubican la 9, 10 y 11, mientras que las segundas son la 3, 4, 5, 12 y 13.

En el caso de continuar la recuperación de las que ya lo están haciendo de una manera natural, es importante el no realizar brechas o caminos a través de ellas, ya que esto provoca que se vaya erosionando de manera lateral y por consecuencia que crezca transversalmente, por otra parte, no talar de manera excesiva los arbustos para las necesidades de los pobladores, es hacerlo de manera racional para que el arbusto pueda ser útil para ambas causas.

Aunque suene repetitiva la reforestación en la parte alta de la cárcava con árboles, es necesaria, ya que estos son los que pueden fijar el suelo e impedir que se vaya, simple y sencillamente por sus raíces tan profundas que tienen, y si se hiciera en la parte baja es mejor, ayuda a reducir de una manera más eficaz el

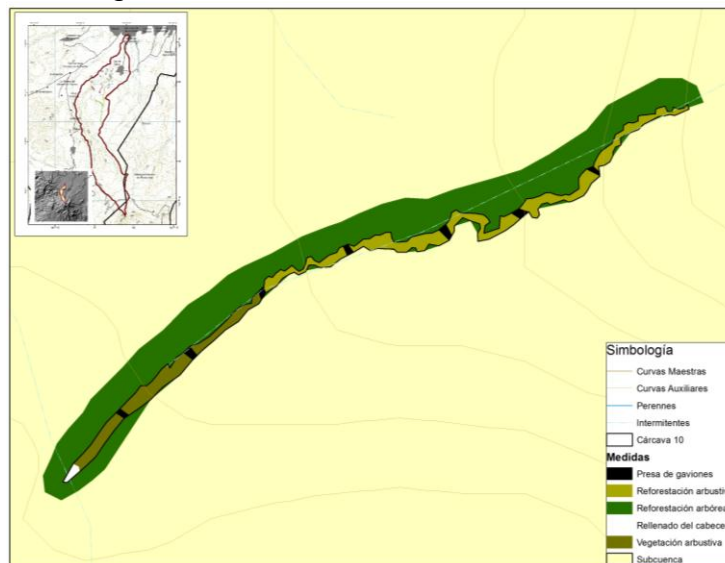
caudal y por lo tanto la erosión, limitando el crecimiento de longitudinal de la cárcava para posteriormente ser recuperado.

Figura 4.4.6.6: Medidas de la cárcava 9



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

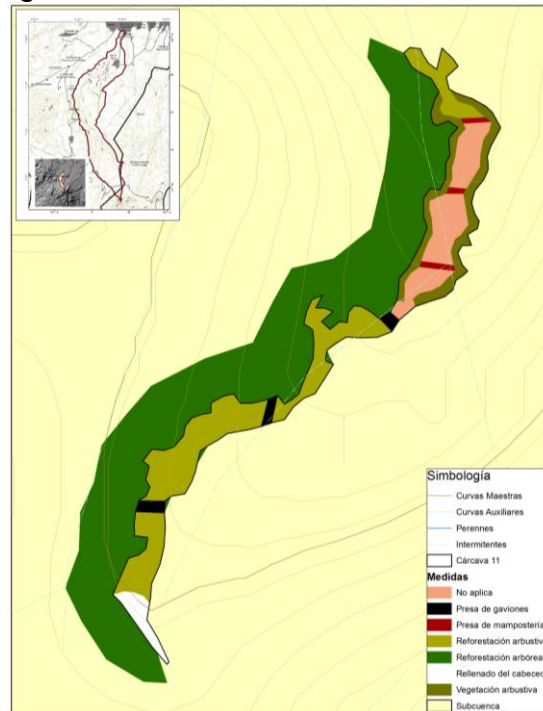
Figura 4.4.6.7: Medidas de la cárcava 10



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Existen algunas excepciones dentro de las mismas cárcavas ya señaladas, esto por motivos un tanto ajenos a ellas, como el caso de la cárcava 11, ya que esta llega hasta una mina activa, en donde es difícil impedir su crecimiento hasta el cierre de la mina de una manera adecuada y eficaz, pero si se puede reducir gradualmente el crecimiento con lo antes mencionado.

Figura 4.4.6.8: Medidas de la cárcava 11



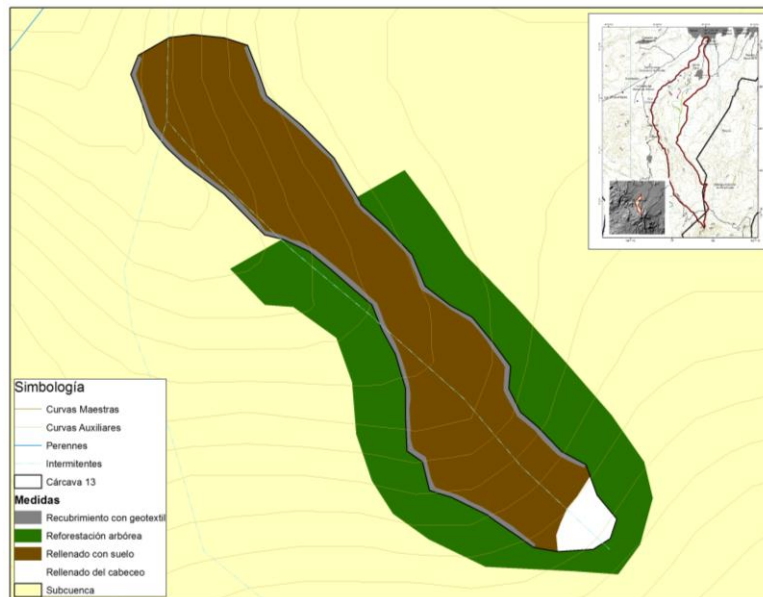
Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Un problema a lo que se enfrentan las cárcavas 9, 10 y 11, es que si no se hace lo que se está proponiendo es que en cuestión de algunos años van a terminar uniéndose, formando una cárcava gigante como resultado, es por eso que las acciones se tienen que empezar a la brevedad posible.

En cuanto a las cárcavas 3, 4, 12 y 13, son más difíciles su control y recuperación posterior, en específico la 13 por su tamaño en todos los sentidos, pero esta cárcava su forma de control es con la ingeniería, es decir colocando geotextil en el fondo y en las paredes y comenzar el relleno pausadamente, complementándolo con una reforestación en la parte alta de la cárcava y ya

cuando se haya terminado de rellenar, reforestar encima de donde estaba la cárcava, para que así se pueda recuperar en su totalidad; la idea en esta cárcava es que quede como cuando se cierra un relleno sanitario, en donde no se ve ningún rastro de lo que fue antes.

Figura 4.4.6.9: Medidas de la cárcava 13



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.9: Cárcava 4



Figura 4.4.10: Cárcava 12

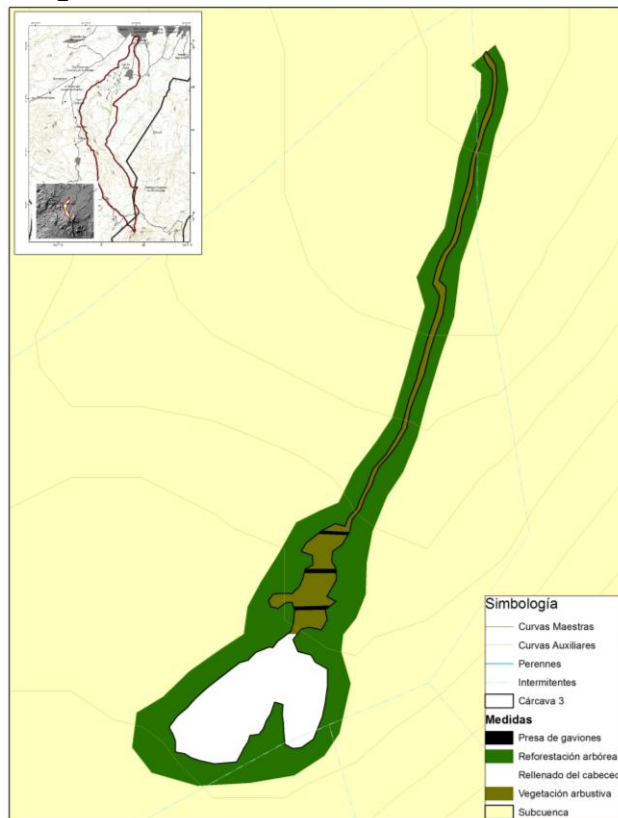


Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

Las figuras 4.4.9 y 4.4.10 muestran como estas cárcavas tienen escasa o nula vegetación, factor que hace que sigan en crecimiento.

Mientras que las cárcavas 3, 4 y 12, en primera instancia se debe reforestar las partes alta y laterales de la cárcava, conjuntamente ubicar presas de gaviones con una cierta separación entre cada una de ellas y colocándolas del mismo tamaño pero pegadas a las paredes de la cárcava, con esto se busca que esta cárcava se recupere de dentro hacia afuera y viceversa.

Figura 4.4.6.10: Medidas de la cárcava 3



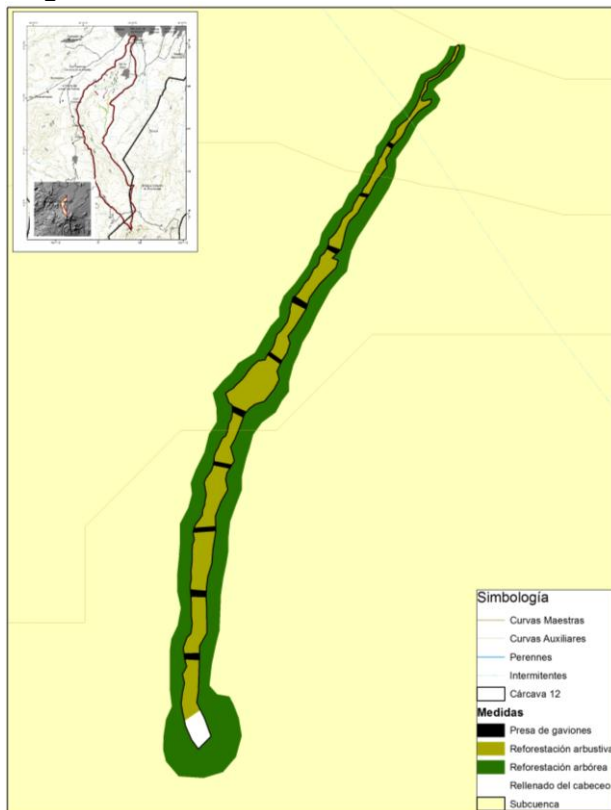
Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.6.11: Medidas de la cárcava 4



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

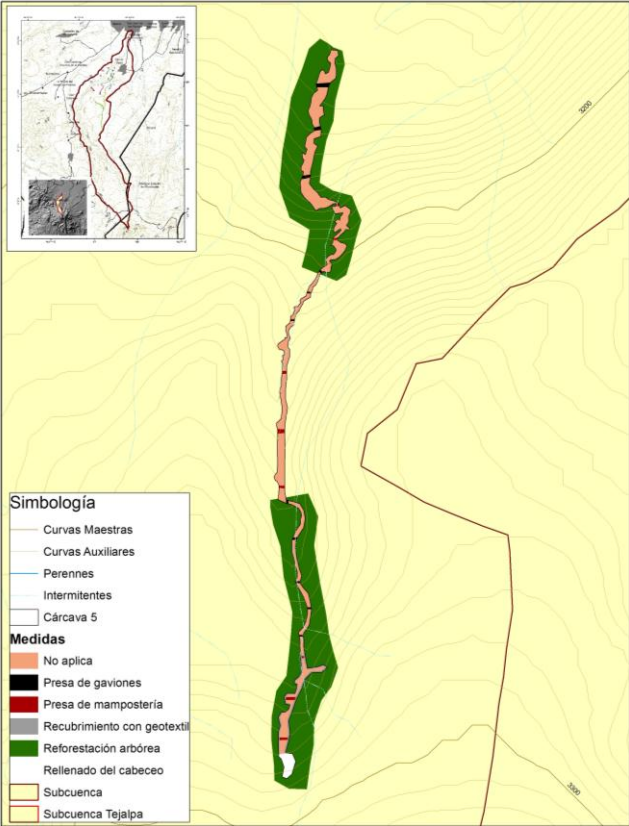
Figura 4.4.6.12: Medidas de la cárcava 12



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

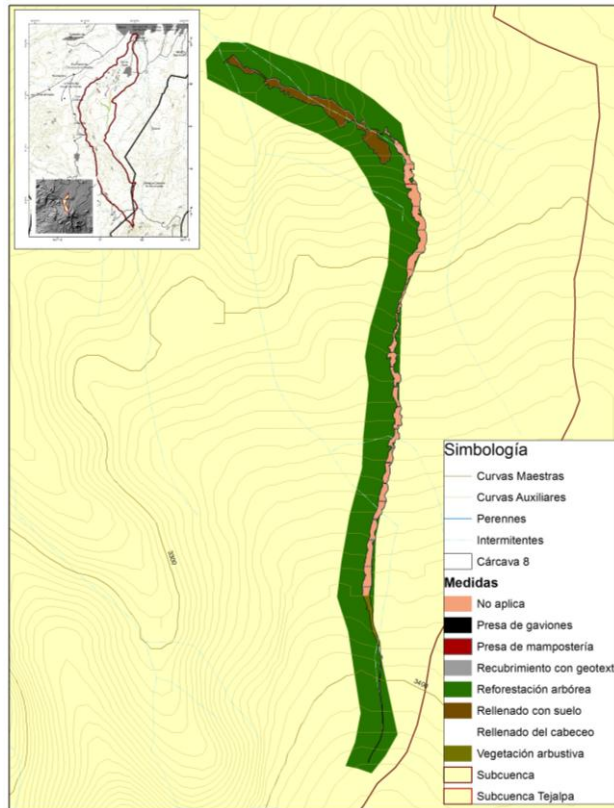
Para las cárcavas gigantes, que son la 5 y 8, su solución es vía ingeniería por su dimensión, en ambas existe poca o nula vegetación arbustiva haciendo todavía más difícil su recuperación, pero al momento de aplicar las medidas estructurales para su control y recuperación, a la par se tienen que hacer reforestaciones en la perimetral de las cárcavas.

Figura 4.4.6.13: Medidas de la cárcava 5



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.6.14: Medidas de la cárcava 8



Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo (2014) y bibliografía

Figura 4.4.11: Cárcava 5



Figura 4.4.12: Cárcava 8

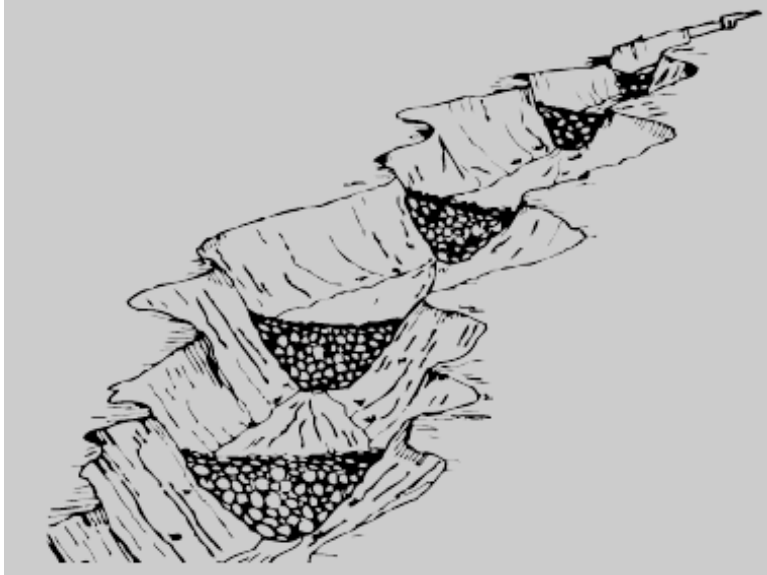


Fuente: Imágenes tomadas en trabajo de campo, 2014

En las figuras 4.4.11 y 4.4.12 se ilustran las cárcavas que deben de ser controladas vía medidas estructurales, puesto que su magnitud que tienen en tamaño es la única forma en que podrían ser controladas.

Los intentos de control que se han hecho en estas dos cárcavas han sido insuficientes e incluso mal planeadas, ya que han sido sobrepasadas las presas de gaviones por la corriente del agua, lo que se tiene que hacer es cubrir las paredes con material geotextil, de manera paralela realizar presas de gaviones en la parte inicial de la cárcava con una altura igual al de la profundidad de la cárcava, en forma de muros pero que hagan la función de un dique, es decir, que vayan desfogando el agua de una manera constantes y con eso poder bajarle la velocidad al caudal, se recomiendan poner presas de mampostería hidráulica, después colocar las presas de gaviones en los taludes, es decir de manera paralela a estas, haciendo que el caudal solamente vaya por la parte central y a una baja velocidad y no haga que se expanda transversalmente y longitudinalmente la cárcava; de manera paulatina con estas acciones se va a ir recuperando de manera natural con la vegetación arbustiva que comience a crecer dentro de la cárcava, a fin de recuperarse en algunos años.

Figura 4.4.13: Control de la cárcava a lo largo del perfil longitudinal



Fuente: FAO, 1977

La figura 4.4.13 ejemplifica la manera en que deben de ser colocadas las presas de mampostería en las cárcavas 5 y 8, para que puedan reducir la fuerza del torrente.

Todas las cárcavas sin excepción alguna se encuentra en las cercanías o en las limitantes de los cultivos, por lo cual este criterio tomado se aplica para todas, ya que en algunas es menor el contacto con estas áreas pero no deja de existir el contacto.

Algo que se debería de hacer en todas las cárcavas existentes en la zona, es el respetar las corrientes perennes e intermitentes, es decir, no ocupar 10 m de cada lado de una corriente intermitente y 20 m si es perenne; esto ayudaría de una manera significativa a que el proceso de formación o crecimiento de cárcavas disminuya, puesto que esos metros se pueden usar para la plantación de especies arbóreas, impidiendo que la cárcava avance de manera transversalmente.

Las propuestas que se plantean, la gran mayoría son de una fuerte inversión de capital, es por eso que los ejidatarios deben de participar en programas gubernamentales o pedir apoyo directamente para atender este problema.

Al ser tan costosas se preguntarán si vale la pena a realizar las propuestas, y la respuesta sería si, ya que los resultados que se obtendrían a largo plazo, es decir muy probablemente más de una década como mínimo, es el de dejar los cauces de las corrientes intermitentes a su forma natural, original, es decir de solamente 1 o 2 metros de ancho, que su profundidad ya no sea de más de 10 metros, sino de algunos centímetros o 1 metro, y su longitud no sea de tal magnitud como la que tienen en la actualidad.

Al volver los cauces a su forma original, otro resultado que se vería es el de la recuperación de terrenos cultivables, la recuperación de suelo, ya que no existiría el problema de la erosión hídrica como existe a la fecha, sería notablemente menor, y como consecuencia la producción agrícola sería más eficiente y eficaz.

Otro beneficio que se tendría, pero que es poco perceptible es que al momento de reforestar algunas zonas que se encuentran dentro de las medidas, es que permiten que existan servicios ambientales, que daría el propio ambiente, como el oxígeno, permitiría la infiltración del agua y ya no escurriría a la magnitud que escurre, daría servicios maderables, pero teniendo en cuenta que si se va a talar, se tendría que reforestar el lugar o lugares deforestados.

En el caso que no se realizarán las medidas propuestas, el panorama sería completamente diferente, ya que en primer lugar los cauces de las corrientes intermitentes no volverían a su forma natural, al contrario seguirían aumentando a la par de la cárcava.

En segundo lugar y como consecuencia del crecimiento de las cárcavas, se seguiría perdiendo suelo y terrenos cultivables, lo cual diezmaría de forma importante los beneficios económicos que los ejidatarios tienen de la producción agrícola.

Debido a que seguirían creciendo las cárcavas, pondrían en situación de peligro a los habitantes que tengan sus viviendas cercas a estas formaciones, de igual manera a los ejidatarios que vayan a sus terrenos de cultivo.

Finalmente no existirían servicios ambientales, puesto que no habría medidas para el control y recuperación de las cárcavas.

Cabe señalar que para la construcción de las obras estructurales y las reforestaciones es necesario el apoyo de ingenieros civiles, ingenieros forestales e ingenieros agrónomos.

CONCLUSIONES

Los estudios de procesos erosivos y más específicamente la formación de cárcavas por erosión hídrica son importantes, ya que como se menciona a lo largo del trabajo de investigación, es un problema que aqueja no solamente la zona de estudio sino toda la superficie que contempla el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), al igual que otras áreas con características similares; hecho que toma relevancia al encontrarse en un área protegida, puesto que no deberían de encontrarse este tipo de formaciones ya que se tiene o tienen programas de manejo para cada ANP que entre sus objetivos está preservar el ambiente lo menos antropizado que se pueda, es decir, que dichas áreas deben de funcionar como un sistema complejo que se encuentre en perfecto equilibrio entre la sociedad y el medio ambiente, algo que en la zona de estudio no ocurre y debería de serlo.

Más allá del lugar donde se ubique, la sociedad debe de tener conciencia que debe de cuidar el ambiente, ya que este le provee lo que necesita para desarrollar sus actividades económicas y que si se ve alterado por influencia humana, van a generar problemáticas.

El cambio de uso del suelo que se dio hace décadas en la subcuenca fue el principal factor para que se comenzaran a formar las cárcavas, aunado esto el material que constituye la zona, morfometría y actividades antrópicas, fue lo que provocó que el problema se incrementara.

De las cárcavas presentes, con base en los resultados obtenidos en los dos periodos de mediciones, todas tuvieron crecimiento longitudinal, el cual va desde los 30 centímetros hasta los 4 metros, es decir, el cauce sigue avanzando y aunque exista vegetación en algunas de ellas y aminore la fuerza de la corriente, todavía tiene una dinámica erosiva, cabe señalar que donde solamente creció algunos centímetros son cárcavas pequeñas y/o que tienen vegetación dentro, ya que las que crecieron metros tienen ausencia de esta y son de tamaño grande y gigante.

Mientras que en lo que correspondió al crecimiento de la sección transversal, las cárcavas 1, 7, 9, 10, 11 y 14, tuvieron una reducción, esto principalmente porque existe algo de vegetación arbórea en la zona adyacente a los taludes de la formación que fija el suelo y evita su desprendimiento con la acción de la lluvia, y que aparte cuentan con vegetación dentro. El resto de las cárcavas tuvieron crecimiento, debido a que no cuentan con vegetación dentro ni en la zona adyacente a los taludes.

Las tasas de crecimiento de profundidad es el parámetro que debe de preocupar más, debido a que en un periodo de 6 meses, existieron cárcavas que profundizaron llegando por encima de los dos metros (8, 12 y 13), y una casi a los cuatro metros (3).

Por otra parte también hubo cárcavas con un decremento en su profundización; como fue la 14 por arriba del metro, otras más de los 0.50 centímetros (7, 9, 10 y 11). En total 6 cárcavas se recuperaron en cuanto a su profundidad, mientras que 8 profundizaron y no tuvieron recuperación.

De una forma general ninguna cárcava tuvo recuperación en los tres campos (longitud, sección transversal y profundidad), pero si existieron algunas que cumplían dos campos, las cuales fueron la 1, 7 y 14; en donde cabe destacar que la 1 se encuentra cubierta totalmente por vegetación mixta (arbórea-arbustiva) lo cual ayudó a que se dieran estos resultados, mientras que las otras dos el factor que les ayuda es su tamaño, puesto que son pequeñas y cuentan con un cierto porcentaje de vegetación.

Todo lo contrario con las cárcavas 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 y 13, las cuales no tuvieron recuperación en ninguno de los campos, siendo la 3, 5, 8, 12 y 13 las de mayor impacto en su crecimiento.

De acuerdo al mapa de zonas susceptibles a erosión hídrica en la subcuenca, en donde se ubican las cárcavas son zonas con valores de medio a muy alto en

cuanto a la susceptibilidad, el valor medio este valor ya es susceptible porque la información utilizada ya es erosionante puesto a que se toman en cuenta elevaciones con pendientes moderadas, suelos muy porosos que permiten que se infiltre el agua o que el agua se lleve el suelo, aunado a esto la presencia de cultivo y de falta de vegetación arbórea; en el valor alto las variables claves las pendientes, la precipitación y el uso de suelo, ya que todo tiene relación en el sentido que se van interrelacionando partiendo desde la geomorfología, que en este caso es el piedemonte; y el valor muy alto es en gran medida susceptible porque existe una alta cantidad de corrientes intermitentes, las cuales se activan en temporada de lluvias, otro elemento es la pendiente, las cuales son de moderadas a fuertes, el tipo de suelo el cual es Feozem, dando como característica principal que es altamente erosionable al agua, y como último elemento se tiene el uso del suelo, que en su mayoría es cultivo de papa, lo cual justifica su existencia, más no el de haberse formado, ya que eso fue por acciones antrópicas a lo largo de los años.

Es importante señalar que la zona debido a que es muy susceptible a la erosión hídrica, pueden formarse más cárcavas de las ya existentes, es por eso que se deben de tomar acciones de manera inmediata para poder tener resultados a mediano y largo plazo, principalmente.

Con base en las medidas realizadas a las cárcavas y bibliografía consultada, se realizaron propuestas que pueden controlar y en una segunda etapa su recuperación. Las medidas propuestas deben de ser aplicadas en su totalidad, es decir por ejemplo en la cárcava 9, se tienen que realizar todas sus medidas las cuales son presa de gaviones, reforestación arbustiva, reforestación arbórea y rellenado del cabeceo; asimismo deben de ser hechas en orden sistemático, no se puede realizar la reforestación arbustiva sin antes haber rellenado el cabeceo y hacer las presas de gaviones. El orden debe de ser rellenado del cabeceo a la par con la reforestación arbórea, presas de gaviones y finalmente la reforestación arbustiva.

La utilidad de los SIG es muy amplia, ya que cubre cualquier temática y su uso da mucha eficiencia al proyecto en el que se está trabajando. En este trabajo formaron parte fundamental para obtener procesos, así como poder realizar los resultados que se presentaron.

Como ya se mencionó, cada temporada de lluvias hace que las cárcavas sigan creciendo tanto de manera longitudinal, transversal y de profundidad y es por eso que se recomienda en primer lugar seguir haciendo estudios de la misma temática, donde se abarquen otras zonas que tienen el mismo problema y así poder saber si se comportan de forma similar o completamente diferente, para poder hacer comparaciones entre varias zonas de estudios con la misma problemática.

El esquema de trabajo y métodos empleados para este trabajo, podrían ser aplicables a otras zonas que cuenten con características similares a la que tiene la Subcuenca La Fábrica.

Se recomienda realizar las medidas propuestas en el trabajo, que a su vez se aconseja que se consulte con ingenieros civiles, ingenieros agrónomos e ingenieros forestales, para que las medidas se realicen de manera adecuada en base a medidas y cálculos que se tengan que realizar.

De igual manera, para poder obtener el capital se aconseja que el ejido pida ayuda a las autoridades correspondientes y se les explique el problema y el trabajo que se desea realizar, así como los beneficios que tendrían los actores involucrados (autoridades, ejidatarios, medio ambiente).

Para poder obtener árboles y a la vez apoyo económico se aconseja que el ejido se inscriba en programas que ofertan PROBOSQUE Y CONAFOR para la reforestación y ya una vez reforestadas algunas partes poder participar en convocatorias de pago por servicios ambientales.

Se hace hincapié que se hagan reuniones de ejidatarios para que se definan las acciones que se van a realizar, al igual que los tiempos de cada acción y la responsabilidad que va a tener cada ejidatario o grupo de ejidatarios para llevar a cabo las acciones que van desde el gestionar la ayuda hasta el monitoreo de las acciones, es decir, que se mantengan y no se dejen al olvido una vez ya realizadas.

El ejido debe o se recomienda que involucre a otros actores como a los visitantes que llegan a ir a la zona, así como a instituciones como universidades, Organizaciones No Gubernamentales (ONG's), para tener más apoyo no tanto económico, sino de labor social, como sería el de ayudar en las reforestaciones o vigilar que no se deforeste en las partes aledañas a las cárcavas, principalmente.

Finalmente se recomienda que los ejidatarios y el medio ambiente vuelvan a tener un equilibrio que va a ser benéfico para ambas partes y sobre todo para la subcuenca, que es en donde se localizan estos dos actores, porque si se tiene este equilibrio las medidas propuestas van a rendir frutos de una manera más rápida a como se encuentra la zona hoy en día.

Referencias bibliográficas

Almoroz, J. *et al.* (1984) "Métodos de estimación de la erosión hídrica". Editorial Agrícola Española, S. A. Madrid, España.

Ayuga, E. (2010) "Análisis de datos multivariante". DF, México.

Bragagnolo, N. *et al.* (1885) "Guía de manejo y conservación de suelos y agua". Food and Agriculture Organization (FAO).

Boada, M y Sauri, D. (2002) "El Cambio Global". Editorial Rubes. Barcelona, España.

Bocco, G. *et al.* (2010) "Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. Planeación territorial". Instituto Nacional de Ecología (INE).

Bocco, G. (2007) Reflexiones sobre Geografía, Ambiente y Geografía Ambiental. Presentación visual de la ponencia ofrecida en la Cátedra de Geografía Humana. Editorial Elisée Reclus. México DF.

Buzai, G. D y Baxendale, C. (2006) "Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica". Editorial Lugar. Buenos Aires, Argentina.

Carabias, J. *et al.* (2005) "Agua, medio ambiente y sociedad". UNAM, Colegio de México. México.

Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) (1994) "Erosión. Fascículo 8". Secretaría de Gobernación. DF, México.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), (2013) "Borrador del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca".

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2004) "Programa de Manejo del Parque Nacional Nevado de Toluca".

Cotler, H. (2004) "El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental". Instituto Nacional de Ecología (INE).

Cotler, H. *et al.* (2013) "Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión". Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Estrada, D. y Quintero, M. (2004) "Propuesta metodológica para el análisis de cuenca: una alternativa para corregir las deficiencias detectadas en la implementación del pago por servicios ambientales". CONDESAN y CIAT.

Fregoso, A. y Esquivel, N. (2009) "Cambios de uso del suelo". Instituto Nacional de Ecología (INE).

Food and Agriculture Organization (FAO), (2010) "Suelos. Estructura del suelo".

García, E. (1988) "Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)". Editorial Offset Larios S.A. DF, México.

Galárraga, R. *et al.* (2009) "Indicadores biofísicos, socio-económicos e institucionales y desarrollo de políticas de manejo sustentable del agua en una zona seca de los andes centrales del Ecuador. Caso de estudio de la cuenca del río Ambato".

Gaspari, F. *et al.* (2011) "Vulnerabilidad ambiental que existe en las cuencas hidrográficas serranas mediante los sistemas de información geográfica". Universidad Nacional de la Plata.

Gobierno del Distrito Federal y Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (2008) "Términos de Referencia del Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de las subcuencas del Río Magdalena y Eslava".

Gobierno del Estado de México. Secretaría del Medio Ambiente (2010) “Anteproyecto: Conservación y Rehabilitación de los Recursos Suelo y Agua de la CARL. Región 1: Nevado de Toluca. Plan Maestro para la Restauración Ambiental de la Cuenca Alta del Río Lerma”.

Gobierno del Estado de México. Secretaría del Medio Ambiente (2008) “Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México”.

Gutiérrez, M. (2008) “Geomorfología”. Editorial Pearson Prentice Hall. Madrid, España.

Instituto Nacional de Ecología-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT) y Universidad Autónoma de Chapingo (UAC) (2007) “Formulación de indicadores para calcular y monitorear la desertificación en México”. SEMARNAT. México.

Johansen, O. (2004) “Introducción a la Teoría General de Sistemas”. Editorial Limusa. México.

Keller, E. y Blodgett, R. (2004) “Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra como Riesgos, desastres y catástrofes”. Editorial Pearson. España.

Kirkby, M. y Morgan, J. (1984) “Erosión de suelos”. Editorial Limusa. México.

León, J. (2001) “Estudio y control de la erosión hídrica”. Universidad Nacional de Colombia.

Lugo, J. (1988) “Elementos de Geomorfología Aplicada. (Métodos cartográficos)”. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Lugo, J. (1989) “Diccionario Geomorfológico”. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Lühmann, N. (1996) "Introducción a la Teoría de Sistemas". Universidad Iberoamericana. México.

Luna, P. *et al.* (2009) "Las Aguas Celestiales: Nevado de Toluca". Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). México.

Macías, J. (2005) "Geología e Historia eruptiva de alguno de los grandes volcanes activos de México". Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Maderey, L. (2001) "Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México". Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México..

McKnight, Tom. y Hess, D. (2000) "Climate Zones and Types. Physical Geography: A Landscape Appreciation. Upper Saddle River, NJ": Prentice Hall.

Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (2010) "Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales". República de Colombia.

Morgan, R. (1997) "Erosión y conservación del suelo". Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Mostacedo, B. y Fredericksen T. (2000) "Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal". Santa Cruz, Bolivia.

Núñez, J. (2001) "Manejo y Conservación de Suelos". Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.

Ortega, J. (2000) "Las herramientas de la geografía. Teoría de la geografía". Editorial Ariel. Barcelona, España.

Reyes, A. *et al.* (2007) "Geomorfología del Parque Nacional Nevado de Toluca". Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México.

Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. (1978). Calidad Ambiental y Desarrollo de Cuencas Hidrográficas: Un Modelo para Planificación y Análisis Integrados. Washington, D.C.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2009). Control de Cárcavas. México.

Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México (SEGEM) (1995). Prácticas de conservación del suelo y el agua para un desarrollo sustentable. Autor. México.

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2013). Modelo de Unidades Geomorfológicas para la Representación Cartográfica de Ecosistemas. Quito, Ecuador.

Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Agricultura de los E.U.A. (1980) "Manual de Conservación de Suelos". Editorial Limusa. México.

Von Bertalanffy. L. (1976) "Teoría General de Sistemas: Fundamentos, Desarrollo y Aplicaciones". Fondo de Cultura Económica. Estados Unidos.

Referencias electrónicas

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010). Estaciones climatológicas y meteorológicas y base de datos, 2010.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010) Censo de Población y Vivienda, 2010.

<http://www.inegi.org.mx/>

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), 2012.

Ley de Aguas Nacionales (LAN), 2012.