

**PROGRAMA DE MANEJO DE LA MICROCUENCA DE LA BARRANCA DE
CHALCHIHUAPAN.**

CARACTERIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO FÍSICO



20 de diciembre de 2017



Ing. Oscar M. Pohle Morales
opohle@gmail.com

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	7
I. ANTECEDENTES	13
II. INTRODUCCIÓN.....	14
III. OBJETIVOS.....	15
3.1. Objetivo general	15
3.2. Objetivos particulares del estudio.....	15
IV. CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	16
4.1. Localización.....	16
4.2. Clima	18
4.3. Edafología.....	19
4.3.1. Acrisoles	20
4.3.2. Andosoles	20
4.3.3. Fluvisoles.....	21
4.3.4. Gleysoles	21
4.3.5. Litosoles.....	22
4.4. Fisiografía.....	23
4.5. Geología.....	27
4.5.1. Evolución geológica regional	27
4.5.2. Descripción cronoestratigráfica de la región	30
4.5.3. Breve reseña de la geología histórica regional	35
4.5.4. Geomorfología.....	38
4.5.5. Geología.....	49
4.6. Hidrología.....	61
4.6.1. Meteorología.....	61
4.6.2. Balance hídrico	79
4.6.3. Balance hidrológico.....	86
4.6.5. Determinación de caudales máximos o pico	93
V. MARCO SOCIAL	98
5.1. Población	98
5.2. Marco socio-económico	102
5.2.1. Actividades productivas	102
5.2.2. Grado de marginación	108
VI. USO DEL SUELO	110
6.1. Uso actual del suelo.....	110
6.2. Dinámica de uso del suelo	125
VII. DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA.....	128
7.1. Situación actual del manejo del agua	128
7.1.1. Agua superficial.....	129
7.1.2. Agua subterránea	142
7.1.3. Consumo y dotación de agua potable.....	144
7.1.4. Disponibilidad del recurso hídrico	146
7.1.5. Generación de aguas residuales.....	147
7.2. Generación de residuos sólidos urbanos	149
7.2.1. Generación per-cápita en la microcuenca.....	149
7.2.3. Análisis de subproductos	151
VIII. ZONIFICACIÓN Y MANEJO DE LA MICROCUENCA.....	152
8.1. Criterios de zonificación.....	152

8.1.1. Zonificación de peligros geológicos.....	153
.....	156
8.1.2. Zonificación ambiental.....	161
8.2. Propuesta de manejo de la microcuenca.....	168
Bibliografía.....	169

Índice de Figuras

Figura 1. Localización, límites y subdivisión hidrológica de la microcuenca de Chalchihuapan	17
Figura 2. Climas de la microcuenca de Chalchihuapan.....	19
Figura 3. Carta edafológica de la microcuenca de la Barranca de Chalchihuapan	23
Figura 4. Subprovincias de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Fuente: Formado a partir de datos vectoriales del INEGI.	24
Figura 5. Subdivisiones de la Faja Volcánica Transmexicana. Fuente: Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Arturo Gómez-Tuena. et. al.; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVII, Núm. 3, 2005, p. 227-283.	25
Figura 6. Localización del Campo Volcánico Chichináutzin, ubicado dentro de la Provincia Geológica Faja Volcánica Transmexicana. Fuente: A partir de modelo digital de elevación elaborado para este informe.....	27
Figura 7. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su relación con la zona de subducción Placa de Cocos – Placa Norteamericana. Fuente: Adaptado de A. Demant., Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. UNAM, Instituto de Geología, Revista, vol. 2, núm. 2 (1978), p.172 -187.....	28
Figura 8. Mapa geocronológico regional, elaborado a partir de datos isotópicos, estratigráficos e interpretación morfológica – estructural.	29
Figura 9. Evidencias de erosión glacial en estratovolcán Cerro La Corona.....	33
Figura 10. Origen de las “Lagunas de Zempoala” (del náhuatl, “veinte lagunas”), por bloqueo de los escurrimientos naturales de la vertiente oriental de la Sierra de Zempoala. Fuente: O. Pohle, 2006. Estudio geohidrológico para el diagnóstico ambiental, rescate y rehabilitación de las lagunas de Quila y Hueyapan, Municipio de Huitzilac, Estado de Morelos. CRIM, UNAM.	35
Figura 11. Geomorfología de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.....	42
Figura 12. Carta geológica de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.	58
Figura 13. Secciones geológicas transversales de la microcuenca.....	59
Figura 14. Localización de estaciones meteorológicas con más de 25 años de registros continuos.....	61
Figura 15. Modelo espacialmente distribuido de precipitación media anual.	82
Figura 16. Modelo espacialmente distribuido de temperatura media anual.....	83
Figura 17. Modelo espacialmente distribuido de evapotranspiración media anual.....	84
Figura 18. Modelo espacialmente distribuido de lámina excedente media anual.	85
Figura 19. Modelo espacialmente distribuido de coeficientes de escurrimiento en la microcuenca.....	86
Figura 20. Morfometría de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.....	91
Figura 21. Fracciones de AGEB que comprende la microcuenca en estudio.....	100
Figura 22. Distribución espacial de establecimientos en la microcuenca por sector productivo.....	107
Figura 23. Distribución del grado de marginación en la microcuenca barranca de Chalchihuapan.	109
Figura 24. Carta de uso actual del suelo en la microcuenca Barranca de Chalchihuapan....	124

Figura 25. Crecimiento histórico de la mancha urbana región norponiente de Cuernavaca 127
 Figura 26. Localización del manantial Tules de Atexcapa, Huitzilac, Mor.131
 Figura 27. Localización del canal El Tepeite, Cuernavaca, Mor.132
 Figura 28. Localización del manantial Quetzalcóatl133
 Figura 29. Localización de los manantiales 1 y 2, barranca El Salto.....136
 Figura 30. Localización de descargas de aguas residuales.....142
 Figura 31. Localización de pozos de agua potable en la microcuenca.....144
 Figura 32. Red de captación de aguas residuales.148
 Figura 33. Mapa de zonificación de peligros geológicos en la microcuenca.....153
 Figura 34. Áreas naturales protegidas que se encuentran dentro de la microcuenca.161
 Figura 35. Zonificación de la microcuenca, según políticas de UGAs definidas en el POET del municipio de Cuernavaca.166
 Figura 36. . Sobreposición de zonificación de UGA's y peligros geológicos.....167

Índice de gráficas

Gráfica 1. Distribución porcentual de suelos en la microcuenca Barranca de Chalchihuapan22
 Gráfica 2. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.65
 Gráfica 3. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1939 – 2002, en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.66
 Gráfica 4. Registro diario de temperaturas máxima y mínima durante la serie: 1939 – 2002, en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.67
 Gráfica 5. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1939 – 2002, Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.....68
 Gráfica 6. Balance hídrico en la Estación 17002, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.69
 Gráfica 7. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.70
 Gráfica 8. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1961 – 2000, en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.71
 Gráfica 9. Registro diario de temperatura durante la serie: 1961 – 1992, en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.72
 Gráfica 10. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1961 – 2000, Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.73
 Gráfica 11. Balance hídrico en la Estación 17009, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.74
 Gráfica 12. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.75

Gráfica 13. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.	76
Gráfica 14. Registro diario de temperatura durante la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.	77
Gráfica 15. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.	78
Gráfica 16. Balance hídrico en la Estación 15173, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.	79
Gráfica 17	87
Gráfica 18. Curvas hipsométricas adimensionales, características del ciclo de erosión (Strahler).....	92
Gráfica 19. Hipótesis fundamental de la fórmula racional.....	94
Gráfica 20. Curva intensidad-duración-tiempo de retorno microcuenca Barranca Chalchihuapan.	97
Gráfica 21. Crecimiento histórico de la población de Cuernavaca. Fuente: Censos de Población y Vivienda, INEGI.....	98
Gráfica 22. Proyección demográfica del municipio de Cuernavaca estimada por diferentes métodos.....	99
Gráfica 23. Porcentaje por sector productivo.	103
Gráfica 24. Distribución porcentual de usos del suelo.	125
Gráfica 25. Incremento histórico porcentual de área urbana en la microcuenca.....	128
Gráfica 26	160
Gráfica 27. Distribución territorial de ANPs y uso actual del suelo.	163

Índice de fotos

Foto 1. Formación Tepoztlán. Margen derecha barranca de Mexicapa.	51
Foto 2. Sierra de Zempoala. Vista desde el cerro Cuahutépétl hacia el cerro El Campanario. Al fondo, el cerro La Doncella.	52
Foto 3. Depósito de flujos de derrubios cubierto por toba basáltica (“tepetate”), asignado a la Formación Cuernavaca (facies Glacis). Corte expuesto en el puente Lomas de Ahuatlán.	53
Foto 4. Frente de lava andesítica-basáltica en margen derecha de la barranca de Chalchihuapan. Nótese el fracturamiento por enfriamiento que asemeja burdamente una disyunción columnar.....	54
Foto 5. Depósitos fluviales en cauce de la barranca de Chalchihuapan	54
Foto 6. Corte en depósitos de avalancha, originados por falla en ladera. Nótese la inclinación de árboles y arbustos que indican el movimiento activo o reptación de los escombros.....	55
Foto 7. Acumulación de bloques rocosos por desprendimiento en ladera. Margen derecha barranca de Chalchihuapan.....	56
Foto 8. Invasión de zona federal por barda perimetral. Obsérvese el desplome del muro a pesar del muro de retención y defensa construido al pie del mismo. Margen izquierda de barranca Chalchihuapan.	57
Foto 9. Vista norte de la barranca chalchihuapan. Nótese el grado de conservación de la cobertura arbórea.	111
Foto 10. Fraccionamiento y hostel en Calle Tepeite, Sta. María Ahuacatlán.	112
Foto 11. Zona de cultivo en planicie aluvial El Tepeite.....	113

Foto 12. Zonas de cultivo en superficies cumbrales.....	113
Foto 13. Asentamiento irregular en zona forestal del COBIOCH.....	114
Foto 14. Reducción de sección hidráulica por invasión de zona federal, colonia Rancho Cortés.....	115
Foto 15. Instalaciones de bombeo en margen derecha de barranca Chalchihuapan, colonia Jardín Tetela.	116
Foto 16. Descarga de agua residual “Casa Blanca”.....	117
Foto 17. Paseo rivereño en margen izquierda de Chalchihuapan, colonia Bellavista.	118
Foto 18. Cascada Tetela. Nótese el basalto columnar similar al de San Antón.	119
Foto 19. Cascada Agua Azul	120
Foto 20. Cascada Los Reyes.....	121
Foto 21. Cascada Quetzalcóatl, barranca Chalchihuapan.....	122
Foto 22. Cascada El Salto, barranca El Salto.	123
Foto 23. Pequeño almacenamiento y caseta de bombeo. Margen izquierda barranca Chalchihuapan.	134
Foto 24. Estanque para crianza de truchas. Margen izquierda barranca de Chalchihuapan.	134
Foto 25. Manantial de ladera en contacto geológico, barranca El Salto	135
Foto 26. Vista del deplorable paisaje que se ofrece al visitante a lo largo de esta hermosa barranca.	137
Foto 27. Instalación rústica abandonada, presuntamente destinada para servicios ecoturísticos.	138
Foto 28. Manantial Tepehuajes, Santa María Ahuacatlán.....	139
Foto 29. Cauce del arroyo Tepehuajes, afluente de la barranca Chalchihuapan.	140
Foto 30. Sedimentos lacustres del antiguo Lago de barrera Atexcapa, Huitzilac, Mor.	154
Foto 31. “Hornito” en colada de lava. Brecha Tepeite, Huitzilac, Mor.	155
Foto 32. Reptación de suelo. Nótese la inclinación de los árboles situados en la ladera. Margen derecha barranca de Chalchihuapan.....	156
Foto 33. Deslizamiento de suelo en ladera de barranca.	157
Foto 34. Depósito de flujo de escombros en cauce de barranca.....	157
Foto 35. Escarpe inestable en ladera de barranca, por intenso fracturamiento en colada de andesita basáltica. Margen derecha barranca Chalchihuapan.	158

FORMA DE CITAR ESTE DOCUMENTO: Pohle, O., 2017. Caracterización y diagnóstico físico de la microcuenca hidrológica barranca de Chalchihuapan. En PROGRAMA DE MANEJO DE LA MICROCUENCA DE LA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN. Fundación Biósfera del Anáhuac, A.C., Fundación Doster, A.C., Fundación Río Arronte, IAP. 170 p. + anexos.

RESUMEN EJECUTIVO

La Microcuenca de la Barranca de Chalchihuapan (MBCh) se localiza en la zona norponiente del Estado de Morelos, forma parte de la cabecera de la microcuenca del Río Apatlaco y por lo tanto, de la cabecera de la cuenca del Río Balsas. Se ubica entre los municipios de Cuernavaca y Huitzilac en el estado de Morelos y el municipio de Ocuilan que pertenece al Estado de México. Delimitada por la vertiente sur de las sierras de Zempoala y Chichináutzin, donde se originan las numerosas barrancas que caracterizan la zona norponiente del estado de Morelos y particularmente a la ciudad de Cuernavaca, la MBCh se forma a partir de la confluencia de las barrancas de El Tepeite y El Salto, por cuyos profundos cauces fluyen corrientes perennes, alimentadas por numerosos manantiales que surgen en sus laderas que cortan el nivel freático. Aún antes de dicha unión, la mayor parte del caudal surgente es captado por canales y ductos improvisados que disminuyen sensiblemente su caudal, derivándolo hacia obras de almacenamiento que abastecen de agua potable a las poblaciones de Santa María Ahuacatlán y Tetela del Monte; siendo en esta última, donde además el agua se utiliza principalmente para el riego de plantas de ornato; que constituyen la principal actividad económica de la zona. Además de lo anterior, también a partir de la confluencia descrita, inician las descargas de aguas residuales domiciliarias, municipales y de estanques acuícolas, que, aunados al crecimiento poblacional y cambio de uso del suelo, van contribuyendo a su contaminación conforme la corriente se interna dentro de la zona urbana; incrementándose aún más, por la disposición inadecuada de residuos sólidos que realizan los habitantes en ambas márgenes. De esta forma, la calidad de sus aguas originalmente prístinas va decayendo, recibiendo por margen izquierda las aguas negras de la barranca de San Pedro, a la altura de Tlaltenango; y más adelante, por su margen derecha, las contaminadas aguas de las barrancas de Ahuatlán, Tzompantle, Coyuca, Atzingo y Sacatierra, que colectan residuos sólidos y aguas servidas de la población situada dentro de sus nanocuecas, para precipitarse en la otrora célebre cascada de San Antón. Según lo expuesto, el propósito del presente estudio consiste en caracterizar las condiciones físicas de la microcuenca y el diagnóstico de los impactos ambientales que le afectan, para establecer las bases de una planificación que permita su protección, restauración y desarrollo sustentable. La zona de captación de Chalchihuapan, es parte fundamental de los recursos hídricos que sustentan a la población, biodiversidad, el paisaje y el microclima de la ciudad de Cuernavaca; particularmente,

contribuye con el abastecimiento de agua potable de un importante número de habitantes que pueblan el norponiente del municipio de Cuernavaca.

La MBCh Tiene una extensión aproximada de 37.792 km² - considerando sus límites hidrológicos, los cuales no necesariamente coinciden con la divisoria hidrográfica - y desciende desde una altitud de 3,391 msnm hasta los 1,668 msnm. La MBCh se origina en la Serranía de Zempoala, la cual se ubica en territorio de dos estados y tres municipios. El 61.99% de su territorio pertenece al municipio de Cuernavaca, el 25.86% a Huitzilac en el estado de Morelos y un 12.13% al municipio de Ocuilan en el Estado de México. Dentro de la MBCh se encuentran cuatro formaciones geológicas principalmente; la formación Tepoztlán, Andesita Zempoala, Formación Cuernavaca y Grupo Chichinautzin. La Microcuenca se localiza en la zona con mayor precipitación pluvial anual del estado de Morelos, con un promedio anual de 1,553 mm. Considerando el balance hídrico espacialmente distribuido, el volumen medio anual de escurrimiento natural en toda la cuenca de captación es de 13.228 hm³. Con respecto al nivel base de flujo superficial por cuenca propia, el promedio aforado con flujómetro digital en el río Chalchihuapan, (incluyendo el canal de El Tepeite y el arroyo El Salto), fue de 73.24 l.p.s. durante la época de estiaje. De acuerdo con información de CONAGUA, el volumen concesionado de agua superficial en la microcuenca es de 2.29 hm³ al año, lo que equivale a 72.6 l.p.s., de los cuales, el 50% es para uso público urbano, el 28% para uso agrícola, y 22% para uso acuícola. En el caso particular del volumen concesionado para uso agrícola, se tiene destinado un volumen de 662,780.00 m³/año, equivalentes a 21.01 l.p.s., para una superficie de riego de 100 hectáreas. Asumiendo que el gasto total aforado durante el estiaje del año 2017 en los arroyos y manantiales de la microcuenca fue de 73.24 litros por segundo; y que, el gasto concesionado es de 72.6 litros por segundo; existe un excedente de 0.64 l.p.s., que es claramente insuficiente como caudal ecológico y debe considerarse sin disponibilidad para nuevas concesiones. La calidad del agua se puede calificar como excelente en la parte alta del río, buena en su parte media, y contaminada a muy contaminada en el área urbana.

Debido a sus características orográficas y extensión, la MBCh muestra tres subgrupos climáticos: Templado, Semifrío, con abundantes lluvias en verano; Templado, subhúmedo; y Semicálido, subhúmedo de humedad media. En el aspecto edafológico y según la clasificación

utilizada por el INEGI, se determinaron 5 grupos y 8 unidades de suelos, siendo el Andosol Húmico y Mólico el más representativo.

Fisiográficamente, la MBCh se inserta íntegramente en la SLVA, dentro del Campo Volcánico de la Sierra de Chichináutzin (CVSC), perteneciente a la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, la cual a su vez ocupa una parte de la Provincia Fisiográfica denominada Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana. A partir de múltiples evidencias geofísicas, el origen de la FVTM y formación de magmas a lo largo y ancho de la misma, se atribuye a la introducción ó subducción de las placas oceánicas de Rivera y Cocos hacia el manto por debajo del continente. Sin embargo, algunos investigadores cuestionan dicha relación debido a peculiaridades petrológicas de las rocas magmáticas, a la notable presencia de una tectónica distensiva asociada al emplazamiento de magmas primitivos.

La historia geológica regional se sintetiza en un largo periodo en el que el territorio morelense estuvo sumergido bajo el mar; y que posteriormente emergió, debido a la dinámica tectónica del planeta, dando lugar a elevaciones constituidas por grandes estructuras sedimentarias plegadas, que posteriormente se afallaron y dislocaron, formando fosas tectónicas que fueron rellenadas por sedimentos continentales y rocas volcánicas de antiguas erupciones. Siguiendo en la evolución geológica de la región, la actividad volcánica ha persistido a lo largo de millones de años, con algunas interrupciones, formándose sucesivamente las sierras de Chalma, Ahuatenco y Tepoztlán cuya litología comprende depósitos de caída, avalanchas de lodo o lahares y depósitos aluviales. Posteriormente, debido al inicio de otro periodo de actividad volcánica, se formó la actual Sierra de Zempoala, de la cual derivó la acumulación de los sedimentos volcanocláticos, lahares y aluviones que forman el Glacis de Buenavista; unidad ésta, donde se desarrolla el amplio sistema de barrancas que caracteriza al municipio de Cuernavaca. De formación más reciente, se tienen las sierras de Las Cruces, Sierra Nevada y Ajusco, iniciando en los últimos 2 millones de años la formación de la Faja Volcánica Transmexicana, siendo el Popocatepetl uno de los primeros volcanes que la formaron.

De edad geológicamente reciente, hace unos 200 mil a 100 mil años, se registró un intenso periodo eruptivo, en el que se formó completamente la cordillera del Chichinautzin, con lo cual se bloqueó totalmente el flujo superficial del antiguo Valle de México hacia Morelos, suspendiéndose la acumulación de sedimentos en el Valle de Cuernavaca y fosas tectónicas asociadas.

Por último, en el periodo comprendido entre 100,000 y 10,000 años, antes del presente, se registró el último periodo eruptivo en la zona norte y noroeste del Estado, destacando el volcán

Pelado situado en los límites entre Morelos y el actual territorio de la Ciudad de México; y también el volcán El Chalchihuites, los cuales produjeron un importante derrame de lava hacia la vertiente sur de la Sierra de Chichináutzin, cubriendo de lava antiguas barrancas; o como en el caso de El Huilote, formando la meseta denominada Mesa de la Gloria, cuya prolongación sobreyace la ladera oriental de la barranca de Chalchihuapan.

En relación con los registros meteorológicos de la microcuenca, fueron seleccionadas tres estaciones que se consideraron como las más representativas de la zona, siendo estas: Estación 17002, Colonia El Empleado; Estación 17009, C.B.T.A., Huitzilac y Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Del análisis de los registros mencionados, se puede establecer que las partes alta y media de la MCBCCh, son la que reciben las mayores precipitaciones y muestran el menor déficit hídrico; lo que indica su alto valor ambiental y necesidad de conservación. Con respecto a la parte baja, se observa un ligero equilibrio positivo, que dependerá del futuro manejo que se tenga en las zonas media y alta de la microcuenca.

Debido a la escasez de datos hidrométricos en amplias zonas de las cuencas del estado, la estimación del manejo de los recursos hídricos fue estimado a partir de la utilización de métodos indirectos, utilizando modelos basados en las características físicas de la cuenca (suelos, relieve, geología, uso del suelo, vegetación), las cuales determinan en gran medida el volumen y variación de los fenómenos hidrológicos.

Desde el punto de vista hidrológico y geohidrológico, la microcuenca de Chalchihuapan reviste especial importancia, ya que capta la lluvia de la zona con mayor precipitación promedio anual en el estado. Esto permite que su cauce tenga un régimen perenne, alimentado por diversos manantiales durante su recorrido y que constituya una fuente importante para la recarga del acuífero de Cuernavaca.

Según el cálculo de proyección del crecimiento de la población para la MBCCh, para el año 2017 se tiene un total de 10, 454 habitantes y para el año 2035, llegará a 12, 439 habitantes, es decir, crecerá un 27% más. La zona que presenta el mayor grado de marginación ocupa prácticamente la parte norte-noroeste de la zona urbana de la microcuenca, convergiendo en los poblados de Tetela del Monte y Santa María Ahuacatlán.

Con respecto al uso actual del suelo, se tiene que la mayor parte se destina al uso forestal (87.4%), siguiéndole el uso urbano (8.4%), considerando predios regulares e irregulares; un 2.9% dedicado a actividades agrícolas, y el 1.3% restante, ocupado por los cauces de las barrancas. Actualmente, la tendencia de expansión se da a expensas de los terrenos comunales

de Santa María, los cuales se encuentran actualmente bajo una fuerte presión especulativa, internándose y fragmentando cada vez más el Corredor Biológico Chichináutzin.

El acelerado crecimiento de la población; la intensa especulación de tierras comunales y ejidales, inducida por las modificaciones al Artículo 27 constitucional; y, la crónica e inexistente planeación urbana, particularmente característica en el estado de Morelos, han traído como consecuencia el deterioro del recurso hídrico, agudizado cada vez más por su sobreexplotación y el vertido de aguas residuales y residuos sólidos urbanos en los cuerpos de agua superficial.

De las mediciones obtenidas con flujómetro digital durante la temporada de estiaje 2017, se tiene la relación de caudales aforados en los manantiales, canales y cauces, que en conjunto sumaron un total de 73.24 litros por segundo (l.p.s.), cantidad muy cercana al volumen concesionado por la CONAGUA que es de 72.60 l.p.s., equivalente a 2.29 hm³ anuales.

Una vez que la barranca de Chalchihuapan se interna dentro de la mancha urbana, se van integrando gradualmente descargas de aguas residuales domiciliarias y más adelante municipales, las cuales van aumentando su caudal cada vez más contaminado. De los recorridos de campo efectuados en el tramo señalado, se identificaron 24 descargas de diversos diámetros, que en conjunto representan un caudal de 129 l.p.s.

En conjunto, se estima que el volumen anual de agua subterránea explotada a través de pozos profundos se aproxima a 1.1 hm³, el cual forma parte del volumen concesionado en el REPDA 2017.

De los datos obtenidos en este estudio, se tiene que existe una disponibilidad de agua superficial de al menos 35.24 l.p.s. derivados del canal El Tepeite; así como el caudal correspondiente a los pozos administrados por el SAPAC, que en conjunto aportan 26.5 l.p.s. Por lo tanto, la suma de dichos caudales, que es de 61.74 l.p.s., excede en un 59% y 34% los requerimientos de dotación calculados para el año 2017 y 2035, respectivamente.

De acuerdo con la CEAGUA, la longitud total de la tubería de alcantarillado sanitario dentro de la microcuenca es de 18.4 km, considerando las atarjeas y colectores existentes en sus diferentes diámetros, lo cual se estima que sólo representa el 42% de la cobertura necesaria en el área de estudio.

La generación de residuos sólidos domiciliarios dentro de la MBCh se estima actualmente en 12.4 toneladas diarias, de las cuales es factible reducir un 61% mediante su manejo adecuado.

La delimitación de peligros geológicos y ANP's, coinciden con algunas discrepancias con la zonificación de la MBCh determinada según políticas de UGA's en el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Cuernavaca; pero es necesario detallar las características de cada UGA urbana y semiurbana a una escala más grande (p.ej. 1 : 5, 000), para definir claramente las zonas de peligro geológico, ajustar la zona federal en las barrancas, consolidar las políticas de uso a que están sujetas; corregir y detener la progresiva invasión de las zonas que han sido determinadas para su protección, conservación y restauración.

I. ANTECEDENTES

La microcuenca de la barranca de Chalchihuapan (MBCh), ocupa una parte importante de la cabecera del río Apatlaco, cuyos límites se extienden fuera del territorio morelense en los estados de México y Ciudad de México.

Delimitada por la vertiente sur de las sierras de Zempoala y Chichináutzin, donde se originan las numerosas barrancas que caracterizan la zona norponiente del estado de Morelos y particularmente a la ciudad de Cuernavaca, la barranca de Chalchihuapan se forma a partir de la confluencia de las barrancas de El Tepeite y El Salto, por cuyos profundos cauces fluyen corrientes perennes, alimentadas por numerosos manantiales que surgen en sus laderas que cortan el nivel freático.

Aún antes de dicha unión, la mayor parte del caudal surgente es captado por canales y ductos improvisados que disminuyen sensiblemente su caudal, derivándolo hacia obras de almacenamiento que abastecen de agua potable a las poblaciones de Santa María Ahuacatlán y Tetela del Monte; siendo en esta última, donde se utiliza principalmente para el riego de plantas de ornato que constituyen la principal actividad económica de la zona.

Además de lo anterior, también a partir de la confluencia descrita, inician las descargas de aguas residuales domiciliarias, municipales y de estanques acuícolas; que, aunados al crecimiento poblacional y cambio de uso del suelo, van contribuyendo a su contaminación conforme la corriente se interna dentro de la zona urbana e incrementándose aún más, por la disposición inadecuada de residuos sólidos que realizan los habitantes en ambas márgenes.

De esta forma, la calidad de sus aguas originalmente prístinas va decayendo, recibiendo por margen izquierda las aguas negras de la barranca de San Pedro, a la altura de Tlaltenango; y más adelante, por su margen derecha, las contaminadas aguas de las barrancas de Ahuatlán, Tzompantle, Coyuca, Atzingo y Sacatierra, que colectan residuos sólidos y aguas servidas de la población situada dentro de sus nanocuenas, para precipitarse en la otrora célebre cascada de San Antón.

Según lo expuesto, el propósito del presente estudio consiste en caracterizar las condiciones físicas de la microcuenca y el diagnóstico de los impactos ambientales que le afectan, para

establecer las bases de una planificación que permita su protección, restauración y desarrollo sustentable.

II. INTRODUCCIÓN

La zona de captación de Chalchihuapan, es una parte fundamental de los recursos hídricos que sustentan a la población, biodiversidad, el paisaje y el microclima de la ciudad de Cuernavaca; particularmente, contribuye con el abastecimiento de agua potable de un importante número de habitantes que pueblan el municipio homónimo.

Con base en la interpretación de imágenes de satélite (Google earth, ESRI, DigitalGlobe y USGS, entre otros), la microcuenca tiene un área urbana aproximada de 323.7 hectáreas (10.1% del área de la microcuenca); De dicha superficie, 20.61 ha se destinan a viveros en la población de Tetela del Monte, lo que representa el 6.3% de la zona urbana. Según estimaciones demográficas proyectadas para el año 2017, el área urbana de la microcuenca cuenta con 10,454 habitantes; y de continuar con la misma tendencia estadística, su proyección para el año 2035 llegará a 12, 439 habitantes (ver Capítulo V, Marco social).

Por otra parte, la zona alta de la microcuenca coincide con la región de mayor precipitación promedio anual del estado de Morelos; ya que, de acuerdo con los registros de la estación meteorológica 17047 Huitzilac, es de 1,553 mm.

Desde una perspectiva hidrológica, la microcuenca incluye 8 subunidades, de las cuales 7 son de tipo endorreico, debido al bloqueo de la red de drenaje natural por la extensa corriente de lava que forma la meseta volcánica La Gloria, como se ve más adelante en el capítulo correspondiente.

Considerando el balance hídrico espacialmente distribuido, abordado también en capítulos posteriores, el volumen medio anual de escurrimiento natural que drena la microcuenca, considerando sus límites hidrográficos, se estima en 9.691884 hm³ anuales; y la suma de los escurrimientos endorreicos que se acumulan en cada vaso, aislados hidrográficamente por la meseta volcánica La Gloria, se calcula en 3.536021 hm³ al año. Dado que no existen cuerpos

de agua en dichas depresiones, se asume la infiltración de dicho volumen, constituyéndose así en una importante zona de recarga del acuífero de Cuernavaca.

Con respecto al nivel base de flujo superficial por cuenca propia, el promedio aforado con flujómetro digital en el río Chalchihuapan, (incluyendo el canal de El Tepeite y el arroyo El Salto), fue de 73.24 l.p.s. durante la época de estiaje, según se explica más adelante.

De acuerdo con información de CONAGUA, el volumen concesionado de agua superficial en la microcuenca es de 2.29 hm³ al año, lo que equivale a 72.6 l.p.s., de los cuales, el 50% es para uso público urbano, el 28% para uso agrícola, y 22% para uso acuícola. En el caso particular del volumen concesionado para uso agrícola, se tiene destinado un volumen de 662,780.00 m³/año, equivalentes a 21.01 l.p.s., para una superficie de riego de 100 hectáreas.

Asumiendo que el gasto total aforado durante el estiaje del año 2017 en los arroyos y manantiales de la microcuenca fue de 73.24 litros por segundo; y que, el gasto concesionado es de 72.6 litros por segundo; existe un excedente de 0.64 l.p.s. (0.87% del caudal base), que es claramente insuficiente como caudal ecológico, por lo que debe considerarse sin disponibilidad para nuevas concesiones.

La calidad del agua se puede calificar como excelente en la parte alta del río; buena, en su parte media; y contaminada a muy contaminada, en el área urbana.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Caracterización y diagnóstico físico para la integración del Programa de Manejo de la Microcuenca de la Barranca de Chalchihuapan.

3.2. Objetivos particulares del estudio

- Identificación de las principales características fisiográficas y geomorfológicas
- Caracterización las unidades geológicas y edafológicas
- Descripción de la evolución geológica de la microcuenca
- Caracterización meteorológica y climática

- Determinación de características y condiciones hidrológicas
- Descripción del uso y disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas
- Diagnóstico del grado de conservación y calidad de aguas superficiales y subterráneas.
- Estimación de la generación de RSU
- Relación entre áreas de recarga y ANPs
- Proyección de demanda del recurso hídrico

IV. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

4.1. Localización

La microcuenca de la barranca de Chalchihuapan (Lugar de piedras preciosas), tiene su cabecera en la vertiente Sur de la Sierra de Zempoala, como ya ha sido comentado, y se encuentra delimitada por la aserrada arista que une a los cerros de El Campanario y Cuahutépetl; prolongándose al oriente, sobre el lóbulo frontal de la Mesa La Gloria, en las cercanías de Huitzilac; al Poniente, por el vértice orográfico a partir del cual se extiende el Glacis de Buenavista - en cuya superficie se desarrollan decenas de barrancas (194) que en conjunto acumulan un poco más de 700 km de longitud (O. Pohle, Coordinación de Estudios y Proyectos Ambientales, SSPMA, 2003) -; al Sur - Suroeste, con el parteaguas que le separa de las barrancas de Ahuatlán, Tzompante, El Tecolote y su confluencia con la barranca de San Pedro; y al Oriente, con la divisoria de la barranca de San Pedro que va haciéndose cada vez más difusa, conforme se interna en la Sierra de Chichináutzin. Sus límites geográficos se encuentran delimitados por los paralelos 19° 2.01' y 18° 57.01' de latitud Norte y los meridianos 99° 20.45' y 99° 14.80' de longitud Oeste.

Su territorio comprende una pequeña parte del municipio de Ocuilan, Estado de México, y parte de los municipios de Huitzilac y Cuernavaca en el estado de Morelos. Dentro del municipio de Cuernavaca, abarca la porción occidental del pueblo de Santa María Ahuacatlán, casi la totalidad de la colonia Rancho Cortés, una angosta franja de la colonia Tetela del Monte, la mayor parte de la colonia Jardín Tetela, la porción occidental de la colonia Bellavista y una pequeña fracción situada en la zona norte del pueblo de Tlaltenango. En el extremo occidental del municipio de Huitzilac, una parte de la cabecera de la microcuenca ocupa los cerros de Cuahutépetl y Cuahutépetl Chico, así como casi la totalidad de la Mesa

La Gloria hasta las faldas del cerro El Ocelote, cercano a la cabecera municipal. Finalmente, el extremo noroeste de la microcuenca sigue el borde montañoso que separa a la nanocuenca de la laguna de Zempoala y la microcuenca del río Tembembe, ya dentro del municipio de Ocuilan, Estado de México.

Es importante señalar que la extensión y límites considerados en el presente trabajo, corresponden con el concepto de cuenca hidrológica, el cual no necesariamente coincide con los límites de la divisoria hidrográfica, según se puede observar en la *Figura 1*.

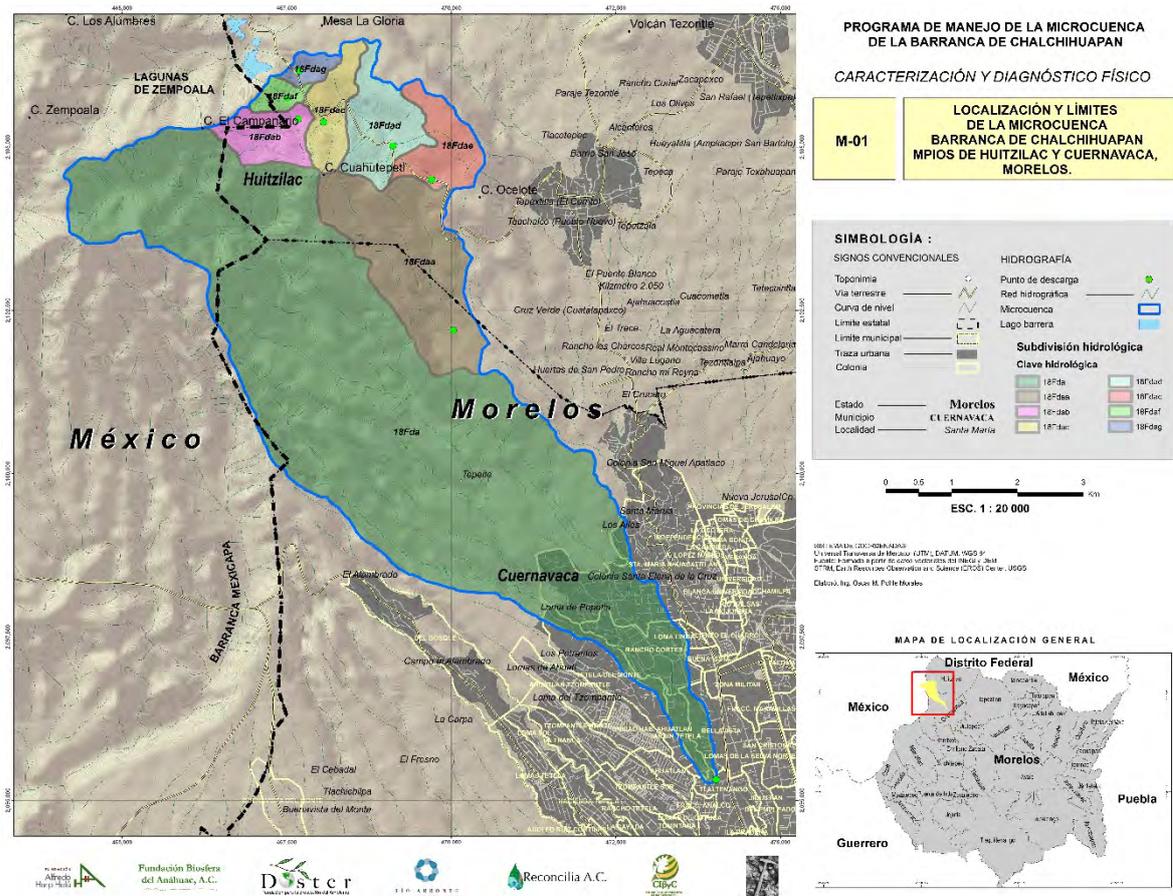


Figura 1. Localización, límites y subdivisión hidrológica de la microcuenca de Chalchihuapan

De la figura anterior, cabe destacar la región de nanocuecas endorreicas que constituyen una zona de recarga neta del acuífero; y que por consiguiente, se han integrado a la microcuenca en estudio.

4.2. Clima

Debido a sus características orográficas y extensión (*Figura 2*), esta subunidad hidrológica muestra tres subgrupos climáticos:

- 1) C(E)(m)(w): Templado, Semifrío, con abundantes lluvias en verano, lluvias invernales < 5%, precipitación del mes más seco < 40 mm, temperatura media anual entre 5 y 12° C. Este subgrupo climático se presenta a partir de los 2, 900 m.s.n.m.
- 2) C(w₂)(w): Templado, subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano, lluvias invernales < 5% , precipitación del mes más seco < 40 mm y temperatura media anual entre 12 y 18° C. Subgrupo climático situado entre los 1, 800 y 2, 900 m.s.n.m.
- 3) A(C)w₁(w): Cálido, Semicálido, subhúmedo de humedad media, con lluvias en verano, lluvias invernales < 5%, precipitación del mes más seco < 40 mm y temperatura media anual > 18° C. Subgrupo climático presente bajo la cota 1, 800 m.s.n.m.

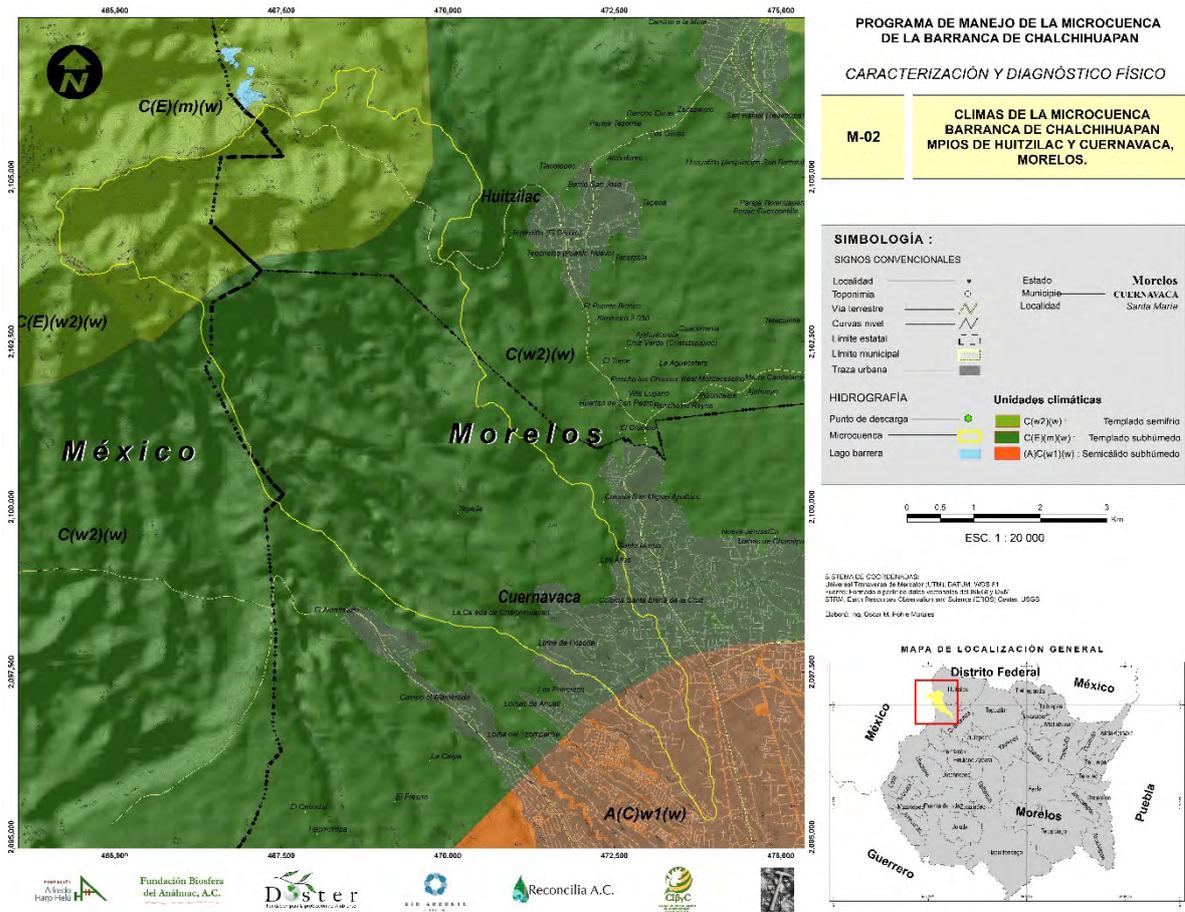


Figura 2. Climas de la microcuenca de Chalchihuapan

4.3. Edafología

Siguiendo criterios morfogenéticos, puntos de verificación en campo y la clasificación utilizada por el INEGI, se determinaron 5 grupos y 8 unidades de suelos según se muestra en la *Tabla 1* y cuya distribución porcentual se ilustra en la *Gráfica 1*.

Tabla 1. Grupos de suelos presentes en la microcuenca

RESUMEN DE CLASES DE SUELOS EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN				
Clase	Superficie (ha)	Textura	Fase Física	%
Acrisol húmico+Andosol húmico+Litosol	388.6851	Media		10%
Andosol húmico+Cambisol dístrico	728.9420	Media	Lítica	20%
Andosol húmico+Litosol	180.9830	Media	Pedregosa	5%
Andosol mólico+Andosol húmico+Litosol	1,946.1867	Media	Lítica	52%
Fluvisol dístrico	34.0476	Gruesa	Lítica profunda	1%
Fluvisol eútrico+Vertisol pélico	22.1788	Gruesa	Lítica	1%
Gleysol mólico+Vertisol pélico	19.8478	Fina		1%
Litosol+Andosol húmico	413.1290	Media	Lítica	11%
Superficie total:		3,734.00		100%

4.3.1. Acrisoles

Los acrisoles se desarrollan generalmente a partir de la alteración de rocas ácidas e intermedias, con elevados niveles de arcillas alteradas, que han sido sujetas a un largo proceso edafogenético, por lo que se consideran suelos antiguos formados durante el Plioceno - Pleistoceno. Dentro del área de estudio, se presentan en los alargados lomeríos o interfluvios situados en la zona centro – occidental y sur - occidental de la microcuenca y se distinguen por su coloración rojiza. Son muy susceptibles a la erosión y no son muy productivos, salvo para especies de baja demanda y tolerantes a la acidez. La unidad relacionada con este grupo de suelo es: Acrisol húmico (más de 1% de carbono orgánico) como suelo dominante; Andosol húmico, derivado de cenizas volcánicas, como tipo secundario; y Litosol, constituidos por suelos muy delgados, poco desarrollados y pedregosos, derivados de conglomerados y lahares, expuestos en las laderas de las barrancas. Dicho tipo de suelo ocupa un 11% de la superficie de la microcuenca.

4.3.2. Andosoles

Cubriendo la mayor parte del área de estudio (75%), este grupo de suelos deriva de la degradación de rocas volcánicas de origen reciente, tales como basalto y andesita basáltica.

Dentro de este grupo se distinguen tres unidades de suelos:

- 1) Andosol húmico, como suelo dominante; y Cambisol dístrico, desarrollado a partir de depósitos coluviales y caracterizado por ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro. Sus principales limitaciones son un

espesor pobre, pedregosidad y asociación con una topografía abrupta, por lo que uso se reduce al aspecto forestal. Ocupan el 15% de la superficie en estudio.

- 2) Andosol húmico, como suelo dominante; y Litosol o Leptosol, como suelo secundario, que consiste en un tipo de suelo de espesor menor a 10 cm. desarrollado en escarpes y afloramientos rocosos, ricos en materia orgánica pero que sólo pueden sustentar vegetación baja. Se presentan en el 5% del área de la microcuenca.
- 3) Andosol mólico, suelo dominante, constituido por un horizonte de color oscuro, con un contenido de materia orgánica mayor o igual al 1% , contenido bajo de arcilla (20 a 25%), estructura porosa y permeabilidad elevada. Como suelo secundario, se tiene Andosol húmico; y en tercer término, litosol, cuyas propiedades generales ya han sido tratadas.

Esta unidad de suelo ocupa la mayor parte de la microcuenca (55%) y se localiza en la zona alta y media de la misma. Sus características edáficas permiten sustentar una de las zonas boscosas más importantes de los municipios de Huitzilac y Cuernavaca.

4.3.3. Fluvisoles

Ocupan aproximadamente el 2% del área de estudio y se caracterizan por su textura gruesa, derivada de depósitos aluviales y fluviales que ocupan los cauces y márgenes de las barrancas. Debido a que se encuentran sujetos a la acción permanente o periódica de los escurrimientos pluviales su remoción es constante. Dentro de este grupo se distinguen dos unidades:

- 1) Fluvisol dístico (baja saturación en bases), de textura gruesa y fase lítica, que varía a profunda. Alojada principalmente a lo largo de los cauces de las barrancas y terrazas aluviales.
- 2) Fluvisol eútrico (saturada en bases), como suelo dominante; y en segundo término, Vertisol pélico, asociado a zonas de inundación rivereñas, constituidas por sedimentos con una alta proporción de arcillas expansivas.

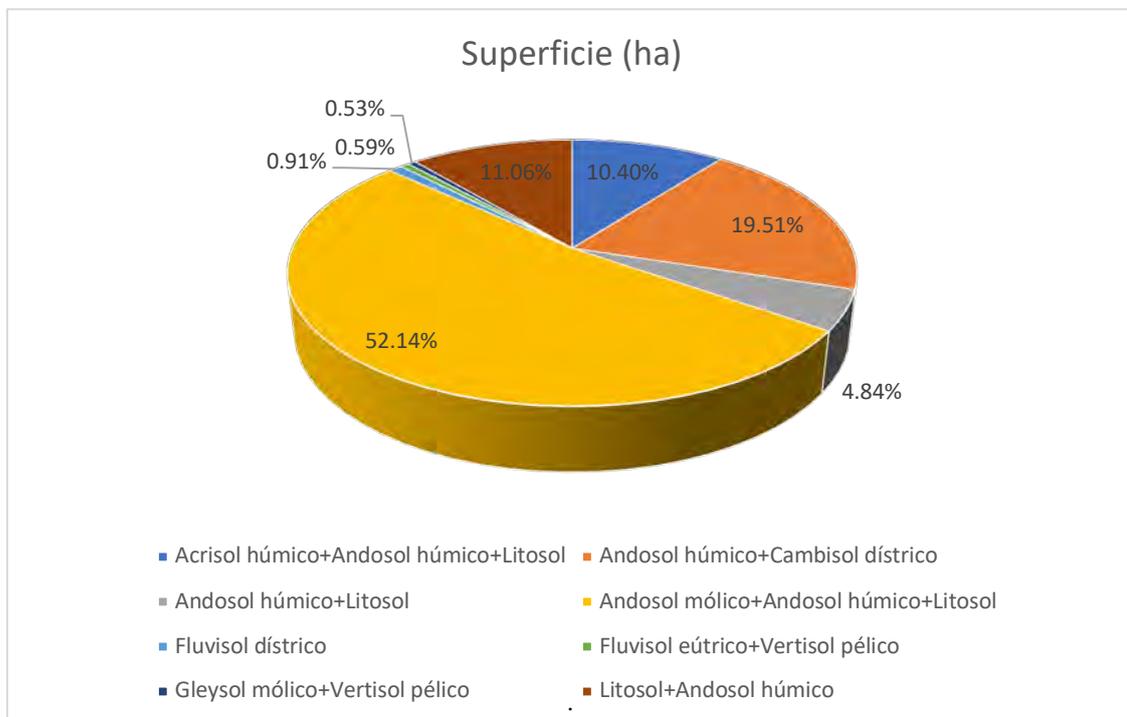
4.3.4. Gleysoles

Suelos con exceso de humedad, principalmente de origen fluvial o lacustre del Pleistoceno u Holoceno. Se localizan en áreas bajas, tales como cuencas intermontanas endorreicas, o zonas con niveles freáticos someros. Se localizan en la franja del contacto geológico que se localiza entre corrientes de lava recientes (Mesa La Gloria) y la Sierra de Zempoala, situado en la parte norte y noreste de la cuenca. Constituyen depresiones que en el pasado ocupaban pequeños lagos de barrera, similares a las Lagunas de Zempoala. La humedad es la principal limitación

de los Gleysoles; aunque generalmente se encuentran cubiertos por vegetación pantanosa o pastizales extensivos. Cuando son drenados, pueden ser utilizados para cultivos, agricultura de subsistencia o huertas. La unidad representativa en la microcuenca es Gleysol mólico como suelo dominante; y Vertisol pélico, en segundo lugar, caracterizado por su alto contenido de arcillas que son muy duros en la estación de secas y muy plásticos en la húmeda, siendo suelos poco productivos. Ocupan el 1% de la superficie total de la microcuenca.

4.3.5. Litosoles.

Como ya ha sido mencionado, son suelos muy delgados, cuyo espesor es menor a 10 cm, poco desarrollados y de textura media, que ocupan principalmente las laderas empinadas de las barrancas, derivados por el intemperismo del sustrato rocoso. Se encuentran asociados a Andosoles en las zonas donde afloran rocas volcánicas recientes, particularmente en las laderas de las barrancas cuyas pendientes son menos abruptas, permitiendo sustentar vegetación mesófila de montaña, así como pinos y encinos que fijan el terreno e impiden una alta ocurrencia de deslizamientos. Esta unidad cubre en conjunto casi el 12% de la superficie de la microcuenca.



Gráfica 1. Distribución porcentual de suelos en la microcuenca Barranca de Chalchihuapan

En la *Figura 3*, se puede observar la distribución espacial de las diferentes unidades pedogenéticas descritas.

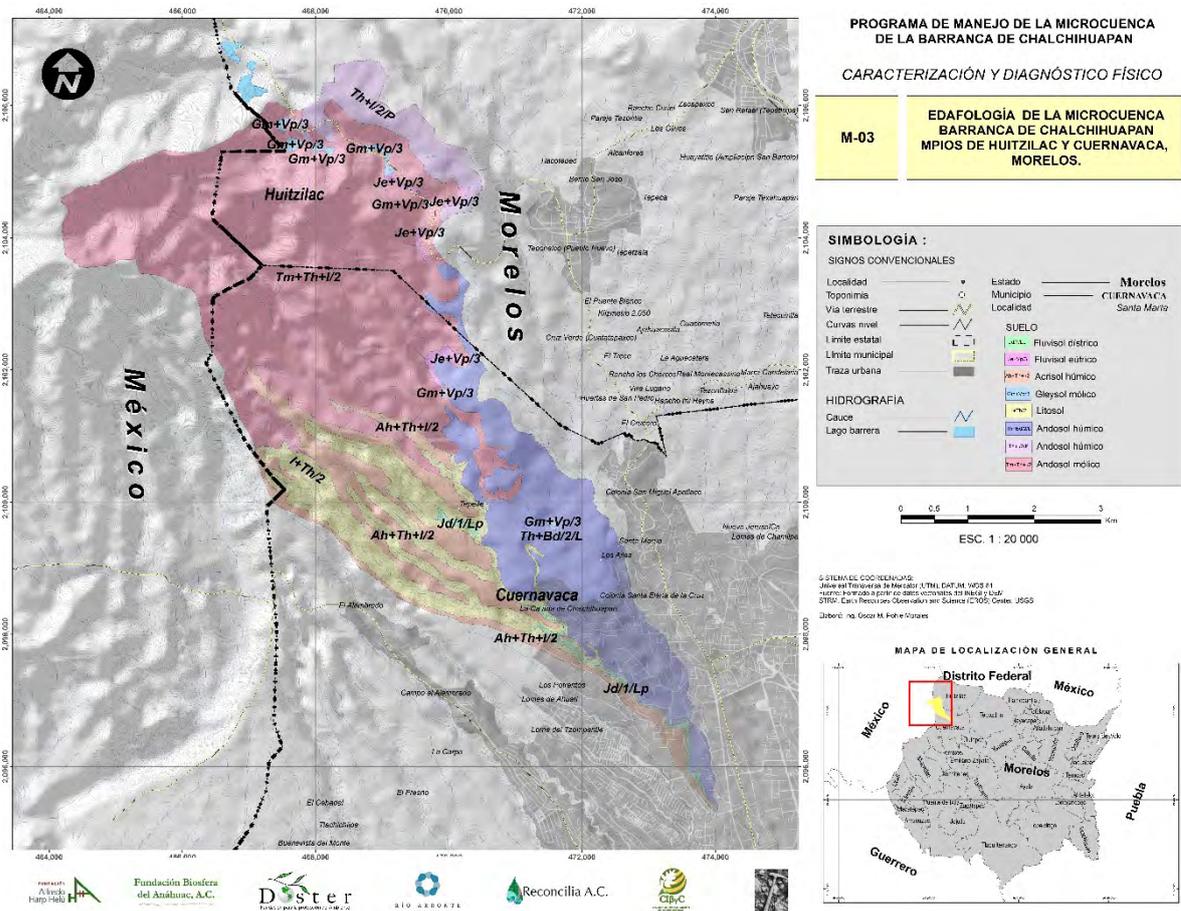


Figura 3. Carta edafológica de la microcuenca de la Barranca de Chalchihuapan

4.4. Fisiografía

La diversidad de formas del relieve mexicano determina de manera muy importante las características ambientales de su territorio, como son el clima, recursos hídricos, el tipo de suelo y biodiversidad, entre otros; que influyen a su vez de manera determinante en las actividades económicas y sociales del país. Para su estudio, el territorio mexicano se ha agrupado en regiones que tienen un mismo origen geológico, con paisajes y tipos de roca semejantes en la mayor parte de su extensión y relieve similar, las cuales se han denominado Provincias Fisiográficas. Dentro de dichas regiones, también existen variaciones y diferencias que determinan subsiguientes subdivisiones, tales como subprovincias y discontinuidades

fisiográficas; ya sea que éstas muestren particularidades geológicas dentro de una provincia fisiográfica, o que contrasten fuertemente con ésta dentro de un área relativamente reducida. Con base en las características antes mencionadas, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) ha dividido el territorio nacional en 15 Provincias, 73 Subprovincias y 13 Discontinuidades, que describen e integran el relieve del país según sus características más importantes.

Derivado de los criterios descritos, la zona sujeta a estudio pertenece a la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, la cual forma parte de la Provincia Fisiográfica denominada Eje Neovolcánico (INEGI), representadas en la *Figura 4*.

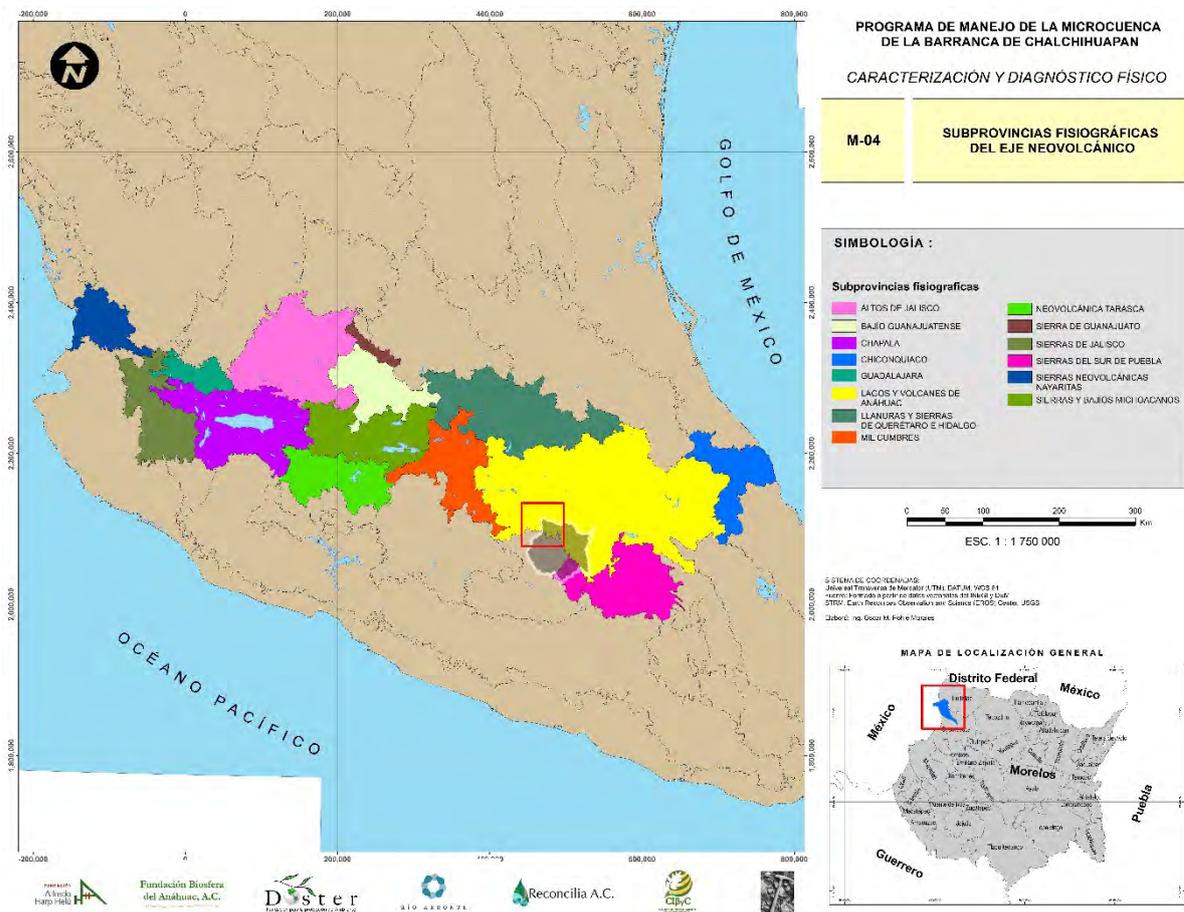


Figura 4. Subprovincias de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Fuente: Formado a partir de datos vectoriales del INEGI.

El Eje Neovolcánico ó Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), como se le denomina geológicamente, secciona transversalmente el territorio nacional siguiendo aproximadamente el paralelo 19° y está constituida por amplias sierras volcánicas que integran potentes derrames lávicos, cientos de conos monogenéticos, abundantes depósitos piroclásticos y grandes edificios volcánicos (estrato-volcanes) que conforman las elevaciones más importantes del país.

Dicha Provincia se define como un arco magmático continental, integrado por aproximadamente 8, 000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende a lo largo de una franja de 1, 000 km de longitud, cuya amplitud varía de 80 a 230 km, orientada preferencialmente en dirección E-W en su parte central y oriental; y WNW-ESE en su parte occidental. Geológicamente, el Eje Neovolcánico se ha dividido en tres partes de acuerdo con su geología y tectónica (Demant, 1978; Pasquaré et. al 1988): la porción occidental situada entre la costa del Golfo de California y la zona de *rifts* de Zacoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986); la central, ubicada entre dicha estructura y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et. al., 2002); y por último, la porción oriental, comprendida entre el sistema anterior y la costa del Golfo de México (Figura 5).

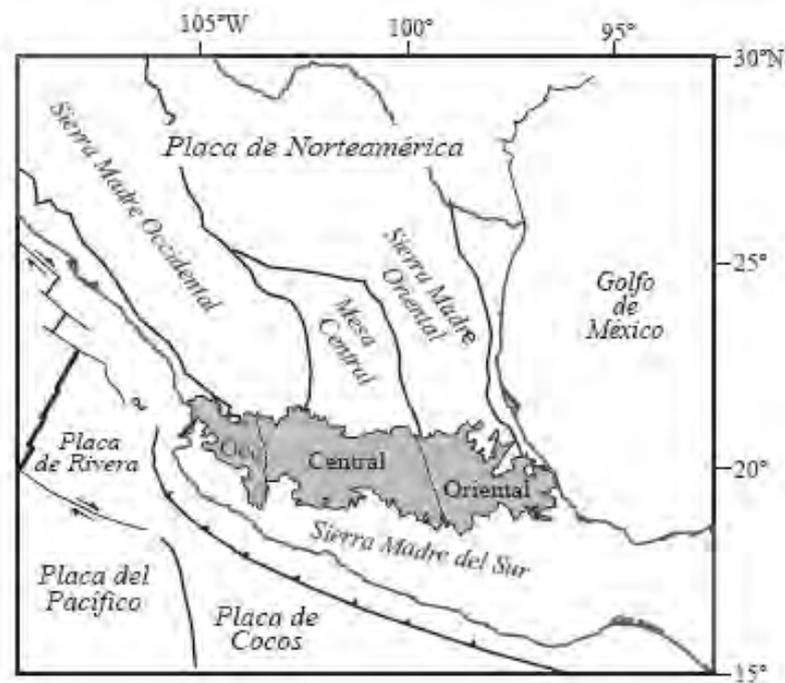


Figura 5. Subdivisiones de la Faja Volcánica Transmexicana. Fuente: Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Arturo Gómez-Tuena. et. al.; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVII, Núm. 3, 2005, p. 227-283.

Por otra parte, la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac (SLVA) es la más extensa de las catorce subprovincias que integran el Eje Neovolcánico, extendiéndose de poniente a oriente, desde unos 35 km al occidente de la ciudad de Toluca en el estado de México, hasta Quimixtlán, Puebla, que como ya fue mencionado, consta de grandes aparatos volcánicos que alternan con amplias llanuras, formadas en su mayoría por grandes vasos lacustres distribuidos de oeste a este; tales como las cuencas de Toluca, México, Puebla y Oriental.

Con respecto a la zona de estudio, ésta se inserta íntegramente en la SLVA, dentro del Campo Volcánico de la Sierra de Chichináutzin (CVSC), situado entre los paralelos $18^{\circ} 57' 0.88''$ y $19^{\circ} 02' 28.68''$ de latitud Norte; y los meridianos $99^{\circ} 20.4' 4.46''$ y $99^{\circ} 14' 48.49''$ de longitud, al Oeste del Meridiano de Greenwich. El Campo Volcánico de la Sierra Chichináutzin (CVSC) cubre una extensión aproximada de 2, 500 km², formando una sierra alargada en sentido E-W que se extiende entre los volcanes Popocatepetl y Nevado de Toluca (*Figura 6*). El CVSC cuenta con una de las mayores concentraciones de vulcanismo monogenético, incluyendo al menos 220 conos cineríticos y volcanes escudo (Bloomfield, 1975; Martín del Pozzo, 1982).

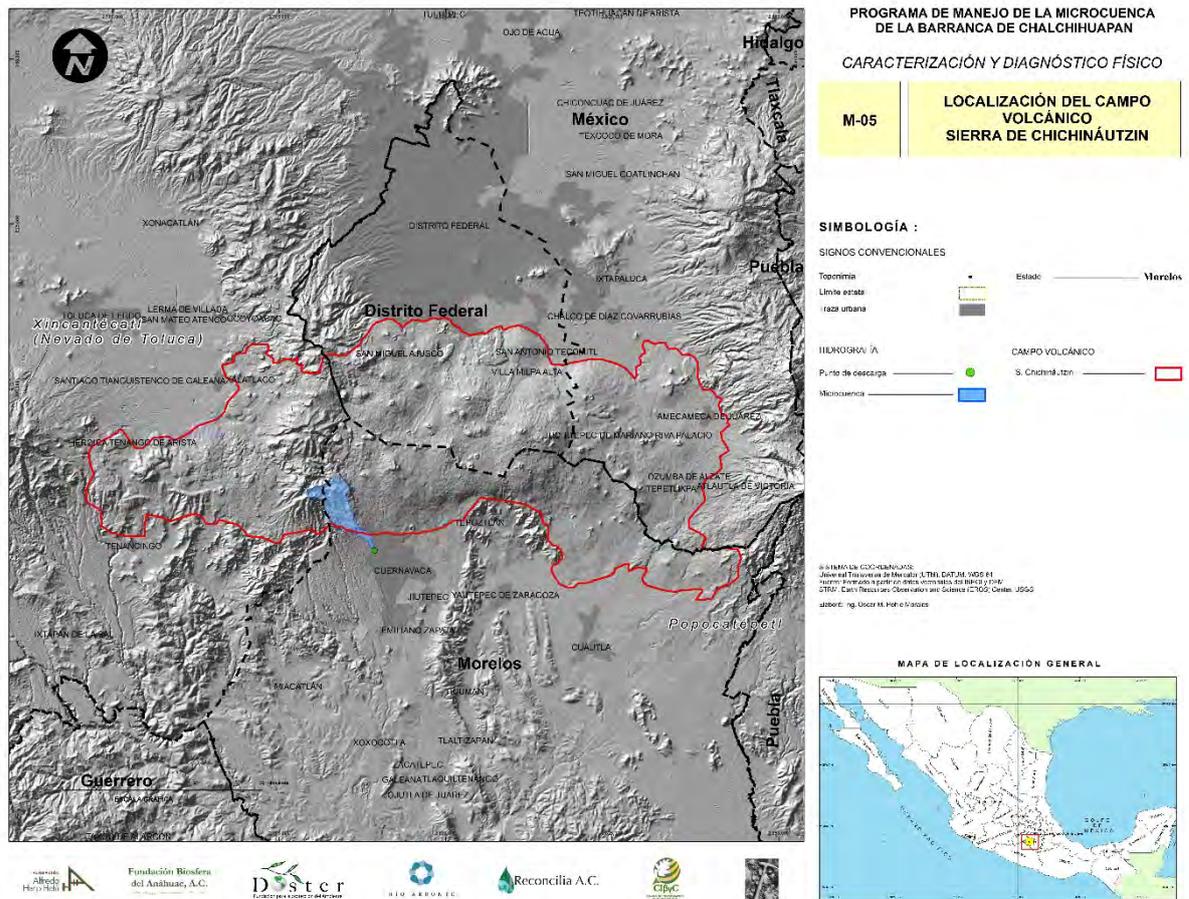


Figura 6. Localización del Campo Volcánico Chichináutzin, ubicado dentro de la Provincia Geológica Faja Volcánica Transmexicana. Fuente: A partir de modelo digital de elevación elaborado para este informe.

Por las razones antes expuestas, en la MBCh predomina un relieve volcánico con grandes variaciones altitudinales, que van de los 3,300 msnm en la cima del cerro Cuahutépétl, a los 1,660 msnm en la confluencia del río Chalchihuapan con la barranca de San Pedro; es decir, presenta un desnivel de 1,640 metros en 12 km de longitud, lo cual es determinante en la vocación y uso sustentable de su territorio.

4.5. Geología

4.5.1. Evolución geológica regional

A partir de múltiples evidencias geofísicas, el origen de la FVTM y formación de magmas a lo largo y ancho de la misma, se atribuye a la introducción ó subducción de las placas

oceánicas de Rivera y Cocos hacia el manto por debajo del continente (*Figura 7*). Sin embargo, algunos investigadores cuestionan dicha relación debido a peculiaridades petrológicas de las rocas magmáticas, a la notable presencia de una tectónica distensiva asociada al emplazamiento de magmas primitivos, y a que el plano de Wadati-Benioff no se encuentra bien definido debajo de la mayor parte del arco (Márquez et al., 1999a; Verma, 1999; Sheth et al., 2000; Verma, 2000a; Verma 2002).

Por otra parte, derivado de estudios paleomagnéticos e isotópicos relativamente recientes, se ha demostrado que la mayor parte de las emisiones volcánicas del CVSC tienen edades menores que 0.78 Ma (Bloomfield, 1973, Mooser et al., 1974; Herrero y Pal, 1978; Siebe et al., 2004a). Aun cuando no existen reportes de erupciones históricas en la región, se tiene la evidencia de la destrucción del asentamiento prehispánico de Cuicuilco, localizado al Sur de la Ciudad de México, en una erupción ocurrida hace 2, 000 o 1, 670 años (Siebe, 2000).



Figura 7. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su relación con la zona de subducción Placa de Cocos – Placa Norteamericana. Fuente: Adaptado de A. Demant., Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. UNAM, Instituto de Geología, Revista, vol. 2, núm. 2 (1978), p.172 -187.

De la información isotópica referida (Bloomfield y Valastro, 1974; Mora-álvarez et al., 1991; Nixon, 1987, 1988; J.L. Macías, 2005), se ha demostrado que la actividad volcánica que originó la Sierra de las Cruces y Zempoala, así como la del Iztaccíhuatl, antecedió a la observada en el CVSC. A partir de dicha información, se elaboró el mapa geocronológico mostrado en la *Figura 8*, en la cual se ha establecido la sucesión cronoestratigráfica descrita más adelante identificada por su numeración entre paréntesis.

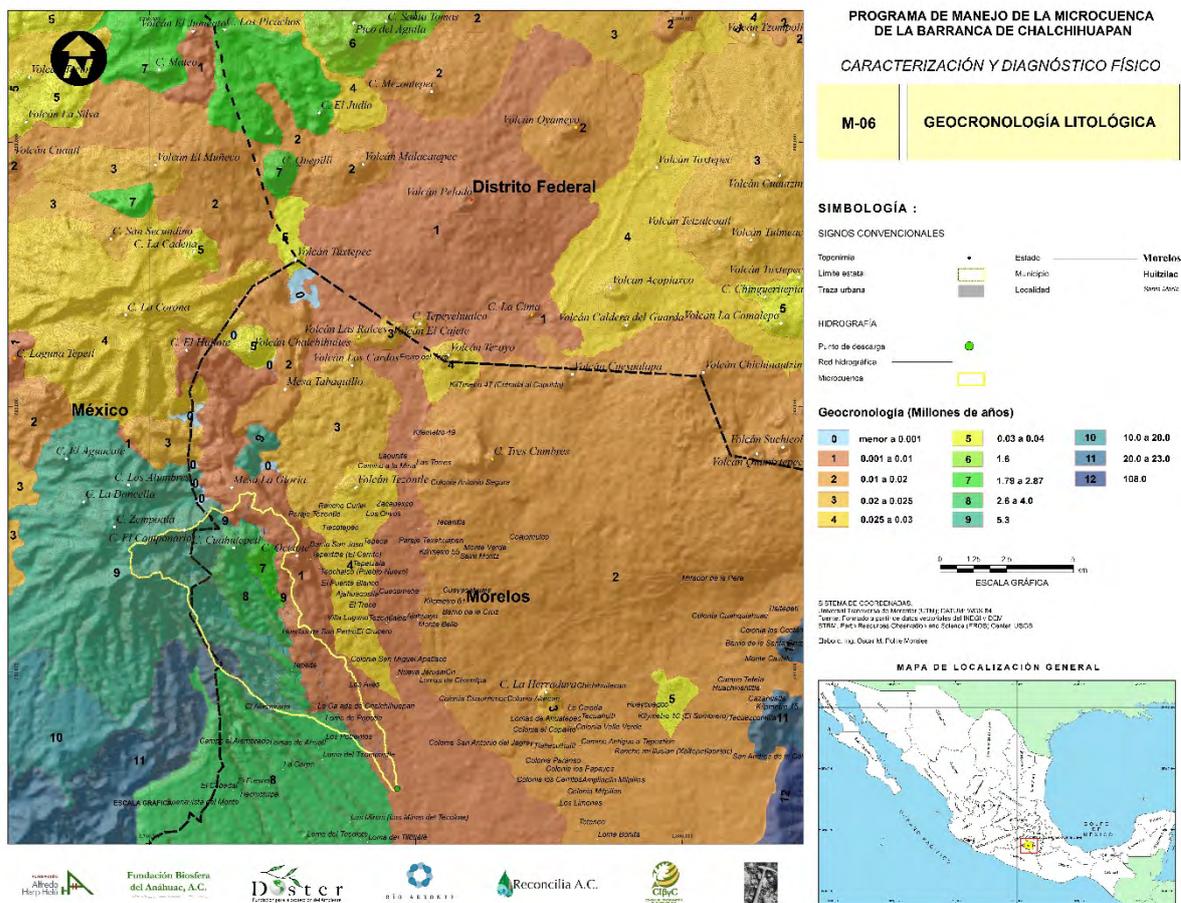


Figura 8. Mapa geocronológico regional, elaborado a partir de datos isotópicos, estratigráficos e interpretación morfológica – estructural.

4.5.2. Descripción cronoestratigráfica de la región

1. La unidad más antigua, cuya edad data del Cretácico Medio – Superior (108 Ma A.P.) consiste en depósitos marinos calizos de la Formación Morelos (12), los cuales ocupan la parte inferior derecha del mapa. Dicha unidad se encuentra fuertemente plegada y afallada en sentido Norte – Sur, delimitando el borde de una fosa tectónica que se extiende hacia el poniente donde se aloja el Valle de Cuernavaca. Dicha fosa se encuentra cubierta por depósitos aluviales de la Formación Cuernavaca y derrames volcánicos recientes del CVSC.
2. Sobreyaciendo discordantemente a la unidad anterior, se tiene la Formación Tepoztlán (11), cuya edad oscila entre 20 a 23 millones de años antes del presente (Ma A.P.). esta formación consiste en una secuencia de depósitos volcánicos de caída, lahares y aluviones, que afloran en las localidades de Tepoztlán y Ahuatenco, ubicadas en las porciones suroriental y suroccidental del mapa, respectivamente.
3. Cubriendo o contemporánea a la Formación Tepoztlán, en la porción suroccidental del mapa, se encuentra la Formación Basalto San Nicolás (10), que data del Mioceno al Plioceno (20 a 10 Ma A.P.), la cual se encuentra emplazada a lo largo de un sistema de fisuras y fallas ortogonales entre sí, de tipo distensivo, que incluyen el Graben Malinalco y las fallas de: Tlecuilco, Amola, San Pablo, Santa María, Coauixtla, Chalma, Chalmita y Las Canoas, ubicadas todas ellas dentro del estado de México.
4. Siguiendo el mismo orden cronoestratigráfico, se tiene la Formación Andesita Zempoala (9), representada por un estratovolcán fuertemente erosionado, cuya edad se estima en 5.3 Ma A.P., y por lo tanto, más antiguo que el Nevado de Toluca (Xinantécatl), cuya formación inicial se ha datado en 1.2 Ma A.P. El antiguo volcán de Zempoala (Paleovolcán) se encuentra hendido en su parte media, en dirección NE – SW; y se caracteriza por una topografía muy abrupta, coronada por agudas aristas y picachos aislados, cuyas vertientes muestran profundos valles de laderas empinadas; al parecer labradas por la acción glacial que más adelante se discute.
Esta unidad ocupa prácticamente la mitad de la superficie de la microcuenca en estudio y en su parteaguas de traza afilada, se ubica la cabecera principal del río Chalchihuapan.
5. De edad más reciente que la Andesita Zempoala, se encuentra la Formación Cuernavaca (8), a la cual se asigna una edad comprendida entre 4.0 a 2.6 Ma A.P. Esta unidad litológica se describió originalmente a partir de los afloramientos areno-

conglomeráticos situados en la ciudad de Cuernavaca, los cuales forman parte del Glacis de Buenavista, el cual a su vez deriva de eventos volcánicos, avalanchas de escombros, flujos de lodo y aluviales; e incluso, flujos fluvio-glaciales, provenientes del Paleovolcán de Zempoala. Por otra parte, la misma denominación recibe la serie de depósitos francamente aluviales expuestos en la parte centro y sur del estado; tal como en el caso de Alpuyeca, las inmediaciones de Coatetelco, en Puente de Ixtla, Tequesquitengo y el valle del Río Amacuzac. Por este motivo en el presente trabajo, el Glacis de Buenavista se considera una facies de la Formación Cuernavaca, que en adelante se denominará facies Buenavista, la cual se distingue de la anterior por su heterogeneidad litológica, sedimentológica y estructural.

6. Fechada entre 2.87 a 1.79 Ma A.P., la Formación Las Cruces (7) coincide en cierto intervalo de tiempo con la unidad anterior. Dicha formación se extiende a lo largo de la sierra homónima en dirección Norte – Sur y es contemporánea a las primeras manifestaciones volcánicas de la Sierra Nevada. Se compone de una serie de derrames de composición andesítico – dacítica, que ocupan la parte Noroeste del mapa.
7. Un poco más joven que la formación antecedente, se encuentra emplazada la Formación Ajusco (6), a la cual se le asigna una edad de 1.6 Ma A.P.; y consiste en derrames de andesita basáltica que limitan con la parte sur de la Sierra de Las Cruces.

Durante un lapso que comprende más de 1 millón de años, se interrumpe la sucesión estratigráfica en la región mapeada ya que los grandes volúmenes de lava y material piroclástico eyectado en los últimos 40, 000 años cubrieron la topografía y unidades geológicas más antiguas. No obstante, partiendo de evidencias geofísicas y geológico – estructurales, se sabe que antes del emplazamiento del Grupo Chichináutzin existía un amplio valle que drenaba la actual Cuenca de México, de norte a sur, descargando sus aguas y sedimentos en el extremo sur del estado, formando así las amplias terrazas aluviales que bisecta profundamente el Río Amacuzac y cuyo grueso paquete sedimentario también queda expuesto en las paredes del polje que forma el Lago de Tequesquitengo. Lo anterior explica la existencia de un espesor considerable de sedimentos aluviales que alojan a los acuíferos semiconfinado y libre de Cuernavaca y Zacatepec, respectivamente, y que se asignan a la Formación Cuernavaca.

A partir de la discontinuidad estratigráfica descrita o Hiato, la secuencia de rocas volcánicas en el CVSC inicia a partir de los 40, 000 años A.P., aproximadamente, determinándose la sucesión volcánica descrita a continuación, según los datos isotópicos y correlación ya mencionada.

1. Con una edad entre 30, 000 y 40, 000 años (5), se consideran las emisiones de los volcanes Chalchihuites, La Cadena, Tehualtepec, Coaxusco, Ixcatepec, San Bartolo y Tezontle, entre otros. Los dos primeros volcanes muestran una morfología dómica que evidencia una alta viscosidad que corresponde con una composición andesítica - dacítica, además de encontrarse circunscritos dentro de unidades más jóvenes, por lo que se hallan más relacionados con La Formación Las Cruces.
2. Emisiones de lava andesítica – basáltica con edades cercanas a los 25, 000 a 30, 000 años (4). Representadas por el estratovolcán La Corona, y los volcanes Tezoyo, Tzompoli, Acopiaco y Tezontle. Particularmente, en el caso del estrato – volcán La Corona - cuya altitud llega a los 3, 770 m.s.n.m - se observa en sus laderas evidencias geomorfológicas de la acción glacial en el pasado, al menos en los últimos 20, 000 años. Las afiladas aristas que circundan el cráter, laderas cóncavas, valles en “U” y las formas de circo dentro del antiguo cráter, parecen apoyar dicha tesis (*Figura 9*). Según estudios realizados por Heine (Heine 1972b, 1975, 1984b), se puede determinar una secuencia glacial durante los últimos 40, 000 años que incluyen cinco glaciaciones para distintas montañas del centro de México, tres de estas ocurridas a fines del Pleistoceno (Wisconsin): La primera entre 36, 000 y menos de 32, 000 años; el segundo evento, aproximadamente hace 12, 100 años; y la tercera, entre 10, 000 y 8, 500 años. Posteriormente, durante la época reciente (menos de 5, 000 años), se presentaron dos glaciaciones: Una entre 3, 000 y 2, 000 años; y el último episodio, que sólo se manifestó en altitudes mayores a los 5, 000 m.s.n.m., en la segunda mitad del siglo XVIII y la primera del XIX; evento conocido mundialmente como la Pequeña Edad Glacial (Heine, 1984a).

Por otra parte, White considera que la glaciación más antigua inicia hace más de 300, 000 años, en correlación con depósitos glaciales de las Montañas Rocallosas (Withe, 1981a, 1987) y del Ajusco (White y Valastro, 1984), cuya altitud llega a los 3, 937 m.s.n.m.

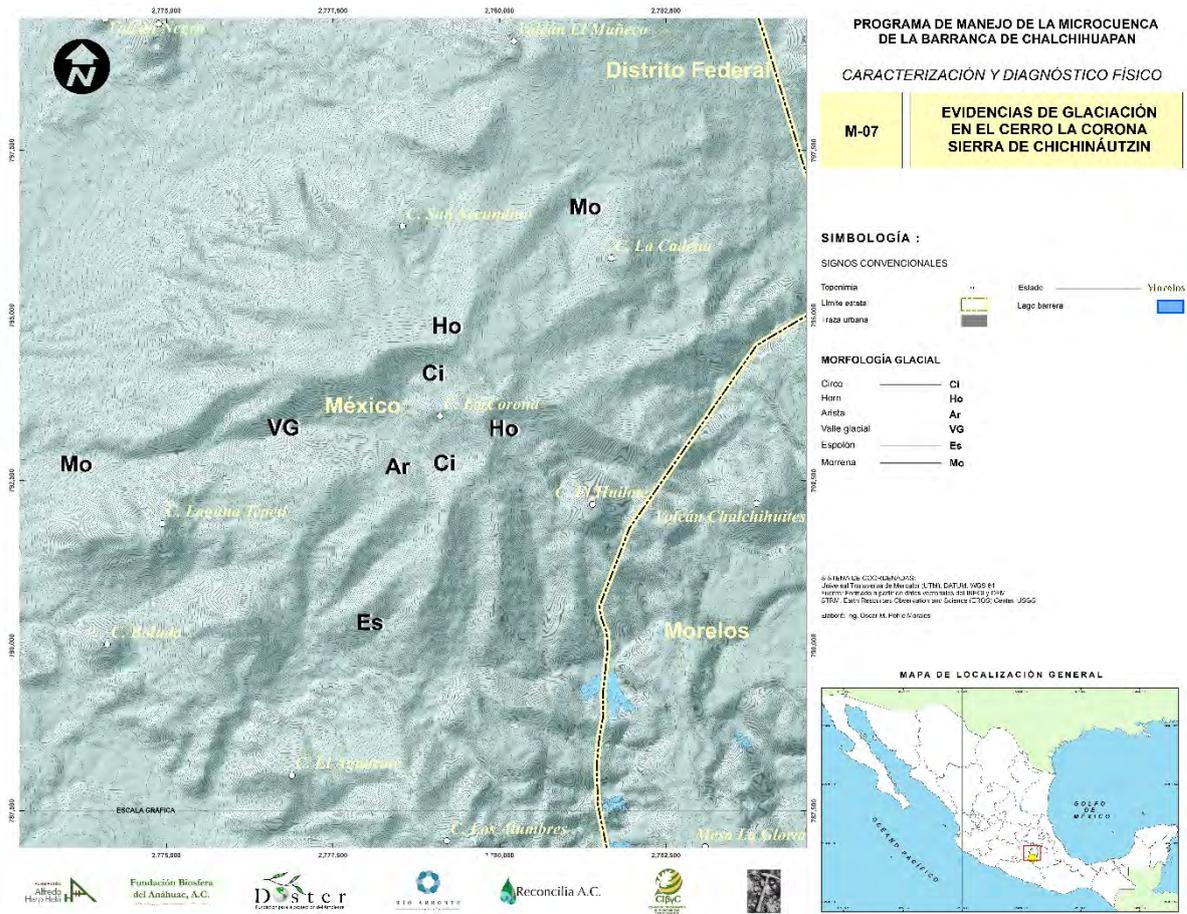


Figura 9. Evidencias de erosión glacial en estratovolcán Cerro La Corona.

3. Entre los 20, 000 y 25, 000 años A.P. (3), se consideran las emisiones del domo El Varal y los volcanes: Los Cardos, El Muñeco, Las Raíces, Cuahutzin, Tehutli, Tlálóc y La Herradura. A excepción del domo El Varal, cuya estructura fluidal muestra una alta viscosidad, los demás aparatos volcánicos presentan estructuras mixtas, constituidas por conos cineríticos, depósitos de ceniza y lapilli, así como extensos campos de lava. En los campos de lava se observan corrientes en bloques o AA (Los Cardos), pahoehoe (La Herradura) y masivas (Cuahutzin). Un caso particular es el Cerro La Herradura, cercano a la población de Ahuatepec, el cual muestra un colapso de sector del cono, relacionado con su actividad volcánica y que originó su forma característica.

4. Con edades comprendidas entre 10, 000 y 20, 000 años (2), se tienen los volcanes: Chichináutzin, Cuespalapa, Tres Cumbres y Mesa El Tabaquillo, entre los más importantes.

Los primeros tres, son volcanes de cierta magnitud, que destacan por el volumen de lava, cenizas y lapilli expulsados hacia el Valle de Cuernavaca, de tal forma, que inundaron prácticamente todo el valle, extendiéndose a lo largo de 50 kmm sepultando el antiguo relieve y formaciones más antiguas. Dentro de esta región se desarrolla una extensa e intrincada red de tubos volcánicos que conducen una alta tasa de agua subterránea, de la cual se beneficia más del 50% de la población del estado. La zona más explorada en este sentido se encuentra en la población de San Juan Tlacotenco, pero existen extensos túneles también en el área Natural Protegida de El Texcal y aún más al sur, en los denominados sótanos situados entre Tetecalita y Temimilcingo.

5. Las erupciones más recientes que se han registrado, comprenden edades menores a 5, 000 años (1), y en el caso del Xitle y Volcán Pelado, menos de 2, 000 años, con base en mediciones paleomagnéticas y datos geocronológicos de ^{14}C .

Dentro de un lapso menor a 10, 000 años, se han considerado las emisiones de lava que formaron la Mesa La Gloria, el Domo Ocelote, así como la corriente de lava que llega hasta el antiguo poblado de San Antón en Cuernavaca. Dado que dichas estructuras se encuentran dentro de la microcuenca en estudio, su descripción se hace más adelante con mayor detalle.

Cabe mencionar que el flujo de lava denominado Mesa La Gloria dio origen a los Lagos de Zempoala (conocidos popularmente como “Lagunas de Zempoala”), al bloquear el drenaje natural que drena la vertiente oriental de la Sierra de Zempoala, tal como se aprecia en la *Figura 10*, por lo que se denominan Lagos de Barrera (Pohle, 2006). Originalmente, existían al menos 7 lagos, de los cuales sólo han persistido tres: Los lagos de Zempoala, Tonatiahua y Laguna Prieta, que debido a la deforestación, sobre-explotación por bombeo, azolve, irresponsable manejo de sus recursos y dominio de organizaciones delictivas, tienden a desaparecer rápidamente.

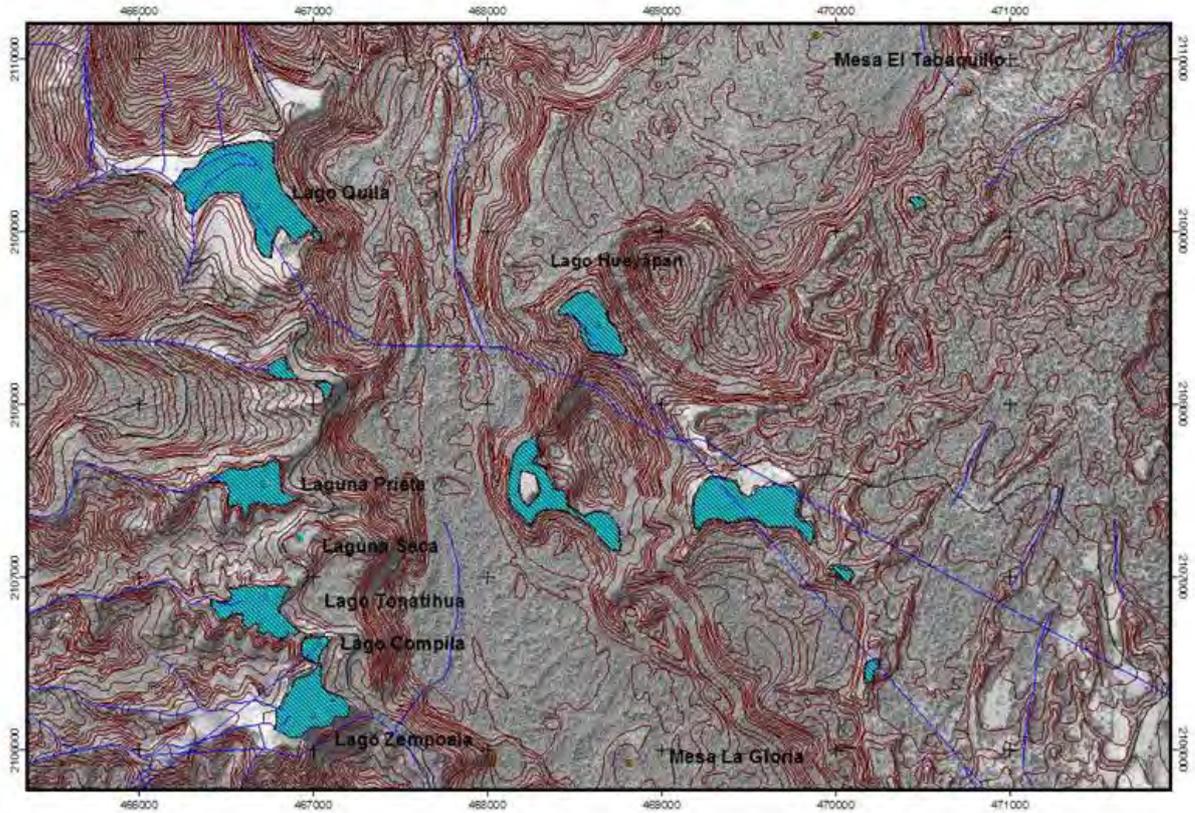


Figura 10. Origen de las “Lagunas de Zempoala” (del náhuatl, “veinte lagunas”), por bloqueo de los escurrimientos naturales de la vertiente oriental de la Sierra de Zempoala. Fuente: O. Pohle, 2006. Estudio geohidrológico para el diagnóstico ambiental, rescate y rehabilitación de las lagunas de Quila y Hueyapan, Municipio de Huitzilac, Estado de Morelos. CRIM, UNAM.

Finalmente, como consecuencia de la actividad volcánica más reciente, se tiene una serie de vasos intermontanos o lagos de barrera como los ya descritos, donde se han acumulado sedimentos de tipo lacustre (0). Ya dentro de la MBCh, se localizan siete vasos o nanocuenas endorreicas que han sido descritos en los primeros capítulos, entre ellos el paraje de Atexcapa, que es el más conocido.

4.5.3. Breve reseña de la geología histórica regional

Hace unos 135 millones, el territorio del actual Estado de Morelos estuvo sumergido bajo un ambiente marino en el debieron evolucionar diversos ecosistemas acuáticos, vinculados a la

variación de movimientos del nivel del mar sobre dicho territorio, así como a la evolución climática del planeta en general y en el territorio de la región central de lo que hoy es México.

A principios de la era Cenozoica, hace unos 60 millones de años, se formaron grandes fosas tectónicas (Una fosa tectónica o graben es una larga depresión limitada en ambos lados por fallas normales que dejan bloques o pilares elevados intermedios) debido a esfuerzos distensivos, en numerosas regiones de México; entre otras, las zonas de Cuernavaca y Jiutepec (San Gaspar), en el estado de Morelos, las cuales se encuentran alineadas con rumbo noroeste a sureste; delineadas al oriente por la Sierra de Monte Negro, al poniente por la Sierra de Ahuatenco, y en la parte central por los cerros de Jiutepec y Calera Chica. Estas fosas tectónicas formaban amplios valles que drenaban los escurrimientos de un antiguo Valle de México (paleocuenca), a través de los cuales se transportaban una gran cantidad de sedimentos que fueron colmatando los bajos topográficos de la parte sur de Morelos, dado que no existía entonces la cordillera del Chichinautzin. Debido a lo anterior, estas fosas se han venido cubriendo de sedimentos durante un lapso aproximado de 50 millones de años, debido a la fuerte erosión hídrica y el vulcanismo al que estuvo sujeto la Paleocuenca de México en diversos periodos.

Posteriormente, hace unos 25 millones de años, se inició la actividad volcánica que dio origen a la Formación Tepoztlán, la roca vulcano-sedimentaria más antigua de Morelos, que forma los grandes acantilados que hoy vemos entre Tepoztlán, Tlayacapan y las Sierras de Ahuatenco-Chalma, formados por una sucesión de brechas y cenizas volcánicas, lahares y depósitos aluviales antiguos, afectados por numerosas fallas y fracturas, así como una singular modelación por erosión diferencial que le confiere su característico paisaje.

Avanzando en la evolución geológica de la región, hace aproximadamente 6 millones de años, inicio otro periodo eruptivo que formó la actual cordillera de Zempoala situada en el noroeste de Morelos y que se prolonga en las zonas vecinas del Estado de México y la Ciudad de México. Posteriormente, entre 4 y 2 millones de años antes del presente, hubo un importante periodo de avalanchas, flujos de lodo y roca, así como depósitos de lava, arena volcánica, e incluso, de origen glaciario (según evidencias de campo), que en conjunto dieron origen a los heterogéneos depósitos del Glacis de Buernavista. También existen evidencias que durante este periodo se presentaron intensas lluvias, formación y derretimiento de nieve y glaciares

que erosionaron y arrastraron enormes bloques de roca y arena, cubriendo antiguas fosas tectónicas y barrancas, que hoy podemos observar en las laderas y partes bajas de las barrancas del norponiente de Cuernavaca, Temixco y Miacatlán. Más tarde, entre 3 y 1.5 millones, antes del presente, surgieron los volcanes que formaron la Sierra de las Cruces (que es contemporánea a la formación de los Volcanes de la Sierra Nevada (Iztaccíhuatl y Tláloc). Siguiéndole cronológicamente, hace 1.5 millones años se formó la Sierra del Ajusco, con lo cual se empezó a obturar el flujo de agua de la paleocuenca de México, hacia el estado de Morelos.

A partir de hace 2 millones de años, se estima que en la porción norte de lo que hoy es el actual estado de Morelos y la región central de México, dio inicio un periodo eruptivo de numerosos volcanes que fueron formando una parte de lo que hoy se conoce como el Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana. Hacia el nororiente de Morelos estos primeros volcanes formaron lo que hoy es el volcán Popocatepetl.

Finalmente, hace unos 200 mil a 100 mil años, se registró un intenso periodo eruptivo, en el que se formó completamente la cordillera del Chichinautzin, con lo cual se bloqueó totalmente el flujo superficial del antiguo Valle de México hacia Morelos, suspendiéndose la acumulación de sedimentos en el Valle de Cuernavaca y fosas tectónicas asociadas. Al oriente, poniente y al sur del Volcán Chichinautzin, surgieron numerosos volcanes monogenéticos que derramaron su lava hacia el territorio de lo que actualmente son los municipios de Tepoztlán, Huitzilac, Jiutepec, Cuernavaca y Emiliano Zapata; cubriendo con lava la antigua topografía, formada en parte por rocas calcáreas, lavas de erupciones más antiguas, antiguas barrancas y amplios depósitos aluviales y vulcano-sedimentarios correspondientes a la formación Cuernavaca y facies Glasis de Buenavista. A través de la sobrexposición de todas estas capas geológicas por la erosión, se formaron los que hoy conocemos como valles de Cuernavaca, Tepoztlán y Jiutepec, cuya superficie se encuentra cubierta por “Texcales”, que constituyen una importante zona de recarga, almacenamiento y flujo de agua subterránea.

Por último, en el periodo comprendido entre 100,000 y 10,000 años, antes del presente, se registró el último periodo eruptivo en la zona norte y noroeste del Estado, destacando el volcán Pelado en los límites entre Morelos y el actual territorio de la Ciudad de México y el volcán

El Huilote; los cuales produjeron un importante derrame de lava hacia la vertiente sur de la Sierra de Chichináutzin, cubriendo de lava antiguas barrancas; y en el caso de El Huilote, formando la meseta denominada: Mesa de la Gloria, cuya prolongación sobreyace la ladera oriental de la barranca de Chalchihuapan. Dicha lava muestra un intenso fracturamiento que le confiere una alta permeabilidad secundaria, lo que favorece la infiltración de un alto porcentaje de las precipitaciones pluviales hacia el acuífero y fluya por gravedad hacia el sur, en donde entra en contacto con la formación Cuernavaca - que es menos permeable – y surjan, un gran número de manantiales. El contacto entre estas dos formaciones geológicas, se puede observar en los numerosos saltos que hay a lo largo de la barranca de Chalchihuapan, donde también es común observar la formación de prismas basálticos y manantiales de fondo y ladera donde se bisecta el nivel freático (“manantialismo”).

4.5.4. Geomorfología

Bajo este apartado se describen los distintos elementos y propiedades del relieve presentes en la microcuenca, relacionados con su origen y evolución geológica, considerando la definición de unidades morfogénicas (UM) bajo el criterio de homogeneidad relativa (Tapia-Varela y López Blanco, 1998; Tapia – Varela, 1999), lo cual permite emplearlas en términos cartográficos como porciones homogéneas del territorio que son útiles dentro de la fase de diagnóstico y para establecer programas de manejo y ordenamiento ecológico – territoriales.

Metodología

Partiendo de los análisis: geológico y morfométrico del relieve, se determinaron 10 unidades y 23 subunidades geomorfológicas dentro de la microcuenca (*Tabla 2*); utilizando como base anotaciones de los recorridos de campo efectuados durante el presente estudio, datos vectoriales de curvas de nivel con equidistancia de 50 m; un modelo de elevación digital del terreno, generado a partir del CEM del INEGI de 100 m/Px; así como la carta geológica mostrada más adelante. El mapa geomorfológico fue elaborado con una escala 1: 20, 000 (*Figura 11*), donde las subunidades geomorfológicas se han representado con un número identificador, su clave correspondiente y una diversidad de colores que representan un total de 54 polígonos; considerando su pendiente característica, grado de disección y densidad de drenaje (*Tabla 3*).

Para establecer una nomenclatura consistente y descriptiva, se elaboró el formato mostrado en la *Tabla 4*, la cual consiste de cinco campos: El primer campo de 4 dígitos, para la unidad de relieve (texto, mayúsculas y minúsculas); el segundo campo de dos dígitos, para el subtipo (numérico); el tercero de dos dígitos (texto, mayúscula y minúscula), que se refiere al intervalo de la pendiente promedio en grados; el cuarto campo, referido a la intensidad de disección del terreno, representado por dos dígitos (texto, mayúscula y minúscula); y el último campo, referido a la densidad de drenaje, representado por dos dígitos (texto, mayúscula y minúscula). Cabe mencionar que la forma de drenaje se utilizó como criterio adicional de interpretación geológico – estructural y grado de erodabilidad.

Tabla 2. Unidades morfo genéticas de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan

UNIDADES MORFOGENÉTICAS DEFINIDAS EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN				
ID	Cve. Relieve	Cve. Unidad	Origen del Relieve	Tipo de relieve
1. Campos y coladas de lava, domos y conos cineríticos				
1	ColaLava	CoLa02AlMePd	Endógeno acumulativo	Colada de lava cordada (pahoehoe)
2	ColaLava	CoLa02MAMePd	Endógeno acumulativo	Colada de lava cordada (pahoehoe)
3	ColaLava	CoLa03MAMeMo	Endógeno acumulativo	Colada de lava y flujos piroclásticos
2. Lagos de barrera				
4	LagoBaVo	LaBa01MBMbPd	Exógeno acumulativo	Lago de barrera volcánica
3. Laderas empinadas				
5	LadeEmpn	LaEm01AMAlPd	Endógeno acumulativo	Ladera empinada activa
6	LadeEmpn	LaEm01AMMaMo	Exógeno denudativo	Ladera empinada activa
7	LadeEmpn	LaEm01AMMaPd	Endógeno acumulativo	Ladera empinada activa
4. Laderas montañosas				
8	LadeMont	LaMo01AMMaDe	Endógeno modelado	Ladera montañosa alta
9	LadeMont	LaMo02AlMePd	Endógeno modelado	Ladera montañosa media
10	LadeMont	LaMo03AlAlMo	Endógeno modelado	Ladera montañosa baja
11	LadeMont	LaMo05AMAlMo	Exógeno modelado	Ladera montañosa fracturada
5. Lomeríos				
12	LomeInte	LoIn01MdMeBa	Exógeno acumulativo	Lomerío interfluvial tendido (Glacis)
13	LomeInte	LoIn01MdMeMo	Exógeno acumulativo	Lomerío interfluvial tendido (Glacis)
14	LomeInte	LoIn01MdMePd	Exógeno acumulativo	Lomerío interfluvial tendido (Glacis)
6. Mesetas				
15	MeseFluj	MeFl01MeMbPd	Endógeno acumulativo	Meseta de flujos volcánicos y domos
7. Piedemontes				
16	PiedMont	PiMn10MAMePd	Exógeno acumulativo	Piedemonte aluvial
8. Planicies aluviales				
17	PlanAluv	PIAl02BaMbPd	Exógeno acumulativo	Planicie aluvial intermontana
9. Superficies cumbrales				
18	SupeCumb	SuCu01AlAlPd	Endógeno modelado	Superficie cumbrial de borde dentado
19	SupeCumb	SuCu02BaMePd	Endógeno acumulativo	Superficie cumbrial de borde redondeado
20	SupeCumb	SuCu02MAMePd	Endógeno modelado	Superficie cumbrial de borde redondeado
10. Valles				
21	VallEnca	VaEn01AlMaMd	Exógeno denudativo	Valle encajado (Cañón)
22	VallEnca	VaEn01MdMaMo	Exógeno denudativo	Valle encajado (Cañón)
23	VallPiRo	VaPi01BaMePd	Endógeno acumulativo	Valle de piso rocoso

Tabla 3. Variables morfométricas características, consideradas en la determinación de subunidades geomorfológicas de la microcuenca.

Variables morfométricas para la determinación de subunidades geomorfológicas en la microcuenca de Chalchihuapan				
Pendiente		Drenaje		
		Disección	Densidad	Forma
Muy Baja	0-3	Muy alta	Muy densa	Dendrítico
Baja	4-8	Alta	Densa	Rectangular
Media	9-14	Media	Moderada	Enrejado
Media-Alta	15-21	Baja	Poco densa	Pinado
Alta	22-28	Muy baja		Radial
Alta - Muy Alta	29-62			Entrelazado
				Difuso
				Errático
				Anastomosado
				Meándrico

Tabla 4. Nomenclatura establecida para nombrar unidades, sub-unidades y sus características morfoestructurales.

Nomenclatura relieve				
Relieve	Tipo	Pendiente	Disección	Dens. Drenaje
XxXx	00	XX/Xx	Xx	Xx

Ejemplo: la clave CoLa02AlMePd significa: Colada de Lava cordada (02), de pendiente Alta, disección Media y densidad de drenaje, Poco densa.

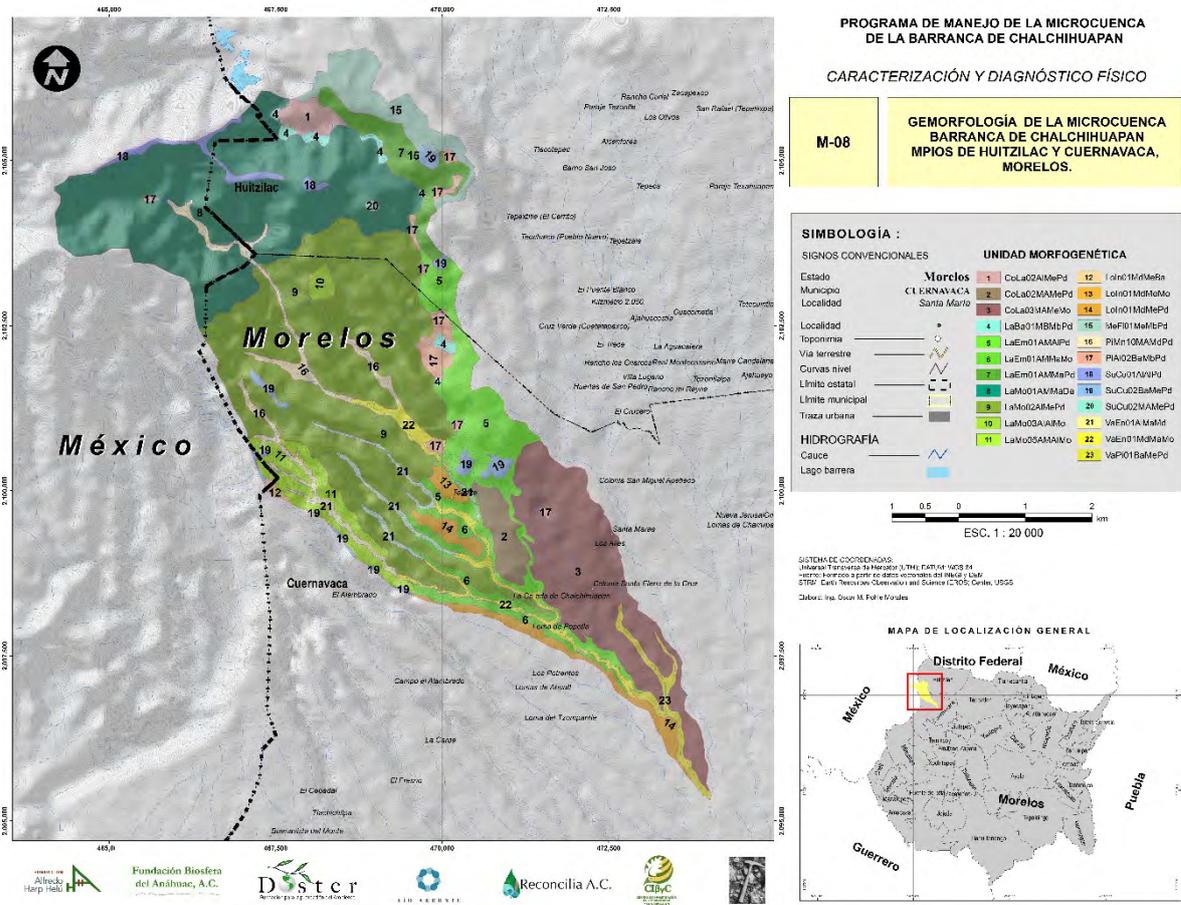


Figura 11. Geomorfología de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.

Descripción de unidades y subunidades geomorfológicas

1. Campos y coladas de lava, domos y conos cineríticos

Formados por colinas y lomeríos relativamente bajos y bulbosos, dentro de las cuales sobresalen estructuras convexas (domos), frentes de lava y conos cineríticos. Aun cuando su topografía no se caracteriza por un fuerte relieve, su superficie es muy accidentada, debido a derrames lávicos de tipo aa (en bloques), pahoehe (cordados) y flujos piroclásticos, por lo que generalmente se les conoce como malpaís, texcales o pedregales. Debido a dicha condición, son unidades muy permeables, constituyendo importantes zonas de recarga de acuíferos. Dentro de esta clase se observan las siguientes subunidades:

- (1) Colada de lava cordada (Pahoehoe), clave: CoLa02AlMePd. Presenta una pendiente alta a media, con una disección media y densidad de drenaje poco desarrollada debido a su alta permeabilidad. Su estructura lobular evidencia una viscosidad alta, que se desprende de la Mesa La Gloria obstruyendo el drenaje de la vertiente norte del cerro de Cuahutépétl; lo cual originó 4 vasos o lagos de barrera, siendo el de Atexcapan el único que aún muestra un pequeño cuerpo de agua superficial, alimentado por pequeños manantiales perennes de ladera, y que se ve incrementado durante la época de lluvias. Su litología característica se puede definir como traquiandesítica.
- (2) Colada de lava cordada (Pahoehoe), clave: CoLa02MAMePd. A diferencia de la subunidad anterior, muestra una pendiente general más alta y una estructura lobular alargada, con frentes de lava masivos que forman paredes de hasta 10 m de altura. Esta colada se desprende de la base del domo de San Pedro y acusa una estructura fluidal definida. El tipo de roca se identifica como lava andesítico – basáltica y toba andesítica.
- (3) Colada de lava y flujos piroclásticos, clave: CoLa03MAMeMo. En este caso, se advierte una colada de mayor fluidéz, que forma estructuras alargadas y abruptas de pendiente media - alta, disección media y densidad de drenaje moderada. Se desprende también a partir de la base del domo de San Pedro, extendiéndose hacia el sur, en la margen izquierda de la barranca de Chalchihuapan, prologándose aún después de su confluencia con la barranca de San Pedro. Su litología consiste en traquibasalto y toba basáltica.

2. Lagos de barrera.

Vasos de captación intermontanos, formados por el bloqueo del escurrimiento superficial original, que puede ser ocasionado por movimiento de masas (flujo de escombros, deslizamientos, etc.) o por una corriente de lava, como en este caso. Los lagos de barrera se alinean en el contacto entre la Sierra de Zempoala y las coladas de lava denominadas Mesa El Tabaquillo y Mesa La Gloria; conservándose actualmente sólo 5 cuerpos de agua, tales como las lagunas: Hueyapan, Prieta, Tonatiahua, Zempoala y Atexcapan. En el resto de los numerosos vasos, algunos han sido desecados por completo (Laguna de Quila) o se encuentran

en proceso de desecación por sobre explotación (Hueyapan), y la mayoría se encuentran azolvados y solo conservan una pequeña lámina de agua durante la época de lluvias.

- (4) Lago de barrera volcánica, clave: LaBa01MBMbPd. Depresión endorreica intermontana ocupada por una planicie, y en su caso un cuerpo de agua, de superficie horizontal o pendiente muy baja, sin disección apreciable y drenaje poco desarrollado. El vaso se encuentra cubierto por sedimentos derivados de la erosión de las laderas montañosas, decreciendo su granulometría hacia el centro del vaso donde se encuentran horizontes limo – arcillosos, principalmente. Cabe destacar que los lagos son alimentados por manantiales y pequeños escurrimientos perennes que descargan de acuíferos colgados; tal es el caso de los lagos de Quila, Laguna Prieta, Hueyapan, Tonatiahua, Zempoala y Atexcapan, pero la deforestación, obras de captación inadecuadas (p. ej. Quila, Hueyapan y arroyo La Cachucha), así como su sobre-explotación y abandono, las han condenado a su extinción.

3. Laderas empinadas

Laderas de pendiente muy alta, que forman altas paredes que llegan a ser verticales y que bordean lomeríos y superficies cumbrales interfluviales, mostrando una disección alta a muy alta. Los cortes más abruptos ocurren en rocas fracturadas o de baja compactación, tales como las que corresponden al Grupo Chichináutzin y Formación Cuernavaca (facies Glacis), respectivamente. Por tal motivo su estabilidad es muy precaria y constituyen un área de peligro geológico. Dentro de esta unidad se distinguen:

- (5) Ladera empinada activa, clave: LaEm01AMAlPd. Constituida por diversos frentes de lava en bloques y fluidal, que forman un relieve escalonado, mostrando paredes de fuerte pendiente en los bordes que están en contacto con otras formaciones, o que debido a erosión diferencial se ha labrado un cauce profundo, formando cascadas y paredes verticales que debido a un intenso fracturamiento son inestables.
- (6) Ladera empinada activa, clave: LaEm01AMMaMo. Laderas labradas en la Formación Cuernavaca (Facies Glacis), formando paredes empinadas a verticales en cuyo pie se encuentran evidencias de grandes deslizamientos que han obstruido el cauce, o que muestran grandes cortes semicirculares que indican fallas rotacionales.

- (7) Ladera empinada activa, clave: LaEm01AMMaPd. Paredes de lava formadas por grandes bloques que bordean el extremo sur de la Mesa La Gloria y el domo Cerro El Ocelote.

4. Laderas montañosas

Esta unidad se determinó de acuerdo con la extensión y altura relativa del relieve, relacionándose principalmente con sistemas o cadenas montañosas que presentan rasgos morfogenéticos comunes. De acuerdo con lo anterior, se definieron las siguientes subunidades:

- (8) Ladera montañosa alta, clave: LaMo01AMMaDe. Consistente en laderas de pendientes altas a muy altas, que forman las grandes sierras de Zempoala, Las Cruces y Nevada, y que limitan a los valles de Cuernavaca, Toluca y CD. de México, respectivamente, sobrepasando los 2, 800 m.s.n.m. Su relieve es muy marcado, destacando un drenaje acentuado por un fuerte control estructural. Esta unidad muestra profundos valles modelados cuya sección se aproxima a una “U” labrada por antiguos glaciares, cuya evidencia casi ha desaparecido, salvo algunos bloques erráticos dispersos y relictos de morrenas periglaciares mezcladas con lahares y piedemontes.
- (9) Ladera montañosa media, clave: LaMo02AlMePd. Localizadas principalmente en la parte media – alta de la microcuenca, formadas por derrames andesíticos, que muestran alargados interfluvios con accidentadas superficies cumbrales, disectados por un marcado drenaje subdendrítico de densidad media.
- (10) Ladera montañosa baja, clave: LaMo03AlAlMo. Consiste en laderas de relieve relativamente bajo situadas en la base de la vertiente sur del cerro Cuahutépétl. Su forma es bulbosa y escalonada, denotando flujos de lava andesítica de viscosidad media.
- (11) Ladera montañosa fracturada, clave: LaMo05AMAlMo. Corresponde a las empinadas laderas que caracterizan los depósitos volcano-sedimentarios de la Formación Tepoztlán. Muestran un relieve muy abrupto, formado por acantilados y formas prismáticas delimitadas por grandes fracturas que le confieren una morfología muy característica. Se localizan en el límite centro - occidental de la microcuenca y la mayor de sus cúspides se encuentra cubiertas por lahares y cenizas volcánicas derivadas de la Sierra de Zempoala.

5. Lomeríos

Unidad constituida por alargados interfluvios, cuya superficie cumbral deriva de un extenso abanico aluvial en etapa de rejuvenecimiento y que muestra una ligera pendiente hacia el sureste (Glacis de Buenavista). Se compone de depósitos volcano-sedimentarios y lahares derivados de la Sierra de Zempoala; y ha sido designada como Formación Cuernavaca, facies Glacis de Buenavista. Sobre dicha superficie se desarrolla generalmente una agricultura extensiva de temporal y actualmente es la parte que recibe mayor presión demográfica y urbana de la ciudad de Cuernavaca. Dentro de la zona urbana, en el extremo suroeste de la microcuenca, se han desarrollado las colonias de Tetela del Monte, Jardines de Los Reyes y una parte de Jardín Tetela, siendo su uso principalmente destinado a viveros, residencial y comercial, respectivamente. Las subunidades que se han determinado son:

- (12) Lomerío interfluvial tendido, clave: LoIn01MdMeBa. Reducida superficie cumbral, situada en el vértice donde converge el sistema de barrancas del Glacis de Buenavista, y el cual se encuentra limitado por profundas barrancas o cañones, tales como Mexicapa y la cabecera de la barranca El Salto, esta última tributaria de la barranca de Chalchihuapan.
- (13) Lomerío interfluvial tendido, clave: LoIn01MdMeMo. Lomerío con superficie cumbral de pendiente media a media – alta, constituida en su mayor parte por lahares provenientes de la sierra de Zempoala. Su extremo noroeste se encuentra limitado por derrames andesíticos de relieve más abrupto y debido a su topografía más suave, sufre un avanzado proceso de deforestación para la apertura de tierras de cultivo; y recientemente, huertas de aguacate.
- (14) Lomerío interfluvial tendido, clave: LoIn01MdMePd. Lomeríos de superficie cumbral de pendiente media – baja, donde se observa un activo proceso de deforestación por la apertura de superficies destinadas a cultivos temporales y huertas de aguacate. En el límite suroccidental de la microcuenca, se tiene un gran número de viveros (Tetela del Monte) que va urbanizándose hacia el sur hasta constituir parte del área urbana de la ciudad de Cuernavaca.

6. Mesetas

Superficies elevadas, planas o ligeramente onduladas, con inclinación en una sola dirección y limitada por laderas de fuerte pendiente o valles encajonados. Este relieve es común en derrames de lava basáltica recientes o que han persistido como relictos en la cima de valles erosionados.

- (15) Meseta de flujos volcánicos y domos, clave: MeFl01MeMbPd. Unidad representada por la meseta volcánica denominada Mesa La Gloria, situada en el extremo norte de la microcuenca, formada por derrames de traqui-andesita basáltica, que muestran un estructura cordada fluidal, con una pendiente media a baja, disección muy baja y drenaje poco desarrollado o difuso. No obstante su baja pendiente, muestra una superficie muy accidentada o malpaís, constituida por bloques, lava cordada, hornitos y domos. La falta de un drenaje definido revela la alta permeabilidad de esta subunidad y por lo tanto, constituye un área de recarga del acuífero de Cuernavaca. Afortunadamente, su inaccesibilidad y pedregosidad ha impedido la tala indiscriminada y apertura de nuevos campos de cultivo.

7. Piedemontes

Estos se distinguen por presentar un origen exógeno acumulativo (en algunos casos denudatorio y tectonizado) del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno), y estar compuestos por fragmentos de lavas, tobas, cenizas, lahares y depósitos periglaciares erosionados. Ocupan las partes bajas de vertientes montañosas y forman rellenos aluviales en valles encajonados. Por su naturaleza, se consideran inestables y es común observar el fenómeno de reptación de suelos en dichos depósitos.

- (16) Piedemonte aluvial, clave: PiMn10MAMePd. Compuesto por sedimentos eluviales y aluviales de composición diversa, muestran una pendiente alta a muy alta, un drenaje moderado y poco denso. Se encuentran en el fondo del valle encajonado situado en la cabecera y parte media de la barranca Chalchihuapan, siendo en esta última parte más amplio y donde se han encontrado vestigios de bloques estriados producidos por abrasión glacial.

8. Planicies

Definidas como superficies extensas y planas ocupadas por depósitos volcano-sedimentarios, aluviales, fluviales y/o lacustres que, colmatan una cuenca o valle.

- (17) Planicie aluvial, clave: PlAl02BaMbPd. Se encuentran a lo largo del contacto geológico que delimita al Grupo Chichináutzin con las formaciones Zempoala y Cuernavaca en la parte norte de la microcuenca. La mayor parte de dichas planicies ocupan la periferia de los pequeños lagos de barreras descritos en párrafos

anteriores; y en algunos casos, se han formado en valles intermontanos circunscritos casi completamente dentro de coladas de lava.

9. Superficies cumbrales

Referidas a superficies que ocupan la cima de elevaciones aisladas o sierras, y cuyos bordes pueden ser irregulares y accidentados o redondeados y de pendiente moderada. Dentro de la microcuenca se distinguen tres subunidades:

- (18) Superficie cumbral de borde dentado o accidentado, clave: SuCu01AlAlPd. Ocupa la parte más alta de la microcuenca, donde llega a alcanzar los 3,300 msnm. Su perfil es muy irregular, con fuertes variaciones altitudinales y una superficie muy estrecha que llega a formar una aguda divisoria hidrográfica. Su traza sinuosa y afilada, sugiere la acción erosiva de un antiguo glaciar.
- (19) Superficie cumbral de borde redondeado, clave: SuCu02BaMePd. Relieve convexo característico de los domos volcánicos que coronan la meseta volcánica La Gloria y frentes de lava que se desprenden de esta. Su topografía es relativamente suave, sin un drenaje definido.
- (20) Superficie cumbral de borde redondeado, clave: SuCu02MAMePd. Superficie sensiblemente cónica, de fuerte pendiente, presente en la cúspide del volcán: Cerro Cuahutépel Chico, de composición andesítica - basáltica.

10. Valles

Definidos como depresiones alargadas, de pendiente dirigida en un solo sentido, cuya amplitud y trazo son muy variables, originados por la dinámica fluvial, glacial, volcánica, tectónica o una combinación de estas. Las subunidades observadas en la microcuenca de Chalchihuapan consisten en:

- (21) Valle encajado, clave: VaEn01AlMaMd. Depresión alargada y profunda que se desarrolla a partir de la cabecera de la barranca El Salto, tributaria de Chalchihuapan, en la porción centro – occidental de la microcuenca. Muestra una fuerte pendiente y disección muy alta, que corta y expone rocas fracturadas de las formaciones Tepoztlán y Zempoala. Su régimen en esta sección es intermitente y se presenta en forma de torrentes durante la época de lluvias.
- (22) Valle encajado, clave VaEn01MdMaMo. Por su relieve más bajo y abierto, la mayor parte de estos valles se han destinado a la agricultura, particularmente en el

área de la barranca El Tepeite. Aun cuando su cauce es perenne, debido a la descarga de diversos manantiales de fondo, a partir de El Tepeite su caudal es derivado por completo a la población de Santa María,

- (23) Valle de piso rocoso, clave: VaPi01BaMePd. Este estrecho valle se desarrolla a partir de la confluencia de las barrancas de El Salto y Chalchihuapan, siguiendo el contacto geológico entre las formaciones Cuernavaca y Grupo Chichuináutzin, pasando a un piso basáltico que forma diversas cascadas durante su trayecto. Sus estrechas márgenes se forman de paredes abruptas y rocosas, mostrando evidencias de deslizamientos rotacionales en conglomerados; así como desprendimientos y vuelcos en frentes basálticos.

4.5.5. Geología

Estratigrafía

Según los registros geológicos obtenidos durante diversos recorridos realizados en el área de la microcuenca y zonas adyacentes - efectuados a finales del año 2014, principios de 2015; y de enero a marzo de 2017-, se han identificado cinco unidades geológicas, siendo la Formación Tepoztlán la más antigua encontrada en la región; y por lo tanto, el basamento sobre el que descansan las demás formaciones. Dicha unidad aflora en una pequeña franja situada en el límite centro – occidental de la subunidad hidrológica en estudio, precisamente en el vértice del Glacis de Buenavista.

Le sobreyacen rocas volcánicas andesíticas de la Formación Zempoala, la cual ocupa un área extensa en la zona montañosa que es la cabecera de la microcuenca, donde se localizan las mayores elevaciones de la misma.

Cubriendo a las unidades anteriores, se tiene la Formación Cuernavaca (Glacis), la cual deriva en su mayor parte de la erosión de las unidades anteriores, por lo que muestra una amplia variedad sedimentológica consistente en depósitos de tipo lahar, abanico aluvial, depósitos volcano-sedimentarios (tobas y piroclastos) y aún depósitos periglaciares. Esta formación se localiza en la parte central y el borde sur de la microcuenca en estudio.

Cubriendo a las unidades ya mencionadas y ocupando una franja de forma triangular que se proyecta de norte a sureste, en el límite oriental de la microcuenca, se encuentran expuestas coladas de lava, domos y flujos piroclásticos del Grupo Chichináutzin; cuya composición comprende andesita basáltica y basalto vesicular intensamente fracturados.

Finalmente, sobreyaciendo a todas las unidades descritas, se encuentran depósitos recientes, formados por materiales eluviales o de talud; depósitos aluviales y fluvio-lacustres, generados por la acción y sedimentación de flujos superficiales; y fluviales, derivados del arranque mecánico y transporte de las corrientes que fluyen de forma permanente por los cauces principales.

Cabe hacer notar que el cauce principal o eje de la barranca de Chalchihuapan se desarrolla en la frontera o contacto geológico que separa a las formaciones Cuernavaca y Chichináutzin, lo cual se hace aún más evidente por la diferenciación erosional que existe entre ambas unidades, siendo la roca volcánica mucho más resistente que las capas formadas por conglomerados, brechas, arenas, limos de la Formación Cuernavaca. Por esta razón, a lo largo de dicho contacto - que se desarrolla desde la parte media de la microcuenca hasta el pueblo de San Antón -, se tiene una serie de bellas cascadas, cuya caída va desde los 70 metros (Salto de San Antón), a varios metros de altura; como es el caso de las cascadas de Salto Chico, Tlaltenango, Tetela (casa blanca), Agua Azul (paseo rivereño), Los Reyes; y más al norte, ya fuera de la zona urbana, las cascadas de El Salto y Quetzalcóatl, ubicadas en las barrancas de El Salto y Chalchihuapan, respectivamente; las cuales actualmente sólo escurren durante la temporada de lluvias.

Otra característica muy importante desde el punto de vista hidrogeológico, consiste en que la heterogeneidad de la Formación Cuernavaca, particularmente su facies Glacis de Buenavista, constituye un acuitardo en comparación con las rocas volcánicas suprayacentes altamente permeables del Grupo Chichináutzin; por lo que precisamente en dicho contacto es donde se manifiesta la surgencia de manantiales de ladera y de fondo, que descargan parte del acuífero libre de Cuernavaca; lo cual puede constatarse en los manantiales más importantes localizados en la región, tales como: La India (Atzingo), El Salto y El Tepeite (Chalchihuapan), El Túnel (Amanalco), Lavaderos de Tezontepec y La Selva (prácticamente desaparecidos), Gualupita (también en declive) y el todavía abundante manantial de Chapultepec.

Descripción de las unidades estratigráficas

- Terciario

Formación Tepoztlán (Mioceno). Conformada por una secuencia volcánica (nubes ardientes) y vulcano-sedimentarias (avalanchas de lodo ó lahares), de composición

predominantemente andesítica, que muestra una erosión diferencial muy característica representada por grandes acantilados y formas prismáticas (*Foto 1*), cuyo espesor se estima en 800 m y que acusa un ligero buzamiento hacia el norte. Macías et al. (1997) reportaron una serie de derrames basálticos, con un espesor de 100 a 500 m que sobreyacen a la Formación Tepoztlán, nombrándola *secuencia máfica basal*.



Foto 1. Formación Tepoztlán. Margen derecha barranca de Mexicapa.

Formación Andesita Zempoala. Reportada por Fries (1960), la cual consiste de andesitas interestratificadas con brechas volcánicas, derrames de lava y depósitos

vulcanoclásticos, con un espesor total de 800 m. Su localidad tipo es la Sierra de Zempoala (*Foto 2*).



Foto 2. Sierra de Zempoala. Vista desde el cerro Cuahutépetl hacia el cerro El Campanario. Al fondo, el cerro La Doncella.

Formación Cuernavaca (Plioceno superior). De litología compleja, se integra por conglomerados y lahares y tilita periglacial, que en conjunto forman un extenso abanico aluvial (Glacis de Buenavista). Su granulometría incluye grandes bloques, clastos y gravas, de forma angulosa a redondeada, matriz soportados a clasto-soportados, interestratificados con arenas, limos y arcillas, que pueden presentarse cementados o sueltos. Predominan los fragmentos de material volcánico andesítico, pero también se presentan bloques derivados de la Formación Tepoztlán, pórfidos dacíticos y basaltos. La porción norte se encuentra generalmente cubierta por una capa de toba roja, comúnmente denominada “tepetate”, y es donde se asienta la parte antigua de la Ciudad de Cuernavaca (*Foto 3*).



Foto 3. Depósito de flujos de derrubios cubierto por toba basáltica (“tepetate”), asignado a la Formación Cuernavaca (facies Glacis). Corte expuesto en el puente Lomas de Ahuatlán.

- Cuaternario

Grupo Chichináutzin (Pleistoceno superior-Reciente), integrado por material volcánico cuyo espesor llega hasta los 1, 800 m, emitido por volcanes monogenéticos, estrato-volcanes y domos. Se integra por coladas y campos de lava (pahoehoe y aa), domos, conos cineríticos, estrato-volcanes, tobas, brechas y materiales piroclásticos estratificados, de composición andesítica-basáltica y basáltica (*Foto 4*).

Depósitos continentales recientes (Holoceno). Formados por depósitos de talud (eluviales), aluviones y pequeños depósitos fluvio-lacustres, que ocupan pies de laderas, cauces y vasos lacustres, respectivamente (*Foto 5*).



Foto 4. Frente de lava andesítica-basáltica en margen derecha de la barranca de Chalchihuapan. Nótese el fracturamiento por enfriamiento que asemeja burdamente una disyunción columnar.



Foto 5. Depósitos fluviales en cauce de la barranca de Chalchihuapan

En relación con los peligros geológicos e hidrometeorológicos, dichos depósitos pueden aportar valiosos indicios de su existencia, por lo que cabe considerar las siguientes observaciones:

- a) Depósitos de talud o eluviales. Originados por avalanchas de derrubios que se desprenden de las laderas de barrancas y altos topográficos, se acumulan en los pies de las laderas y en ocasiones obstruyen los cauces. Esto último puede provocar una avenida súbita por la ruptura del dique así formado, lo cual constituye un serio peligro para la población que ocupa las márgenes de la zona federal aguas abajo.

Los indicios de dicho fenómeno se pueden distinguir en los cortes de los cauces (*Foto 6*) y por la formación de montículos constituidos por la acumulación caótica de bloques rocosos (*Foto 7*).



Foto 6. Corte en depósitos de avalancha, originados por falla en ladera. Nótese la inclinación de árboles y arbustos que indican el movimiento activo o reptación de los escombros

Otro fuerte indicio de su inestabilidad, es la inclinación de árboles y arbustos provocada por el desplazamiento del sustrato rocoso, el cual se denomina reptación.



Foto 7. Acumulación de bloques rocosos por desprendimiento en ladera. Margen derecha barranca de Chalchihuapan

- b) Depósitos aluviales. Esta unidad ocupa una franja variable del cauce, llegándose a extender lateralmente formando pequeñas terrazas aluviales donde la barranca describe curvas cerradas y reduce su velocidad y capacidad de carga. Su relieve es por lo general plano, donde sobresalen grandes bloques de origen andesítico y basáltico. Su presencia es indicativa del nivel de avenidas ordinarias, y por lo tanto, no se consideran aptos para ningún tipo de obra (*Foto 8*).



Foto 8. Invasión de zona federal por barda perimetral. Obsérvese el desplome del muro a pesar del muro de retención y defensa construido al pie del mismo. Margen izquierda de barranca Chalchihuapan.

En las Figuras 12 y 13, mostradas a continuación, se presenta la carta geológica, así como tres secciones transversales de la microcuenca de la barranca de Chalchihuapan, mismas que se incluyen dentro del anexo cartográfico que forma parte del presente informe. En dichas ilustraciones, se puede observar la distribución y estructura de las diferentes formaciones geológicas descritas y los puntos de verificación realizados en campo. Su elaboración fue

complementada con la interpretación de imágenes satelitales y análisis geomorfológico del terreno.

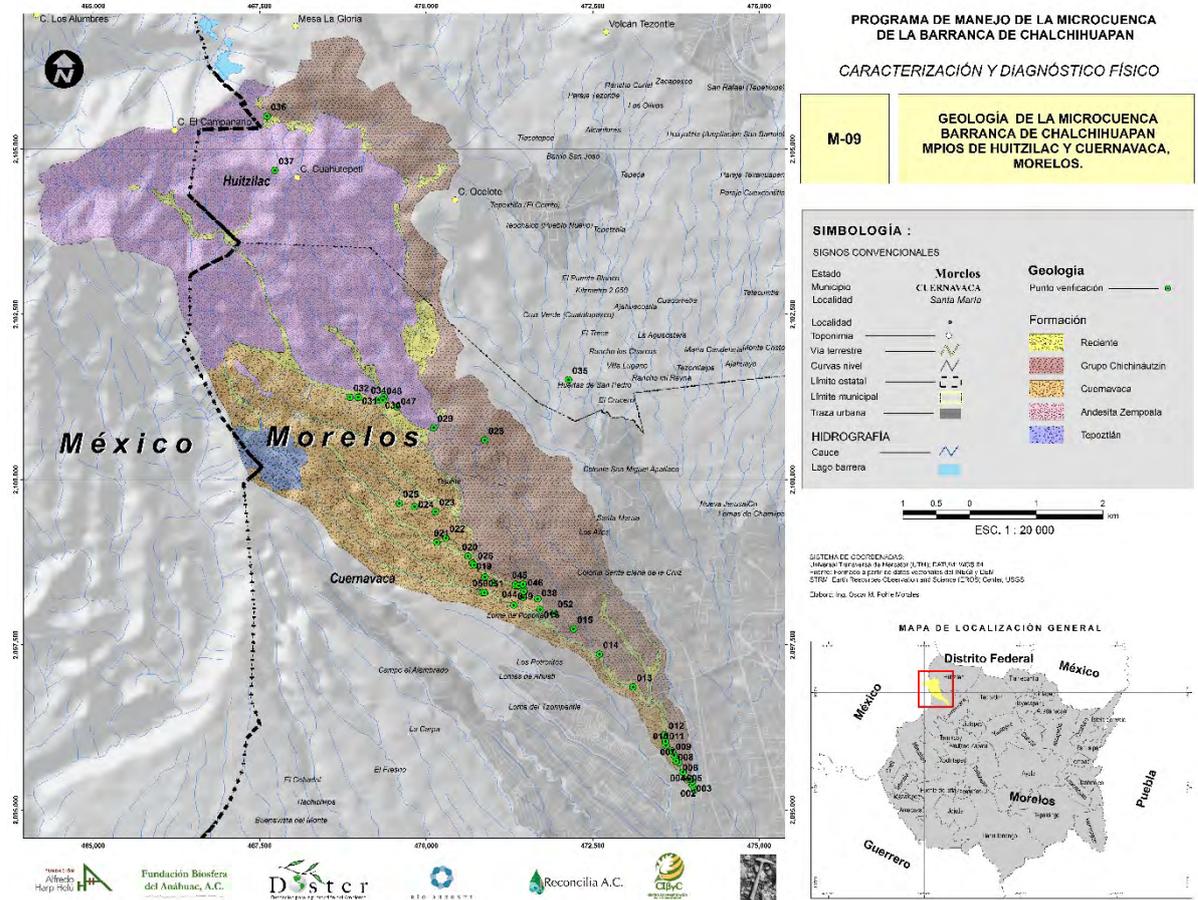
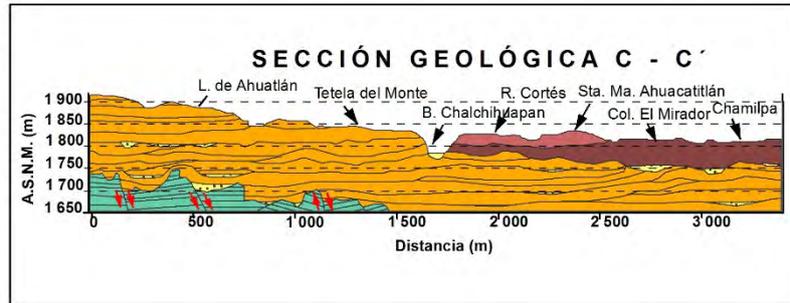
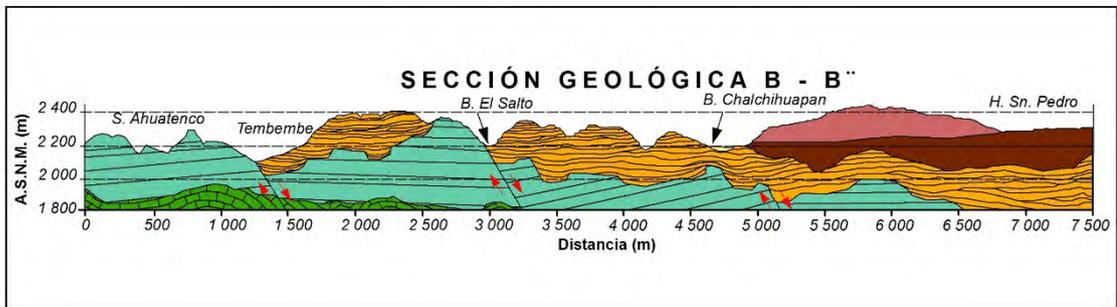
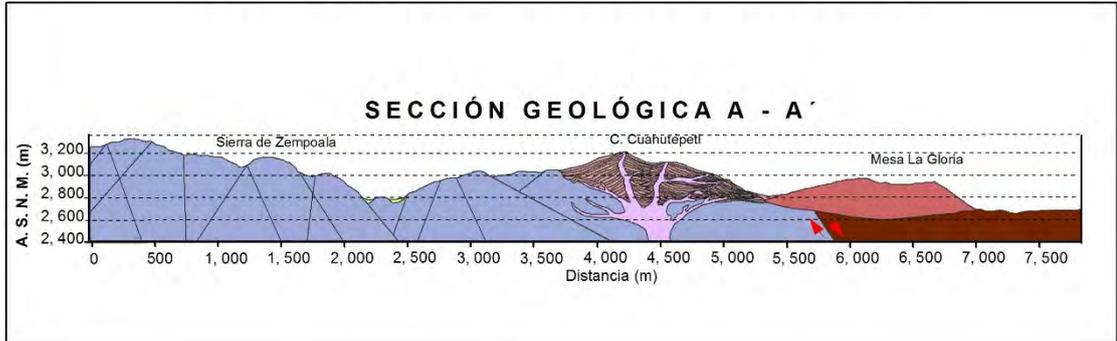


Figura 12. Carta geológica de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.

PROGRAMA DE MANEJO DE LA MICROCUENCA DE LA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN

CARACTERIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO FÍSICO

SECCIONES GEOLÓGICAS MICROCUENCA DE CHALCHIHUAPAN



Unidades litológicas		Leyenda	
	Reciente, aluvión		Paleocanales, aluvión
	Holoceno, traquibasalto		Mioceno - Plioceno, andesita-dacita-basalto
	Holoceno, basalto		Oligoceno, lahar-brecha-conglomerado
	Plioceno, lahar-conglomerado		Plioceno, pórfido andesítico
			Cretácico Sup., caliza

Formado a partir de datos vectoriales del INEGI y ArcGis 10.4
Elaboró: Ing. Oscar M. Pohle Morales



Figura 13. Secciones geológicas transversales de la microcuenca

Registros de campo

La serie de anotaciones geológicas realizadas en los puntos de verificación mencionados, se sintetizan en la *Tabla 5* que se muestra a continuación:

Tabla 5. Registro de recorridos y puntos de verificación geológica.

REGISTRO DE RECORRIDOS Y PUNTOS DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA EN MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN						
Estación	x	y	z	Fecha	Hora	Descripción
001	474,027.98	2,095,304.86	1,660.40	13/12/2014	09:42:48	Canales de abrasión fluvial en colada andesita-basáltica
002	473,994.24	2,095,382.28	1,685.53	13/12/2014	10:45:05	Contacto basalto-dep. arenosos (Form. Cuernavaca)
003	473,996.07	2,095,431.30	1,690.49	22/12/2014	09:44:40	Deflex. en cauce, contacto basalto-terrazza aluvial
004	473,949.96	2,095,469.79	1,671.00	22/12/2014	09:56:08	Form. Cuernavaca, Glacis
005	473,853.33	2,095,575.02	1,711.80	22/12/2014	10:27:51	Form. Cuernavaca-Dep. aluviales.
006	473,793.19	2,095,718.37	1,708.55	22/12/2014	10:49:10	Terraza aluvial meandro, M.D., Form. Cuernavaca
007	473,747.83	2,095,741.27	1,698.37	22/12/2014	11:01:15	Terraza aluvia meandro M.I, Form. Cuernavaca
008	473,721.74	2,095,827.90	1,716.53	22/12/2014	11:20:19	Puente. Contacto basalto-toba, M.I., 7 m espesor
009	473,690.76	2,095,896.83	1,725.34	22/12/2014	11:44:07	Form.Cuernavaca, M.I.
010	473,602.06	2,095,979.50	1,707.94	22/12/2014	12:02:34	Contacto Form. Cuernavaca-Basalto, M.I. 4 m esp.
011	473,593.40	2,096,038.35	1,705.32	22/12/2014	12:11:16	Form. Cuernavaca. M.D., Lloraderos pared 10m
012	473,583.90	2,096,136.67	1,628.60	22/12/2014	12:37:23	Contacto basalto columnar-Form. Cuernavaca (cascada)
013	473,106.10	2,096,860.88	1,756.70	26/12/2014	10:26:46	Suelo residual - M.D., Form. Cuernavaca
014	472,599.57	2,097,358.80	1,757.49	26/12/2014	14:47:10	Contacto Basalto-Form. Cuernavaca
015	472,212.39	2,097,741.47	1,881.93	26/12/2014	15:51:04	Afloramiento Toba-brecha,Tepehuajes
016	471,709.16	2,098,033.70	1,857.84	16/01/2017	08:46:11	Planicie aluvial encajonada
017	471,003.93	2,098,436.21	1,991.33	16/01/2017	09:33:17	Vereda sobre parteaguas Chalchihuapan - El Salto
018	470,879.44	2,098,522.92	2,018.79	16/01/2017	09:48:10	Vista ladera M.I. barranca Chalchihuapan, Form. Cuernavaca
019	470,696.13	2,098,732.64	2,052.61	16/01/2017	10:21:17	Huerta aguacate en superf. Cumbrial, Form. Cuernavaca
020	470,625.80	2,098,839.79	2,050.72	16/01/2017	11:23:36	Cauce sepultado por deslizamiento (flujo escombros)
021	470,157.42	2,099,051.09	2,020.86	16/01/2017	11:51:58	Eje de cauce Chalchihuapan
022	470,295.53	2,099,115.79	2,107.37	16/01/2017	12:05:44	Form. Cuernavaca en M.I. de barranca
023	470,141.72	2,099,516.71	2,167.20	16/01/2017	12:52:55	Vista domo San Pedro
024	469,825.92	2,099,591.40	2,200.00	16/01/2017	13:11:28	Cabaña en tierras de labor, superf. cumbrial Form. Cuernavaca
025	469,597.24	2,099,643.12	2,212.00	16/01/2017	13:19:32	Vista Volcán Cuahutépétl
026	470,718.32	2,098,708.98	2,042.60	16/01/2017	15:16:23	Deslizamiento (flujo de escombros) en M. I. Chalchihuapan
027	471,452.55	2,098,218.12	1,936.67	16/01/2017	15:46:06	Form. Cuernavaca en Pared "Las Truchas" M.I. Chalchihuapan
028	470,878.79	2,100,596.37	2,273.39	06/02/2017	09:24:09	Montículo de bloques basálticos, Form. Chichináuatzin, camino Tepeite
029	470,115.33	2,100,785.56	2,227.14	06/02/2017	10:27:23	Frente lava fracturada 10 m de altura, vereda canal El Tepeite
030	469,363.71	2,101,253.48	2,254.82	06/02/2017	11:10:02	Estrías por abrasión glaciar en block andesítico errático, vereda canal
031	468,980.82	2,101,245.61	2,259.84	06/02/2017	11:28:01	Tanque receptor derivador, M.I. arroyo El Tepeite
032	468,853.00	2,101,246.40	2,287.25	06/02/2017	11:39:00	Cauce seco por derivación del arroyo El Tepeite
033	468,659.62	2,101,348.32	2,284.61	06/02/2017	11:58:21	Fin de vereda arroyo El Tepeite
034	469,280.75	2,101,209.64	2,259.25	06/02/2017	14:02:44	Depósito de conglomerado arenoso, corte canal El Tepeite
035	472,137.08	2,101,510.86	2,232.61	06/02/2017	15:53:15	Cruz, Huertas de San Pedro
036	467,611.27	2,105,497.50	2,855.81	01/03/2017	09:24:28	Manantial y vaso en Tules de Atexcapan
037	467,727.15	2,104,678.25	3,131.98	01/03/2017	16:03:20	Pórfido dacítico en sup. cumbrial parteaguas Cuahutépétl - Campanario
038	471,674.59	2,098,194.98	1,881.63	08/03/2017	09:52:00	Contacto colada de lava con basamento brecha grave - arenosa (tilita?)
039	471,472.58	2,098,327.62	1,882.00	08/03/2017	09:59:00	Amate "El Elefante" sobre brecha grave - arenosa, M-D.
040	471,421.80	2,098,371.41	1,899.47	08/03/2017	10:02:00	Tanque de captación y bombeo particular en M.I.
041	471,421.80	2,098,371.41	1,919.27	08/03/2017	10:29:00	Montículo de bloques de escombros por deslizamiento ladera M.D.
042	471,331.52	2,098,394.89	1,911.63	08/03/2017	11:39:00	Cascada Quetzalcóatl, contacto conglomerado - andesita basáltica
043	471,342.92	2,098,415.45	1,896.33	08/03/2017	12:14:00	Pequeño manantial de fondo en cauce
044	471,386.69	2,098,401.00	1,907.32	08/03/2017	13:01:00	Surgencias de fondo en base de bloques andesíticos sueltos
045	471,387.10	2,098,395.25	1,952.73	08/03/2017	13:13:00	Pared conglomerado cementado M.I. cauce
046	471,451.98	2,098,415.81	1,901.59	08/03/2017	15:49:00	Suelo y depósitos aluviales en contacto con Form. Cuernavaca, M.D.
047	471,465.59	2,098,302.96	1,893.54	08/03/2017	16:08:00	Criaderos de trucha en base de pared brecha cementada, M.I.
048	469,561.94	2,101,098.62	2,263.40	22/03/2017	10:01:35	Medición con flujómetro digita en canal El Tepeite
049	469,349.03	2,101,201.55	2,267.37	22/03/2017	11:45:28	Depósitos de arena soldada andesítica, muy alterada, canal El Tepeite
050	471,314.01	2,098,098.81	1,875.98	22/03/2017	15:26:13	Red de mangueras de PVC en cauce de arroyo El Salto
051	470,843.57	2,098,292.17	1,980.30	22/03/2017	16:04:27	Pared adesítica-basáltica en cascada El Salto
052	470,873.58	2,098,289.68	1,986.41	22/03/2017	16:24:06	Manantiales de ladera, M.I., cascada El Salto
053	471,918.66	2,097,976.92	1,895.77	22/03/2017	17:52:10	Dep. piroclásticos (toba arenosa) sup. cumbrial bajada Las Truchas

4.6. Hidrología

4.6.1. Meteorología

Con la finalidad de determinar la distribución de la precipitación y temperatura medias anuales dentro de la microcuenca, se consideró el número de años registrados en 168 estaciones meteorológicas distribuidas en los límites del estado de Morelos y dentro de su territorio, agrupando las estaciones con periodos mayores a 25 años. Bajo tal criterio, fueron seleccionadas 24 estaciones cuyos datos comprenden 40 años o más (86%); 3 estaciones con más de 30 años registrados (11%); y una estación con 27 años reportados; sumando en total 28 estaciones. Su distribución es aproximadamente homogénea, cubriendo la mayor parte del territorio morelense, a excepción de una franja en su extremo norte y otra porción localizada en su límite sur - occidental (*Figura 14*).

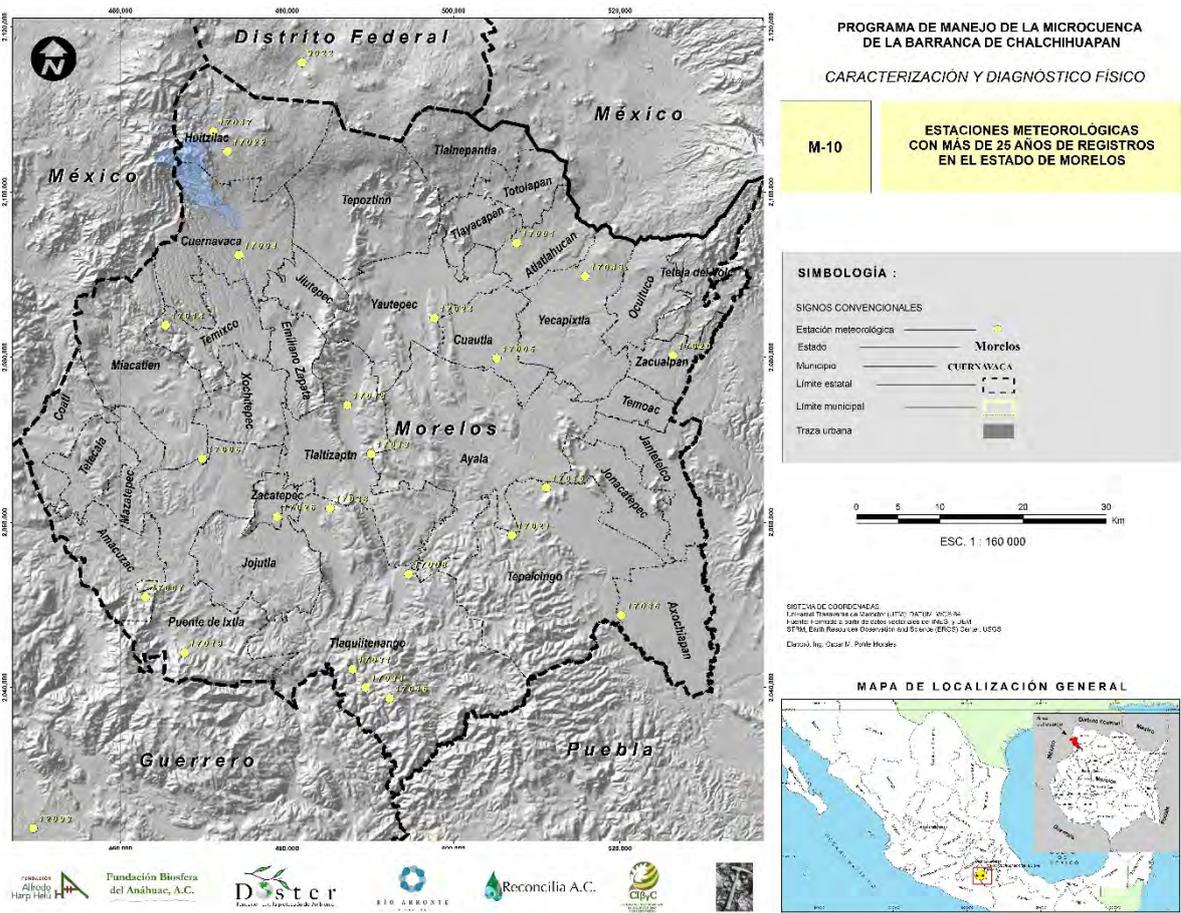


Figura 14. Localización de estaciones meteorológicas con más de 25 años de registros continuos.

Por otra parte, considerando el criterio de la Organización Meteorológica Mundial, la cual ha formulado una serie de recomendaciones relativas a la densidad mínima de estaciones pluviométricas requeridas en diversas regiones (*Tabla 6*), se tiene que, el estado actual de la red pluviométrica de Morelos cumple con dichos requerimientos; sin embargo, el 45 % de las estaciones morelenses (23 estaciones), carecen de continuidad y calidad en sus registros, siendo muy común que muestren largos periodos sin datos; o incluso, se encuentran fuera de operación desde hace varios años. En la *Tabla 7* se enumeran las estaciones seleccionadas y su ubicación en coordenadas UTM WGS84.

Tabla 6. Densidad mínima de las redes de estaciones pluviométricas (Norma OMM, 1970).

Categoría de Regiones	Límites de las normas para una red mínima. Sup. en km ² /estación	Límite de las normas admisibles en circunstancias especialmente difíciles. Sup. en km ² /estación
I. Regiones llanas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales	600 – 900	900 – 3000
II. Regiones montañosas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales.	100 – 250 25	250 – 1, 000
III. Zonas áridas y polares	1500 – 10, 000	-

Tabla 7. Estaciones con más de 25 años de registros continuos en el estado de Morelos.

Relación de estaciones meteorológicas consideradas para el balance hídrico del estado de Morelos					
No.	CLAVE	ESTACION	X	Y	ALTITUD
1	9022	Km.39.5 a Cuernavaca	481,800.11	2,115,712.06	2,240
2	9032	Milpa Alta	497,693.46	2,121,912.86	2,420
3	12093	P. Valerio Trujano	449,534.93	2,022,920.69	842
4	12116	Iguala (DGE)	441,890.69	2,028,965.71	751
5	15007	Amecameca de Juarez (DGE)	523,953.67	2,116,395.84	2,479
6	17001	Atlatlahuacan	507,574.54	2,093,821.69	1,656
7	17004	Cuernavaca (DGE)	474,201.93	2,092,362.01	1,529
8	17005	Cuautla (DGE)	505,180.97	2,079,836.28	1,309
9	17006	El Rodeo	469,833.35	2,067,688.78	1,200
10	17007	Huajintlan	463,005.06	2,050,919.36	1,049
11	17008	Huautla	494,607.14	2,053,712.14	971
12	17013	Temilpa	490,100.85	2,068,281.31	1,000
13	17014	Temixco (DGE)	465,411.57	2,083,863.00	971
14	17015	Tepalcingo	511,131.97	2,064,194.80	1,200
15	17016	Tequesquitengo	492,314.56	2,038,653.45	970
16	17018	Ticuman	487,234.95	2,074,184.83	1,130
17	17019	Tilzapotla	467,684.53	2,044,180.37	1,200
18	17020	Tlacotepec	526,341.74	2,080,191.57	1,302
19	17021	Tlacualera (S. F. Neri)	507,003.39	2,058,415.00	1,560
20	17022	Tres Cumbres	472,845.10	2,104,904.86	2,800
21	17024	Yautepec	497,717.26	2,084,721.82	1,150
22	17026	Zacatepec (A.C.A.E. La Victoria)	478,817.18	2,060,638.44	1,226
23	17031	Jojutla (SMN)	487,858.45	2,042,189.65	891
24	17033	Xicatlacotla (CFE)	489,440.91	2,039,975.87	1,000
25	17036	Lagunillas de Rayon	520,140.71	2,048,712.14	1,100
26	17038	Nexpa	485,146.59	2,061,676.88	1,230
27	17043	Yecapixtla E.T.A. 118	515,796.91	2,089,769.43	1,690
28	17047	Huitzilac (DGE)	471,153.62	2,107,304.09	2,850

En relación con los datos meteorológicos de la microcuenca, fueron seleccionadas tres estaciones que se consideraron como las más representativas de la zona, siendo estas:

- Estación 17002, Colonia El Empleado; con datos registrados durante el intervalo del 1 de enero de 1939 al 31 de enero de 2002 (63 años); actualmente inactiva.

- Estación 17009, C.B.T.A., Huitzilac, (39 años); cuyos registros comprenden el periodo 1 de octubre de 1961 al 31 de diciembre de 2000 y que actualmente se encuentra inactiva.
- Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México; comprendiendo el periodo 1 de junio de 1969 al 31 de marzo de 2012 (43 años); en operación.

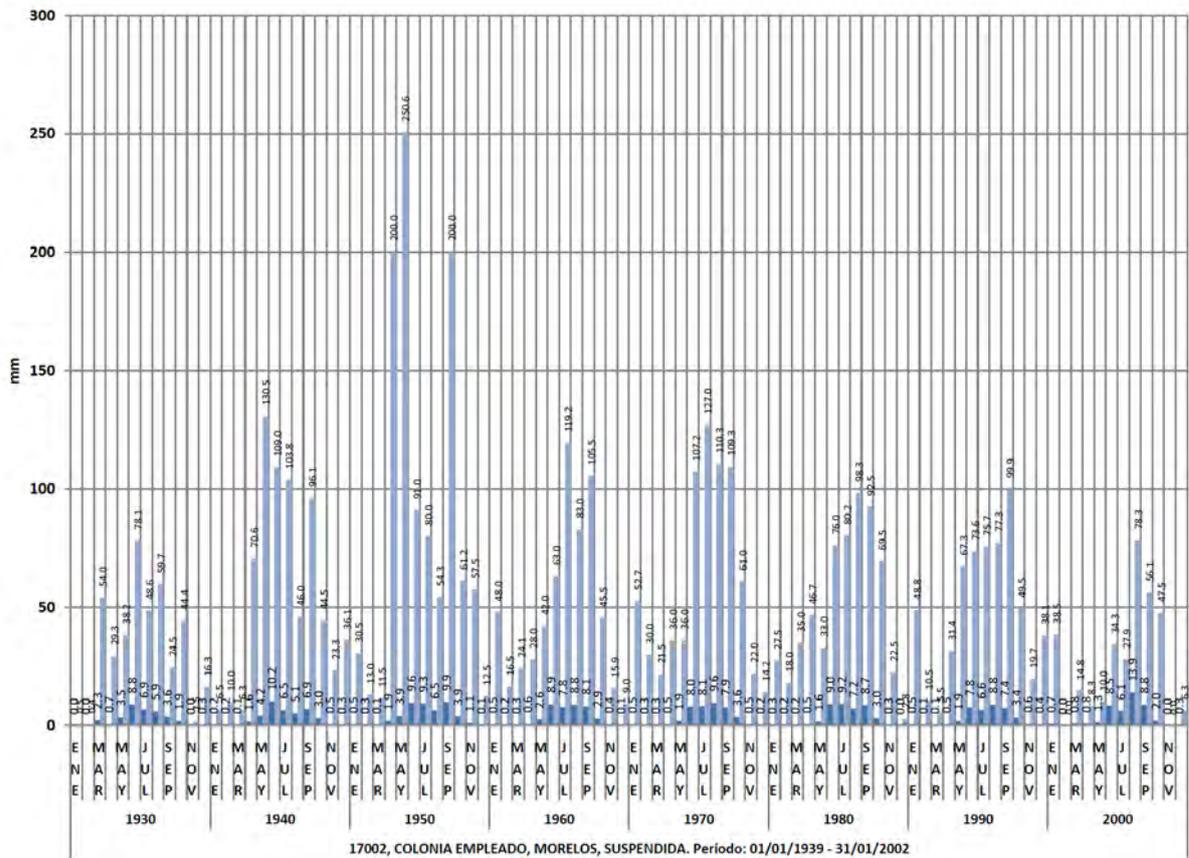
De acuerdo con los datos contenidos en las estadísticas de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se tienen lo siguiente:

Estación 17002, Colonia El Empleado, Cuernavaca, Mor.

Precipitación

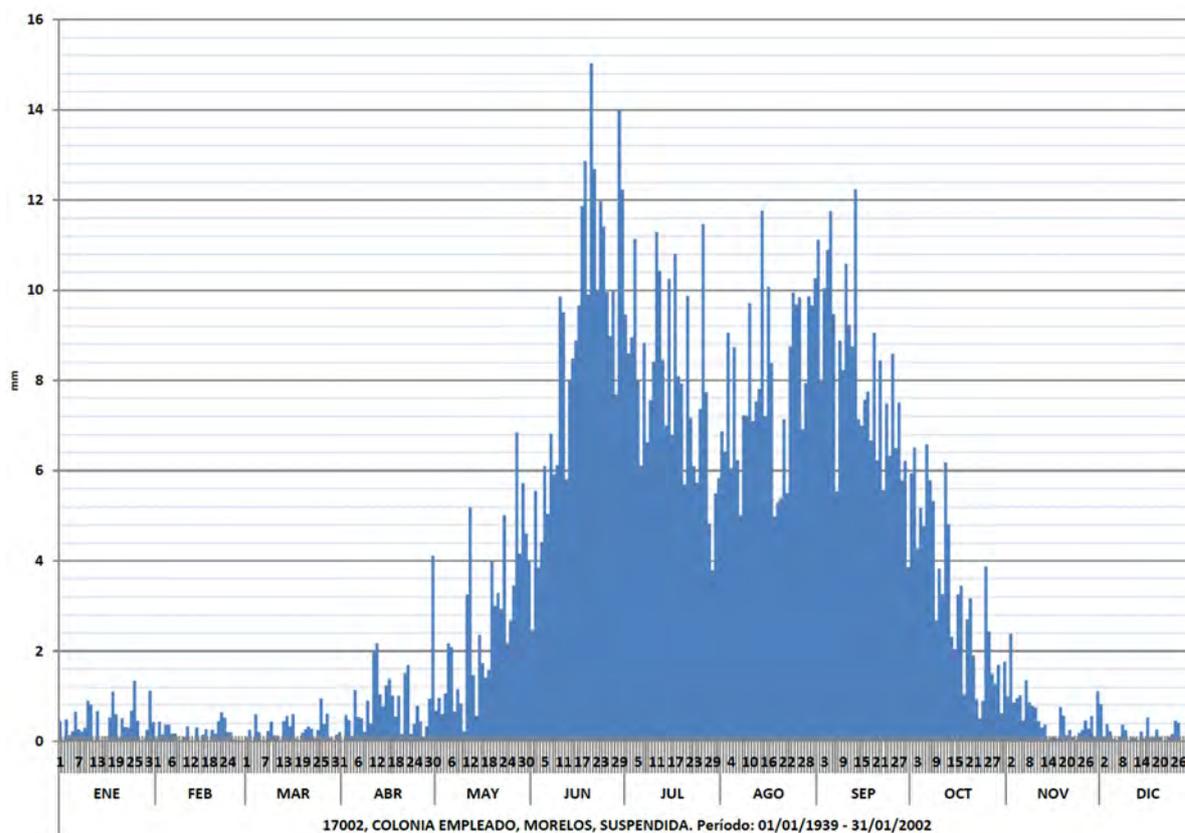
Considerando los valores del promedio y máximo de lluvia por década-mes (*Gráfica 2*), se observa que la década más lluviosa registrada en dicha estación corresponde a la de 1950, registrándose máximos históricos de 200 mm, 250.6 mm y 200 mm en los meses de abril, mayo y septiembre, respectivamente. Antes y después de esa década, los valores máximos permanecen dentro de un rango menor a los 150 mm mensuales, notándose un decremento a partir de la década de 1980.

También se observa que la distribución de la lluvia promedio mensual se conserva aproximadamente igual durante las décadas de los 30's y 40s', mostrando un sesgo hacia la derecha; permaneciendo dicha distribución aproximadamente normal durante las décadas posteriores, para invertirse después su sesgo a partir de la década de 1990.



Gráfica 2. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Por otra parte, de acuerdo con la Gráfica 3, las máximas precipitaciones promedio diarias presentan un comportamiento bimodal, registrándose los mayores valores en los meses de junio, agosto y septiembre; siendo los meses más secos diciembre y febrero.



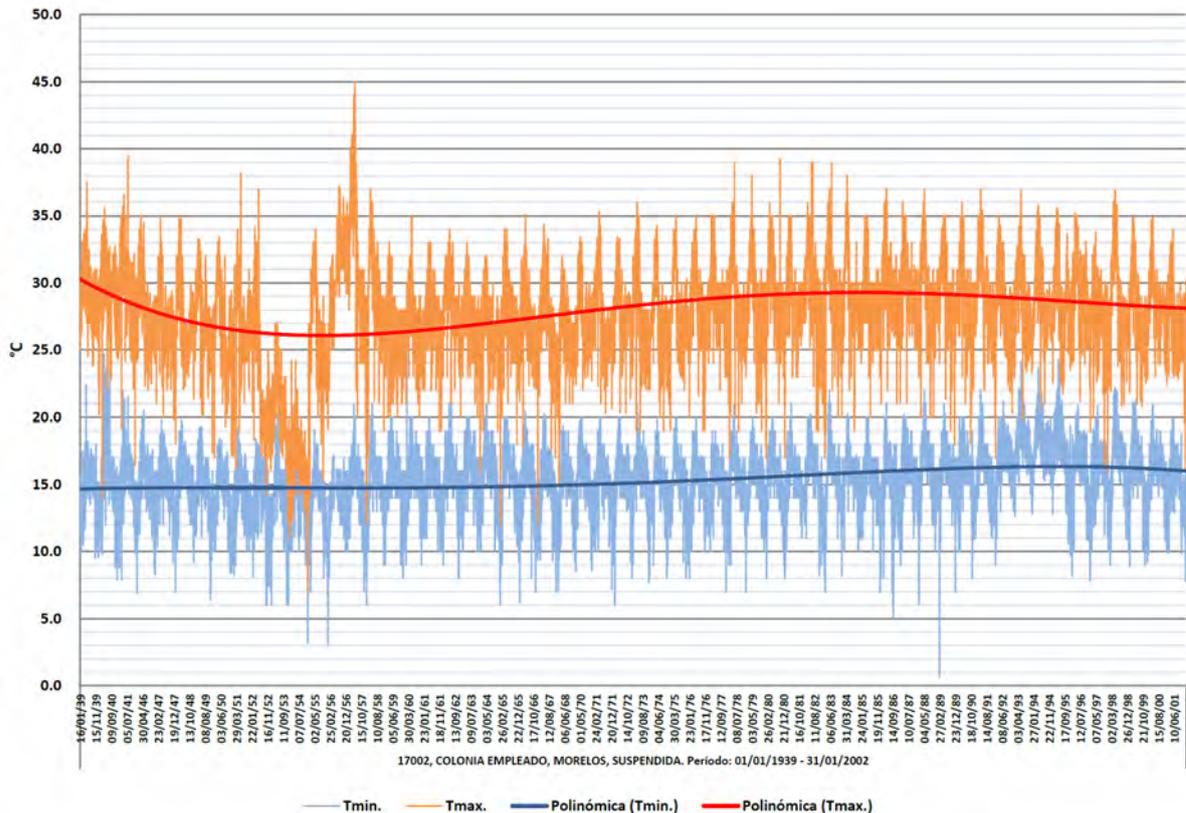
Gráfica 3. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1939 – 2002, en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Temperatura

Las temperaturas máximas y mínimas promedio registradas durante el periodo mencionado, son 28.0 °C y 15.4 °C, respectivamente; mostrando valores extremos que van de los 7.0 °C a 45.0 °C, en el caso de temperaturas máxima; y 0.6 °C a 26.0 °C en las mínimas.

La variación de temperaturas máximas y mínimas diarias, durante el mismo periodo, se muestra en la Gráfica 4, en la cual se observa que las mayores variaciones ocurren en las temperaturas máximas, iniciando su registro con poco más de 30 °C, mostrando una tendencia negativa que cae a valores mínimos a inicios de los 50's, para dispararse a mediados de la misma década hasta los 45 °C, y nuevamente volver a bajar y recuperar valores menos extremos a fines del mismo decenio. A partir de los 60's, la tendencia es progresivamente positiva, hasta alcanzar valores ligeramente menores a los 40 °C en la década de los 80's, volviendo a decrecer hasta los 28 °C en los últimos años de los registros.

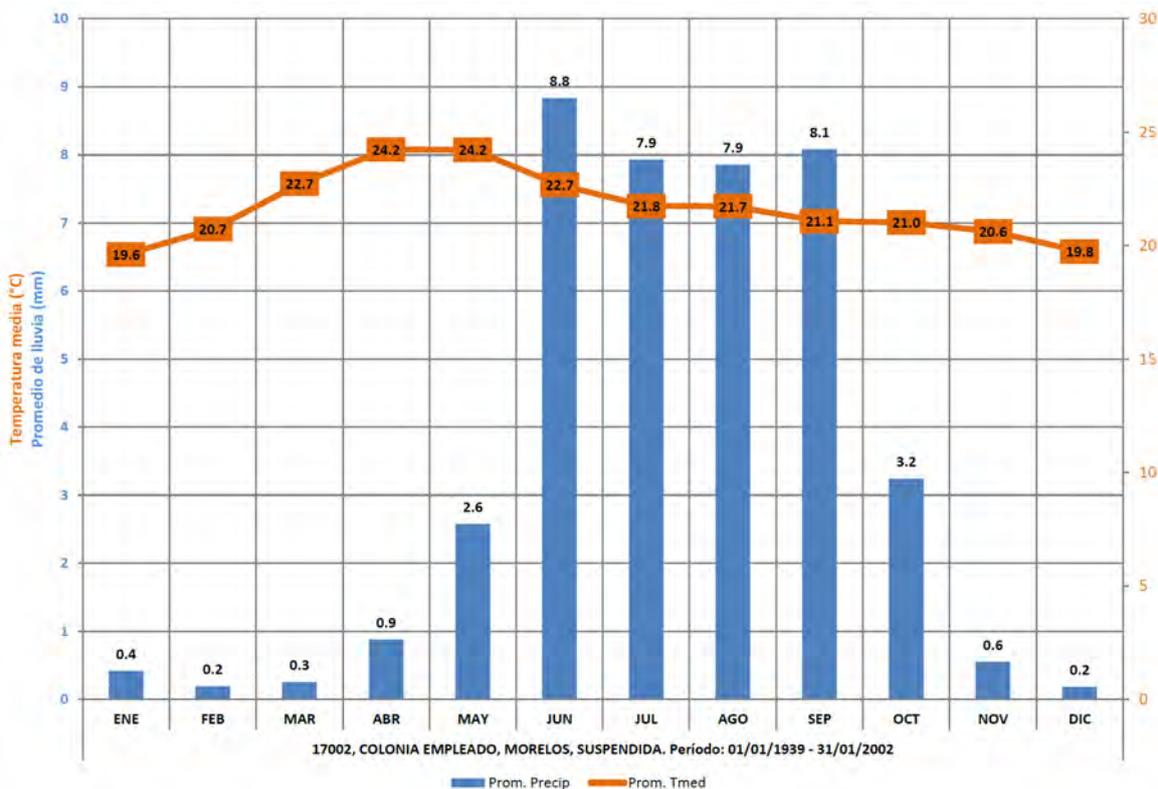
Con respecto a las temperaturas mínimas, sus registros muestran una tendencia más estable; sin embargo, a partir de la década de 1980 se incrementan ligeramente hasta alcanzar un máximo ligeramente superior a los 24 °C, para luego decrecer y registrarse valores ligeramente por encima de los 16 °C al finalizar los registros de la estación.



Gráfica 4. Registro diario de temperaturas máxima y mínima durante la serie: 1939 – 2002, en la Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Climograma y balance hídrico

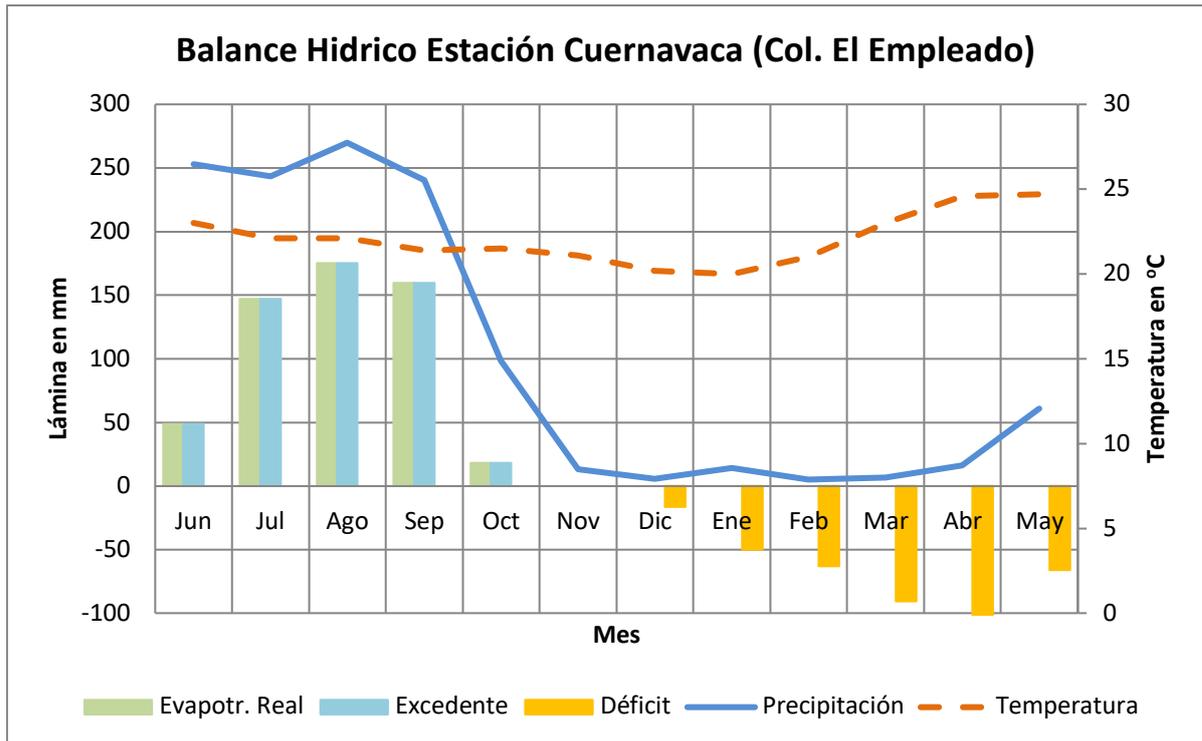
De acuerdo con los datos registrados por el SMN y el balance hídrico obtenido a partir del método de Thornthwaite, se tienen las gráficas 5 y 6, que ilustran el climograma, así como el balance hídrico (Tabla 8) de la estación analizada.



Gráfica 5. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1939 – 2002, Estación 17002, Col. El Empleado, municipio de Cuernavaca, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Tabla 8. Cálculo de balance hídrico para la Estación 17002.

BALANCE HÍDRICO POR MÉTODO DE THORNTHWAITE										
Rmax=		100								
Mes	Temp.	Pm	Etc	Pm-Etc	R	ΔR	Etr	F	Ex	D
Jun	23.00	253.07	104.27	148.80	100.0	100.0	104.27	0.00	48.80	24.4
Jul	22.10	243.68	96.67	147.01	100.0	0.0	96.67	0.00	147.01	85.7
Ago	22.10	269.88	94.44	175.44	100.0	0.0	94.44	0.00	175.44	130.6
Sep	21.40	240.42	80.59	159.83	100.0	0.0	80.59	0.00	159.83	145.2
Oct	21.50	98.62	80.26	18.36	100.0	0.0	80.26	0.00	18.36	81.8
Nov	21.10	13.21	71.66	-58.45	41.5	-58.5	71.66	0.00	0.00	40.9
Dic	20.20	5.41	63.24	-57.83	0.0	-41.5	46.96	16.28	0.00	20.4
Ene	20.00	13.89	63.93	-50.04	0.0	0.0	13.89	50.04	0.00	10.2
Feb	21.00	5.02	67.95	-62.93	0.0	0.0	5.02	62.93	0.00	5.1
Mar	23.00	6.70	97.63	-90.93	0.0	0.0	6.70	90.93	0.00	2.6
Abr	24.60	16.16	117.51	-101.35	0.0	0.0	16.16	101.35	0.00	1.3
May	24.70	60.76	127.12	-66.36	0.0	0.0	60.76	66.36	0.00	0.6
		1226.82	1065.25				677.37	387.88	549.45	



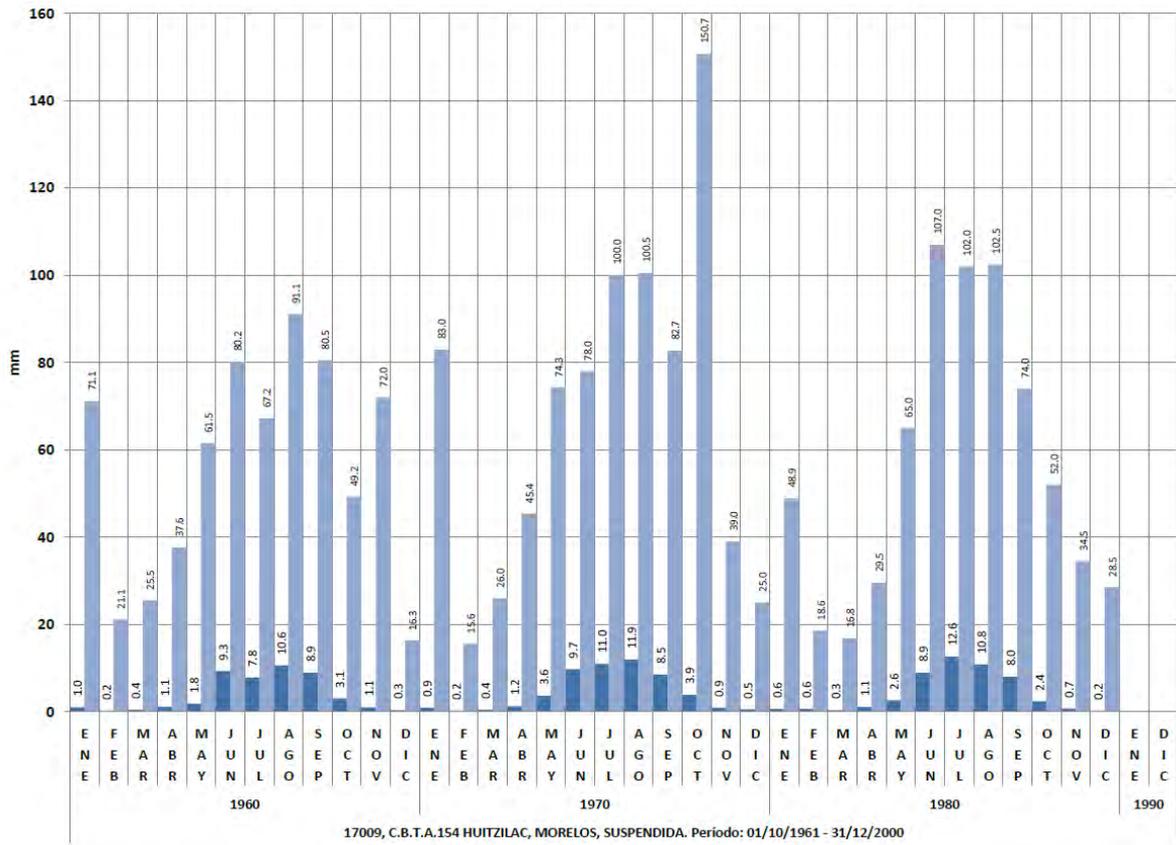
Gráfica 6. Balance hidrico en la Estación 17002, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.

Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor.

Precipitación

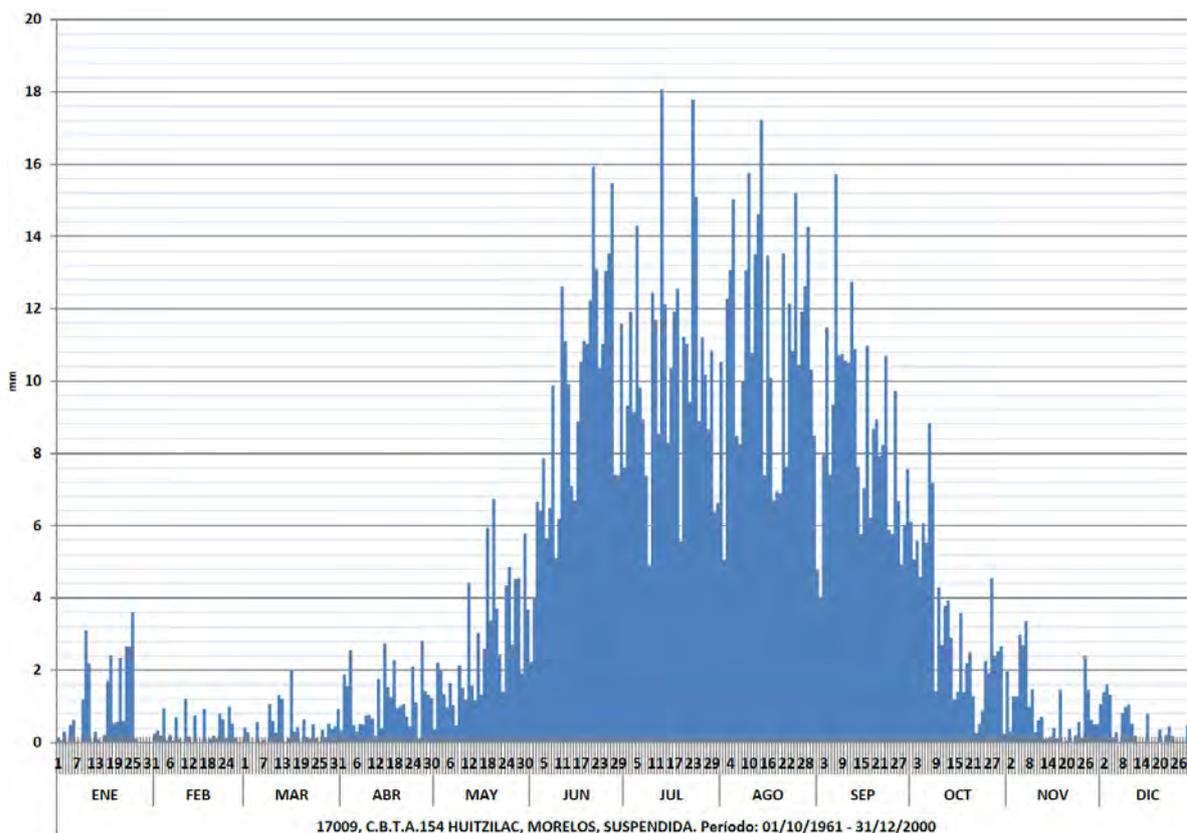
Según se observa en los valores del promedio y máximo de lluvia por década-mes (Gráfica 7), se tiene que durante la década de 1970 se registró el máximo histórico de 150.7 mm en el mes de octubre. Dentro de la misma serie, que comprende poco más de 29 años, se tiene una distribución muy irregular en los 60's, presentándose un valor elevadamente atípico en el mes de enero. En la siguiente década, se repite el mismo fenómeno en el mes de enero, para después seguir una distribución casi normal, hasta el valor pico descrito. En la siguiente década (1980), la distribución de los máximos mensuales muestra un ligero sesgo a la derecha, encontrándose también un valor relativamente elevado en el mes de enero.

Con respecto a la distribución de la lluvia promedio mensual, coincide con la distribución de las lluvias máximas mensuales registradas durante los mismos periodos.



Gráfica 7. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

En cuanto a la lluvia promedio diaria (Gráfica 8), se tiene que los días más lluviosos se presentan durante los meses de junio a octubre, mostrando una distribución casi normal durante el verano y principios del otoño, decreciendo sensiblemente a partir de octubre. Durante el invierno, el mes más lluvioso es enero, aunque dichas precipitaciones no exceden los 4 mm diarios.



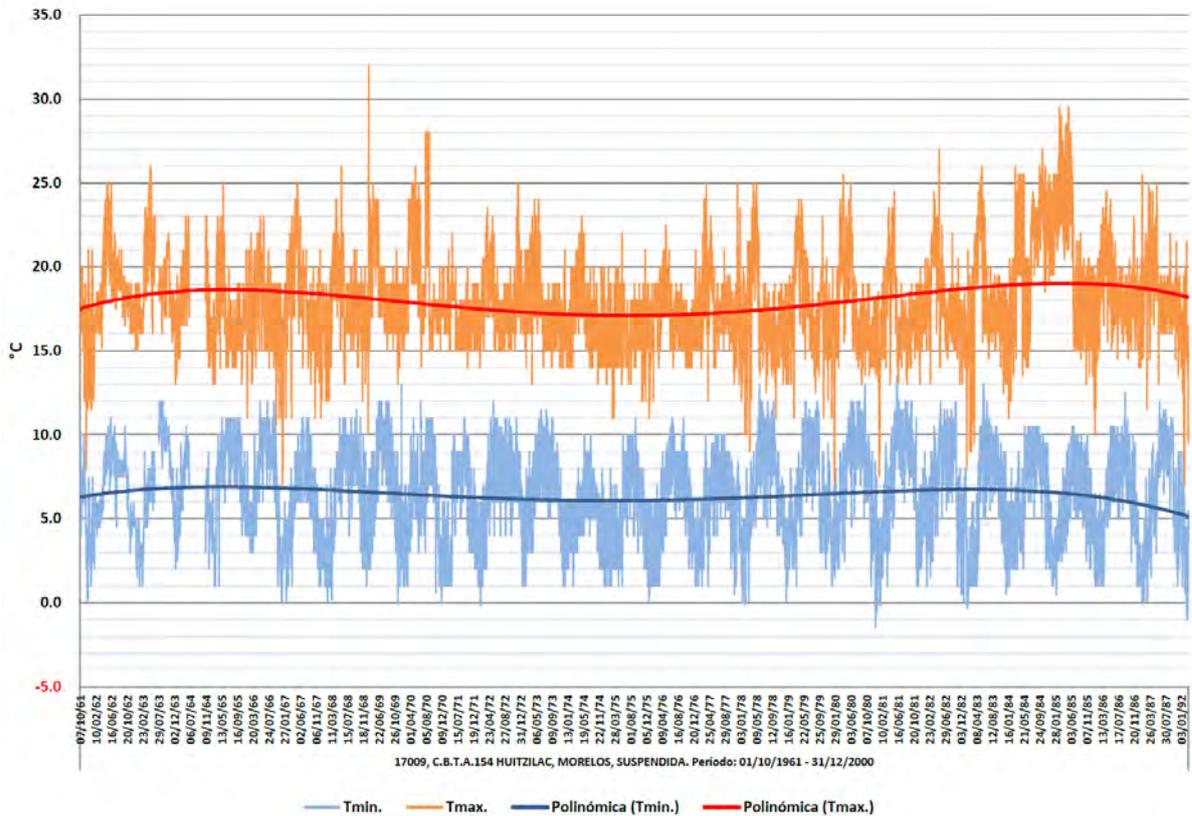
Gráfica 8. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1961 – 2000, en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Temperatura

Las temperaturas máximas y mínimas promedio registradas durante el periodo mencionado, son 18.0 °C y 6.4 °C, respectivamente; mostrando valores extremos que van de los 7.0 °C a 32.0 °C, en el caso de temperaturas máxima; y -1.5 °C a 13.5 °C, en las mínimas.

La variación de temperaturas máximas y mínimas diarias, durante el mismo lapso de tiempo, se muestra en la Gráfica 9, en la cual se observa una variación ligeramente mayor en las temperaturas máximas, mostrando un incremento neto de poco más de 1 °C entre las décadas de 1960 y 1990. En cuanto a las temperaturas mínimas, estas muestran una menor variación, aunque de acuerdo con la gráfica referida su tendencia es ligeramente negativa, variando de aproximadamente 6 °C a 5 °C al final de los registros. Cabe señalar que los registros de

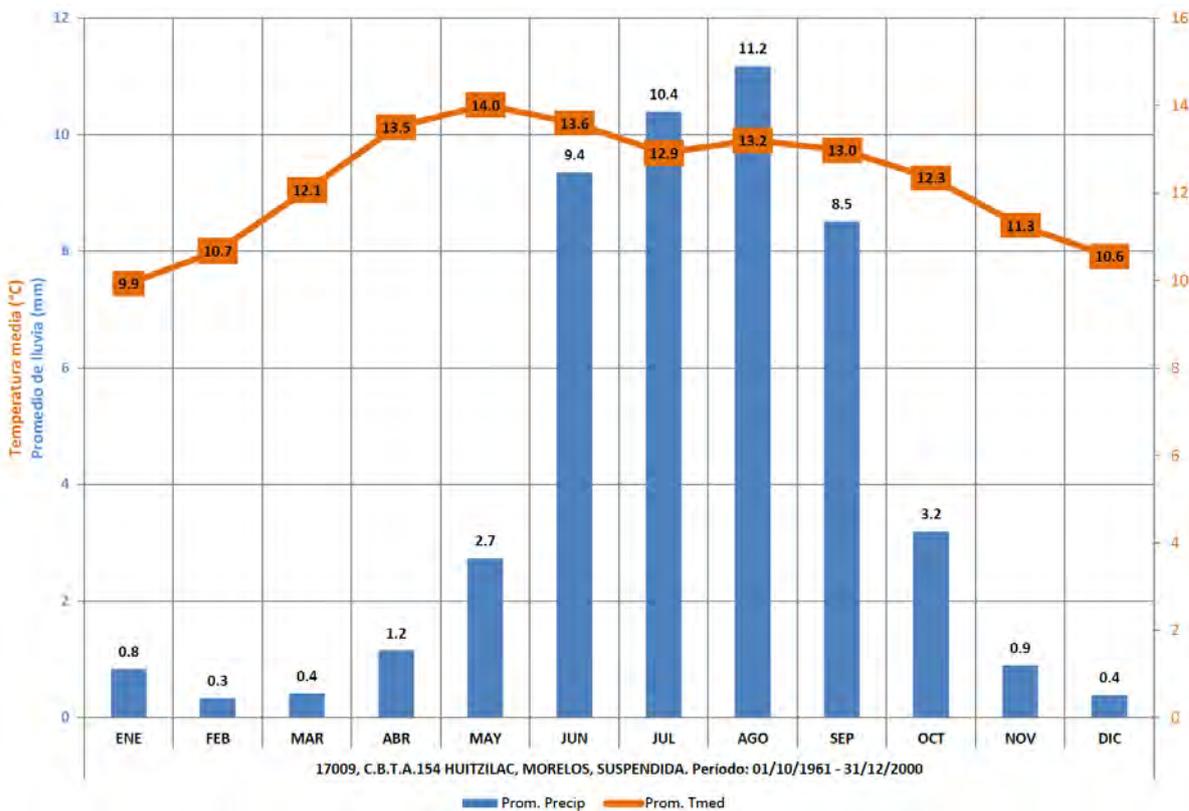
temperatura en esta estación no son continuos y muestran diversa inhomogeneidades, por lo que sus datos deben ser tomados con reserva.



Gráfica 9. Registro diario de temperatura durante la serie: 1961 – 1992, en la Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Climograma y balance hídrico

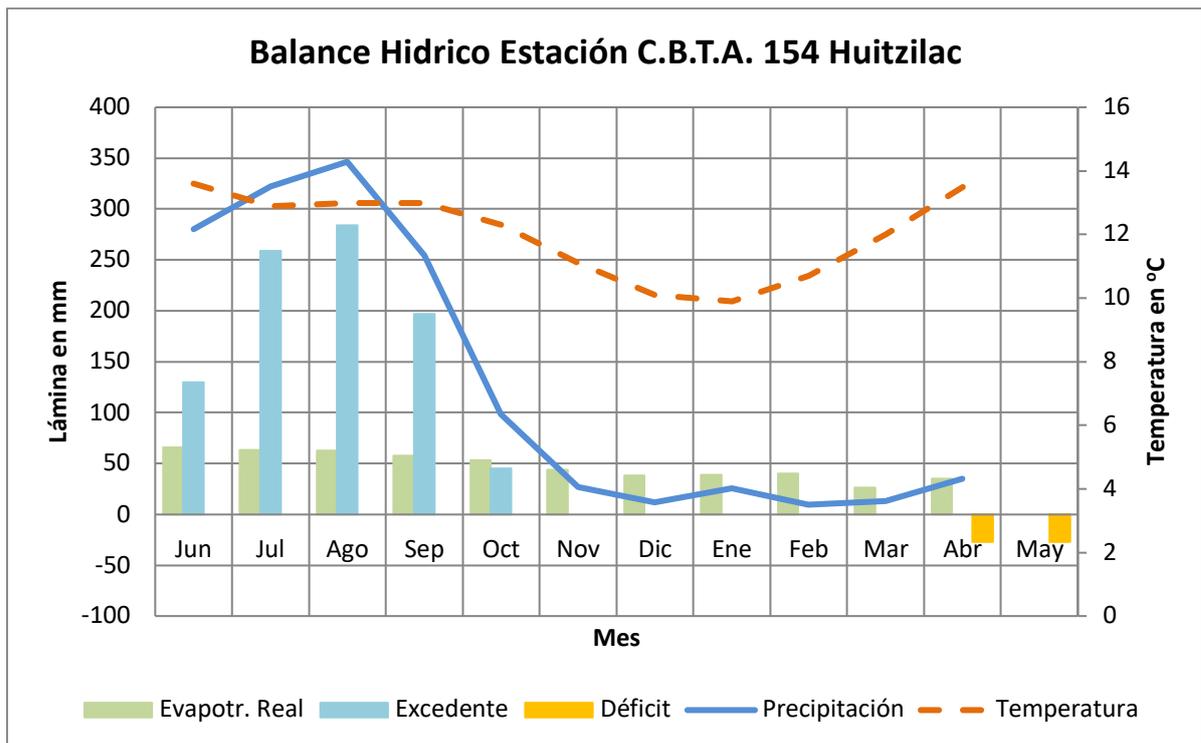
Según los datos consignados por el SMN y el balance hídrico obtenido a partir del método de Thornthwaite, se tienen las gráficas 10 y 11, que muestran el climograma y balance hídrico (Tabla 9) de la estación analizada.



Gráfica 10. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1961 – 2000, Estación 17009, C.B.T.A. 154, Huitzilac, Mor. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Tabla 9. Cálculo de balance hídrico para la Estación 17009.

BALANCE HÍDRICO POR MÉTODO DE THORNTHWAITE										
Rmax=		100								
Mes	Temp.	Pm	Etc	Pm-Etc	R	ΔR	Etr	F	Ex	D
Jun	13.60	280.54	65.74	214.80	100.00	85.1	65.74	0.00	129.69	64.8
Jul	12.90	322.19	63.18	259.01	100.00	0.0	63.18	0.00	259.01	161.9
Ago	13.00	346.48	62.31	284.17	100.00	0.0	62.31	0.00	284.17	223.0
Sep	13.00	254.80	57.68	197.12	100.00	0.0	57.68	0.00	197.12	210.1
Oct	12.30	98.31	53.05	45.26	100.00	0.0	53.05	0.00	45.26	127.7
Nov	11.10	27.05	43.80	-16.75	83.25	-16.7	43.80	0.00	0.00	63.8
Dic	10.10	11.93	38.43	-26.50	56.75	-26.5	38.43	0.00	0.00	31.9
Ene	9.90	25.83	38.88	-13.05	43.70	-13.0	38.88	0.00	0.00	16.0
Feb	10.70	9.47	40.18	-30.71	12.99	-30.7	40.18	0.00	0.00	8.0
Mar	12.00	12.93	52.80	-39.87	0.00	-13.0	25.92	26.88	0.00	4.0
Abr	13.50	34.73	61.95	-27.22	0.0	0.0	34.73	27.22	0.00	2.0
May	14.00	84.24	69.35	14.89	14.89	14.9	69.35	0.00	0.00	0.0
		1424.26	578.00				523.90	54.10	915.25	

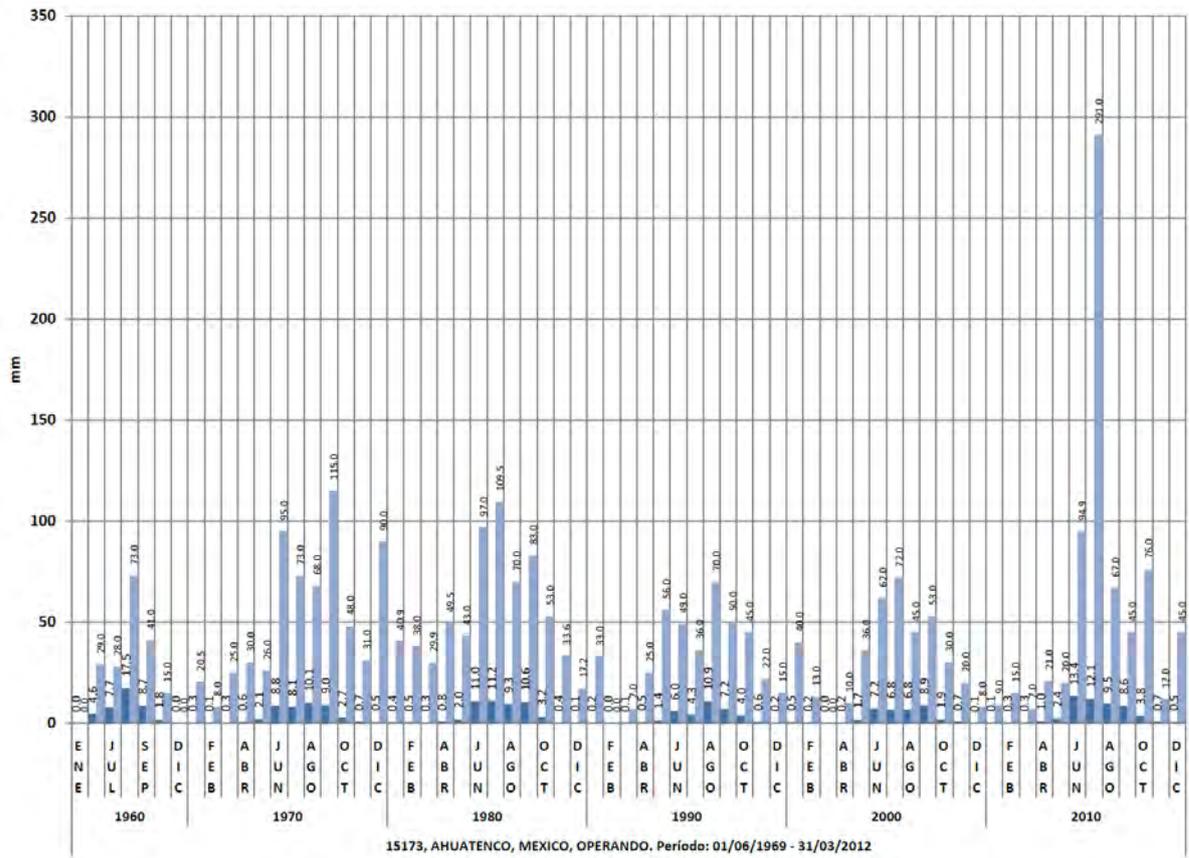


Gráfica 11. Balance hídrico en la Estación 17009, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.

Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México (operando)

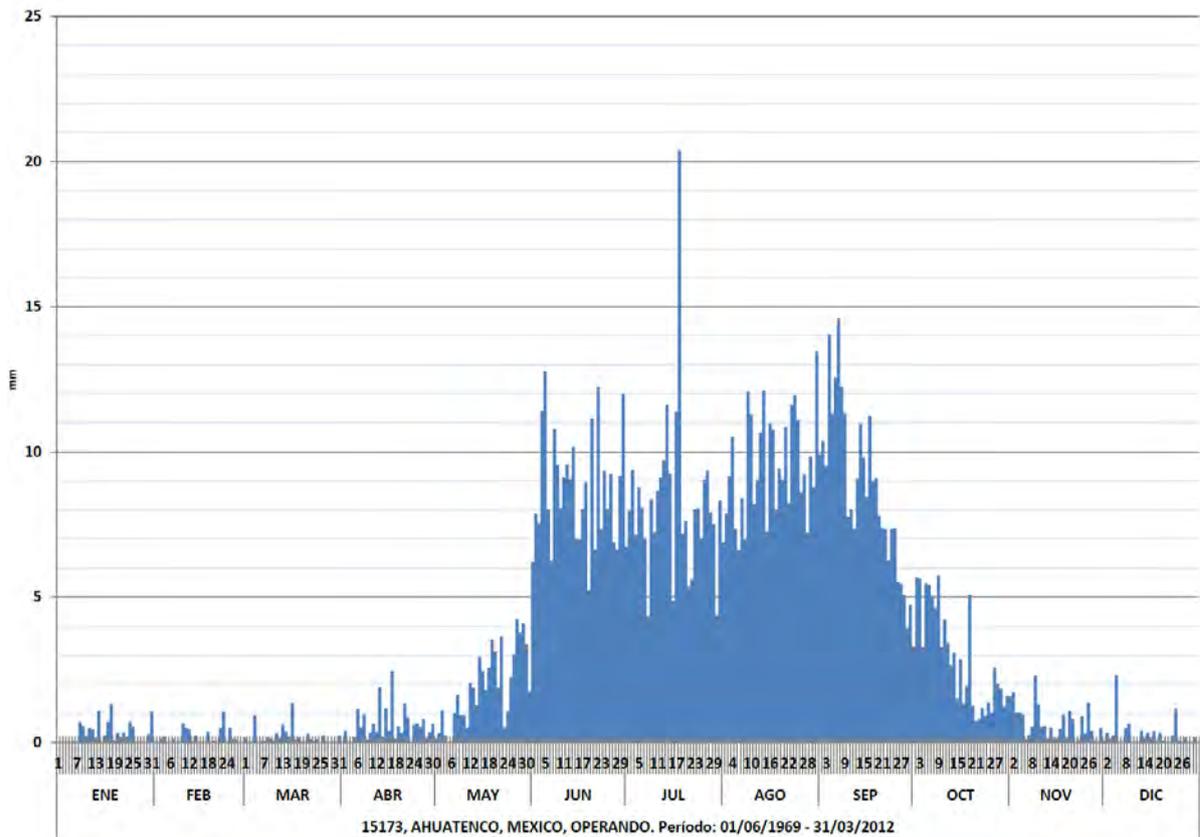
Precipitación

La serie de datos referidos al promedio y máximo de lluvia por década-mes (Gráfica 12), muestran una clara tendencia decreciente entre las décadas 1970 y 2000. Sin embargo, para la primera mitad de la década 2010 los máximos vuelven a elevarse e incluso muestran un máximo histórico en el mes de julio, con casi 300 mm de precipitación mensual. También puede observarse, que las lluvias máximas se encontraban mejor distribuidas en las décadas de 1970 a 1980, siendo menos regulares en las de 1990 a 2000; así como un notable sesgo positivo en los años registrados durante la primera mitad de la década 2010. En cuanto a las lluvias promedio mensuales por década, su distribución varía de casi normal en el intervalo 1960 – 2000, cambiando notablemente a un sesgo positivo en la del 2010.



Gráfica 12. Promedio y máximo de lluvia, por década-mes registrados en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

En relación con la lluvia promedio diaria (Gráfica 13), registrada durante toda la serie, se observa una distribución bimodal, presentándose los días más lluviosos durante los meses de agosto y septiembre, siguiéndoles junio y julio; sobrepasando en conjunto los 8 mm diarios. También se advierte que el periodo de estiaje comprende los meses de noviembre a marzo.

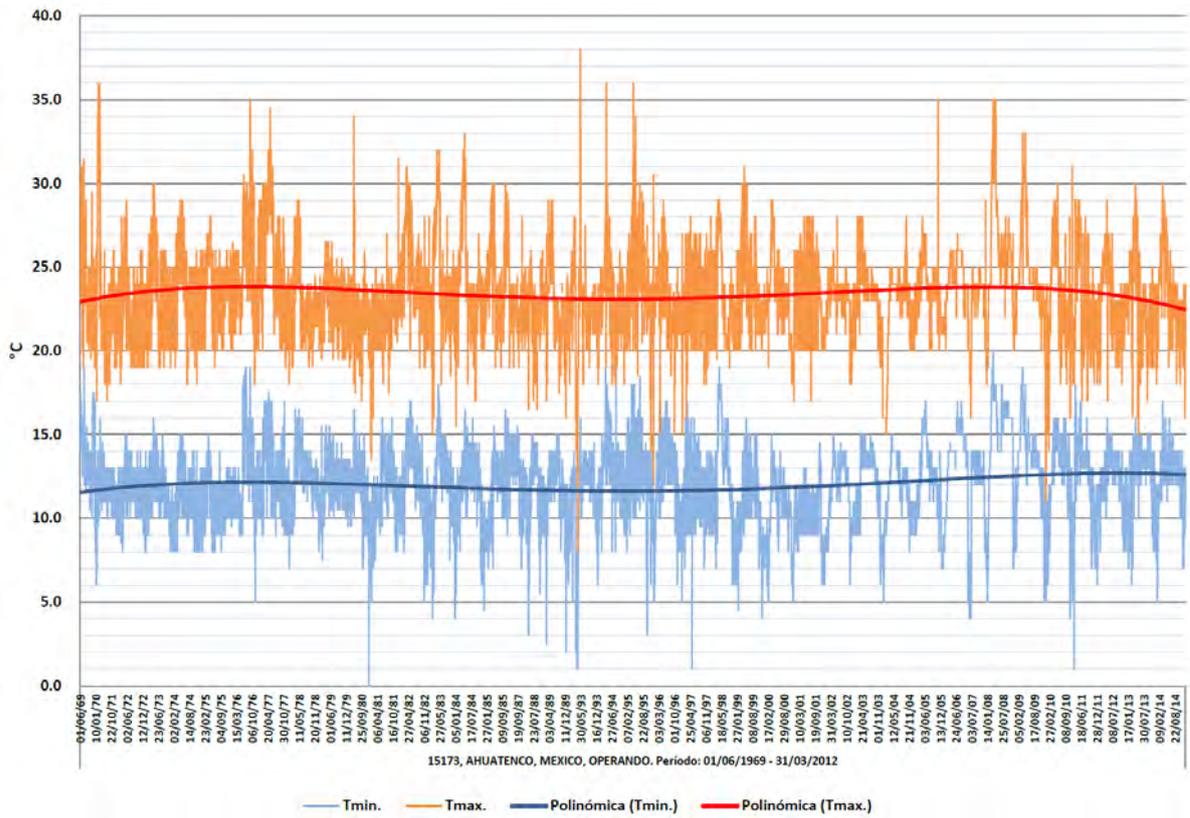


Gráfica 13. Promedio diario de lluvia durante la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Temperatura

Las temperaturas máximas y mínimas promedio registradas durante el periodo mencionado, son 23.4 °C y 12.0 °C, respectivamente; mostrando valores extremos que van de los 8.0 °C a 38.0 °C, en el caso de temperaturas máxima; y 0 °C a 24.5 °C en las mínimas.

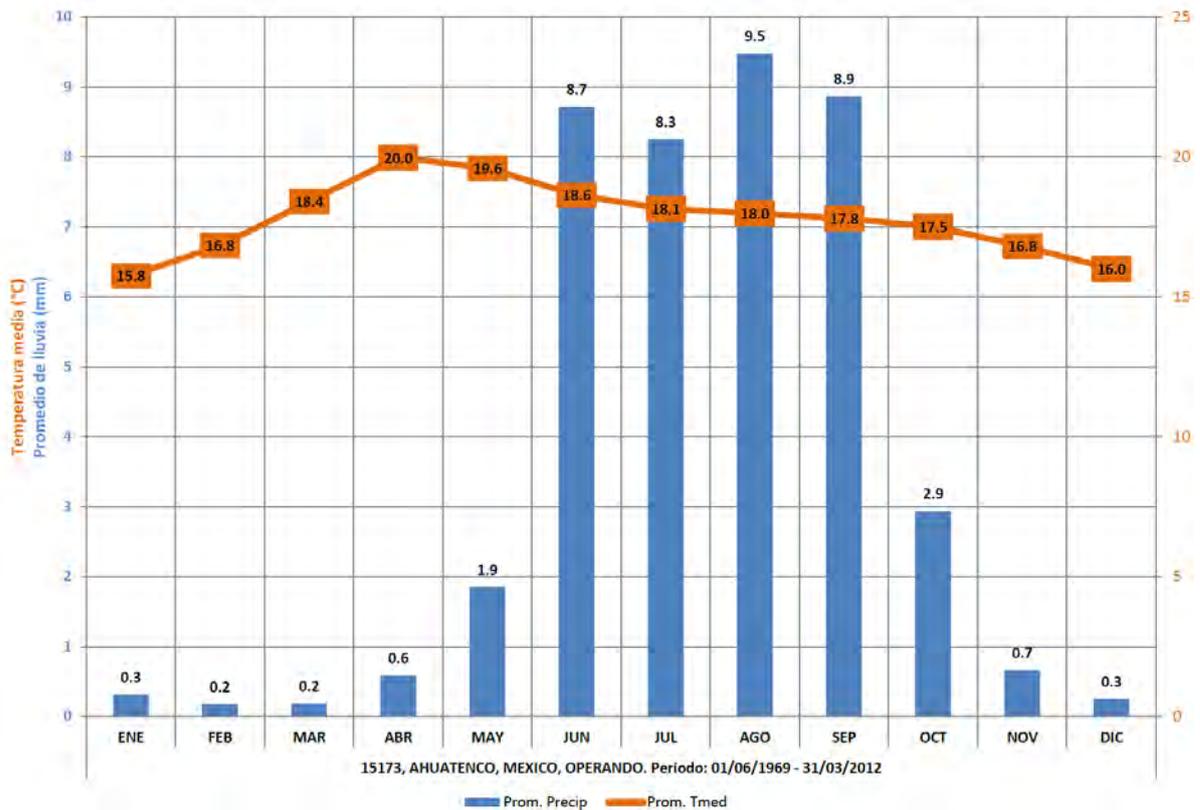
La variación de temperaturas máximas y mínimas diarias, durante el mismo periodo, se muestra en la Gráfica 14, en la cual se observa una ligera variación interdecadal, en la que las temperaturas máximas muestran un ligero decremento; y las mínimas, un incremento mayor, que casi llega a los 2 °C con respecto a las temperaturas mínimas registradas al inicio de la serie.



Gráfica 14. Registro diario de temperatura durante la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Climograma y balance hídrico

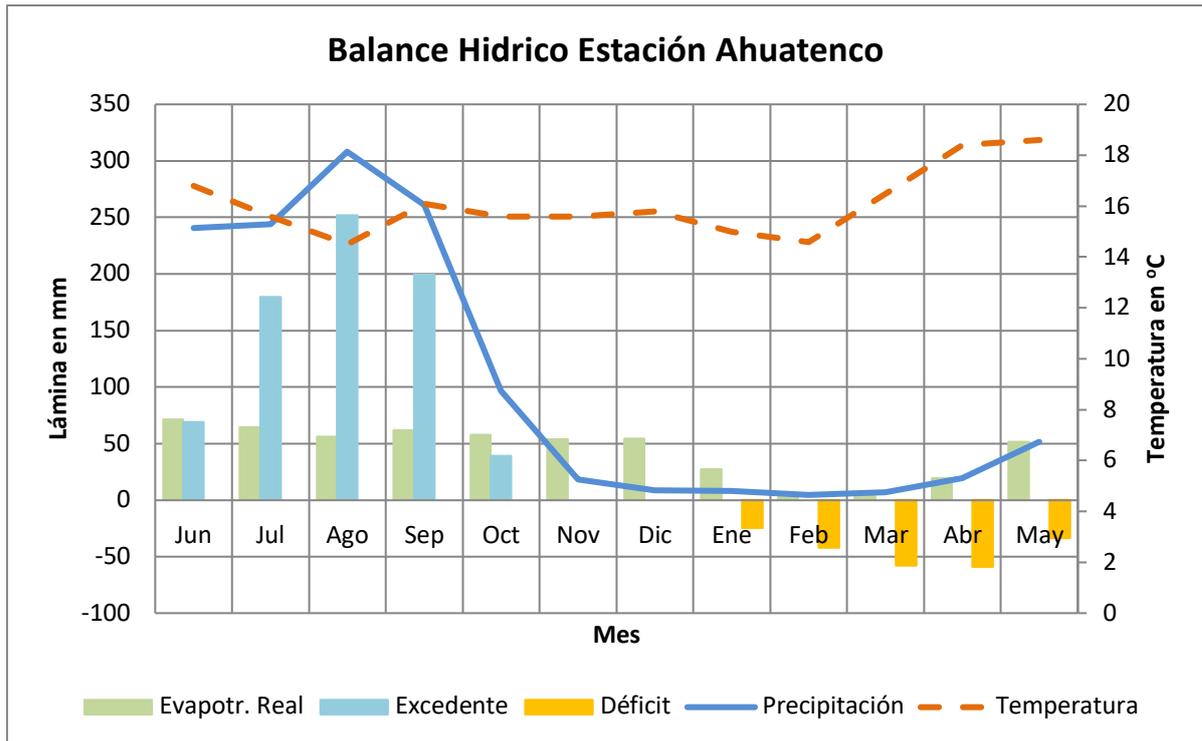
De acuerdo con los datos registrados por el SMN y el balance hídrico obtenido a partir del método de Thornthwaite, se tienen las gráficas 15 y 16, que muestran el climograma y balance hídrico (Tabla 10) de la estación analizada.



Gráfica 15. Promedio diario y temperatura media por mes, según la serie: 1969 – 2012, en la Estación 15173, Ahuatenco, edo. de México. Fuente: Estadística de estaciones climatológicas SMN, CONAGUA.

Tabla 10. Cálculo de balance hídrico para la Estación 15173.

BALANCE HÍDRICO POR MÉTODO DE THORNTHWAITE										
Rmax=		100								
Mes	Temp.	Pm	Etc	Pm-Etc	R	ΔR	Etr	F	Ex	D
Jun	16.80	240.38	71.12	169.26	100.0	100.0	71.12	0.00	69.26	34.6
Jul	15.60	244.27	64.73	179.54	100.0	0.0	64.73	0.00	179.54	107.1
Ago	14.50	308.18	56.21	251.97	100.0	0.0	56.21	0.00	251.97	179.5
Sep	16.10	260.86	61.58	199.28	100.0	0.0	61.58	0.00	199.28	189.4
Oct	15.60	96.63	57.61	39.02	100.0	0.0	57.61	0.00	39.02	114.2
Nov	15.60	18.21	53.94	-35.73	64.3	-35.7	53.94	0.00	0.00	57.1
Dic	15.80	8.74	54.24	-45.50	18.8	-45.5	54.24	0.00	0.00	28.6
Ene	15.00	8.23	51.71	-43.48	0.0	-18.8	27.00	24.71	0.00	14.3
Feb	14.60	4.57	46.52	-41.95	0.0	0.0	4.57	41.95	0.00	7.1
Mar	16.50	6.81	64.69	-57.88	0.0	0.0	6.81	57.88	0.00	3.6
Abr	18.40	19.18	78.30	-59.12	0.0	0.0	19.18	59.12	0.00	1.8
May	18.60	51.67	85.31	-33.64	0.0	0.0	51.67	33.64	0.00	0.9
		1267.73	745.97				528.66	217.31	739.07	



Gráfica 16. Balance hídrico en la Estación 15173, obtenida a partir del método de Thornthwaite, según el año hidrológico.

En resumen, se puede establecer que la información obtenida a partir de las estaciones descritas, representan las partes alta (Estación Huitzilac), media (Ahuatenco) y baja (Col. El Empleado) de la microcuenca objeto del estudio, coincidiendo con la caracterización climática tratada en apartados anteriores. De la misma información, se infiere que las partes alta y media, son la que reciben las mayores precipitaciones y muestran el menor déficit hídrico; lo que indica su alto valor ambiental y necesidad de conservación. Con respecto a la parte baja, se observa un ligero equilibrio positivo, que dependerá del futuro manejo que se tenga en las zonas media y alta de la microcuenca.

4.6.2. Balance hídrico

Debido a la escasez de datos hidrométricos en amplias zonas de las cuencas del estado, la estimación del manejo de los recursos hídricos puede aproximarse a partir de la utilización de métodos indirectos, utilizando modelos basados en las características físicas de la cuenca

(suelos, relieve, geología, uso del suelo, vegetación), las cuales determinan en gran medida el volumen y variación de los fenómenos hidrológicos.

Balance hídrico por el método de Thornthwaite-Matter.

Entre los diversos métodos empíricos basados en propiedades físicas y escasos datos hidrológicos, que se utilizan con mayor frecuencia, destacan: el método de balance hídrico (Thornthwaite y Matter, 1955); el método de Hargraves; y la curva numérica (USDA, 1956), entre otros. Dichos métodos han sido muy criticados por su carácter empírico; sin embargo, constituyen una herramienta valiosa cuando solo existen registros de precipitación y temperatura (Thornthwaite y Matter, 1955; Mora e Iverson, 1998).

La estimación del balance hídrico y la escorrentía puede efectuarse mediante dos tipos de modelos que requieren diferente nivel de información, los modelos agregados y los modelos espacialmente distribuidos. En los modelos agregados, los parámetros y variables son valores promedio de las propiedades de toda la cuenca, esto es, se considera como una sola unidad (Chow et al., 1964; Chow et al., 1988; Brooks et al., 1992; Dune y Leopold, 1978). Por otra parte, los modelos espacialmente distribuidos consideran la variabilidad espacial de los parámetros y variables que caracterizan la cuenca (Olsson y Pilesjo, 1999; Meijerink et al., 1994; Olivera, 1996; Maidment et al., 1993 y 1996). En el presente trabajo se utilizó el modelado espacialmente distribuido, dada su inmediata aplicación dentro de un sistema de información geográfico.

En cuanto al cálculo del balance hídrico superficial, se utilizó el modelo formulado por Thornthwaite y Matter (1957), ya que este método permite calcular un registro continuo de la humedad del suelo, la evapotranspiración potencial y real, la recarga del acuífero, y el escurrimiento a partir de registros meteorológicos y observaciones limitadas de la vegetación y los suelos (Dunne y Leopold, 1978; Campos Aranda, 1992).

La integración del balance hídrico desarrollado por Thornthwaite y Matter (1957) en un sistema de información geográfica (SIG), se desarrolló siguiendo los pasos que se describen a continuación:

Integración de balance hídrico a un SIG

- Generación de la capa (shapefile) de las estaciones meteorológicas seleccionadas, teniendo entre sus atributos los valores de precipitación, temperatura, evapotranspiración real y agua excedente.
- Interpolación de las diferentes variables climáticas por el método de Kriging ordinario.
- Concatenación de capas con atributos climáticos y atributos de balance hídrico
- Exportación de atributos climáticos en una malla de 5 X 5 km, en formato raster, donde cada pixel tiene valores de precipitación, temperatura, evapotranspiración y excedente en mm (balance hídrico).

Criterios para la determinación de factores de infiltración y escurrimiento

- Generación de las capas cuyos atributos corresponden a factores biofísicos, tales como: vegetación, suelos, pendiente y geología.
- Unión de capas y atributos biofísicos para la obtención de coeficientes de escurrimiento e infiltración en mm, a partir de la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

De la aplicación de dicha metodología, se obtuvieron los modelos de precipitación (*Figura 15*), temperatura (*Figura 16*), evapotranspiración (*Figura 17*), excedente (*Figura 18*) y coeficientes de escurrimiento (*Figura 19*), que se integran dentro del anexo cartográfico y que son mostrados a continuación:

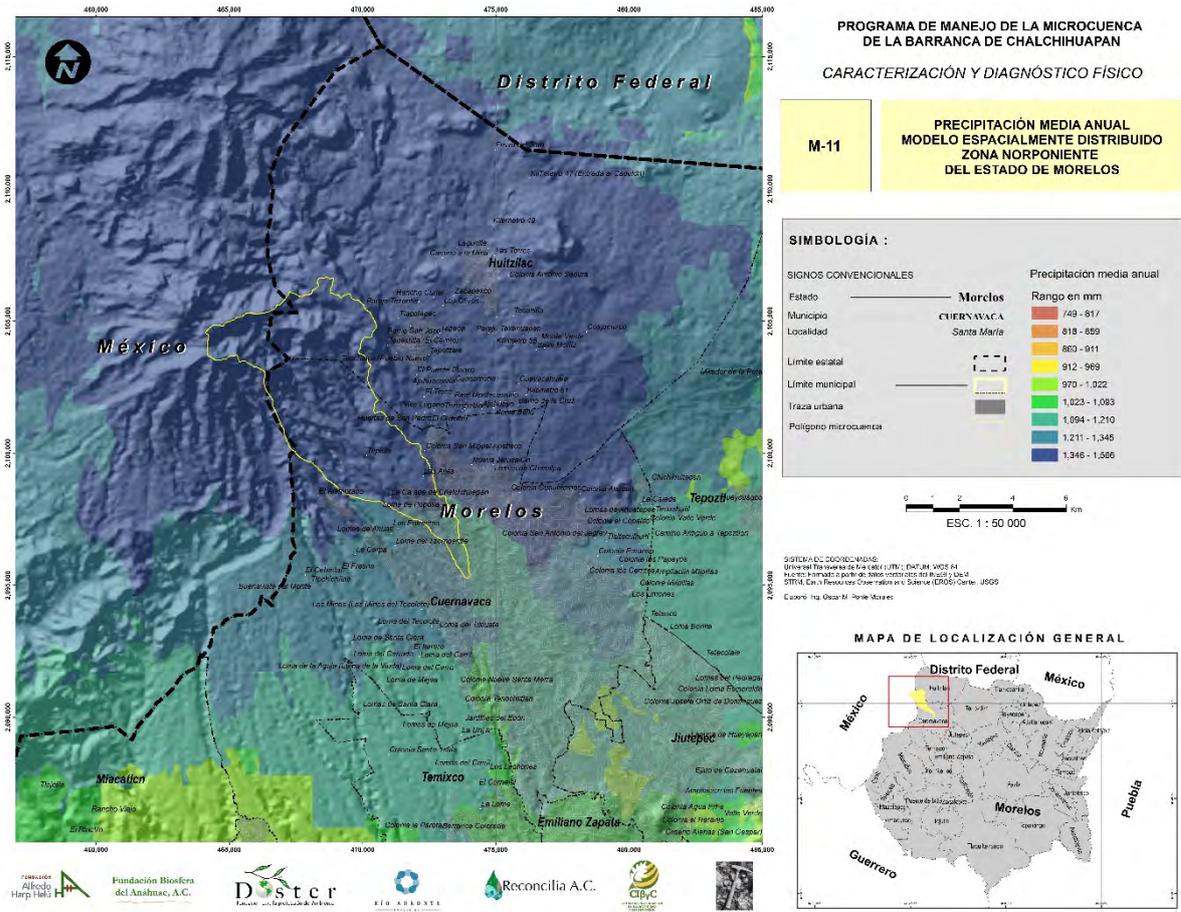


Figura 15. Modelo espacialmente distribuido de precipitación media anual.

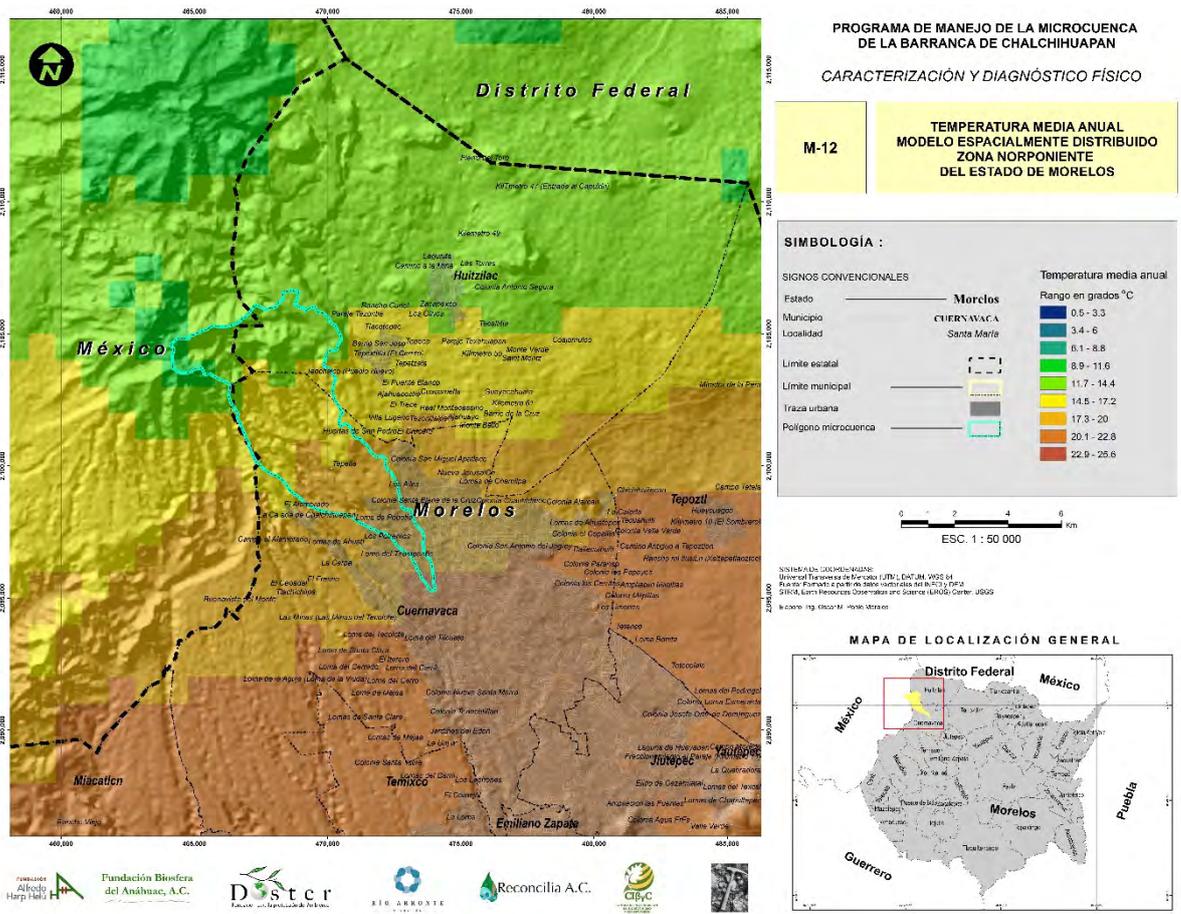


Figura 16. Modelo espacialmente distribuido de temperatura media anual.

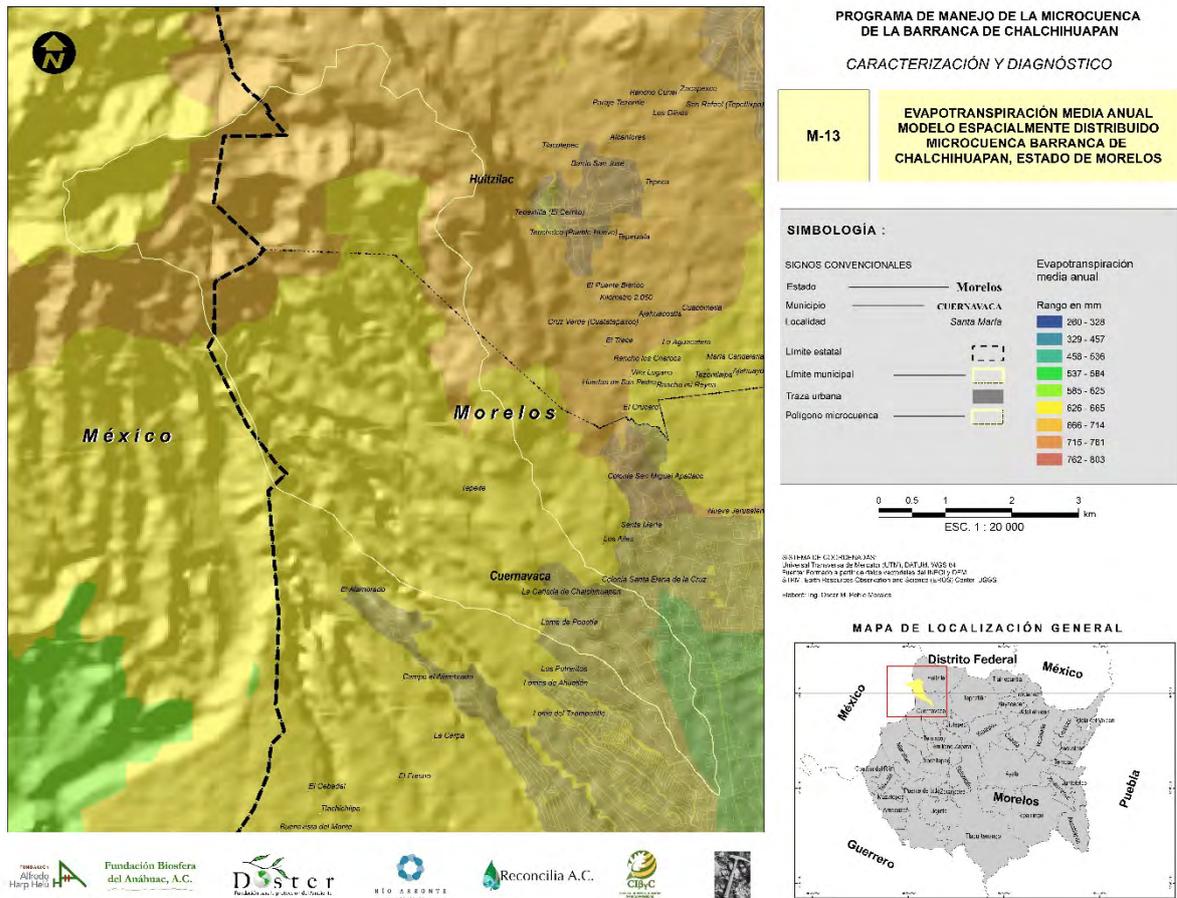


Figura 17. Modelo espacialmente distribuido de evapotranspiración media anual.

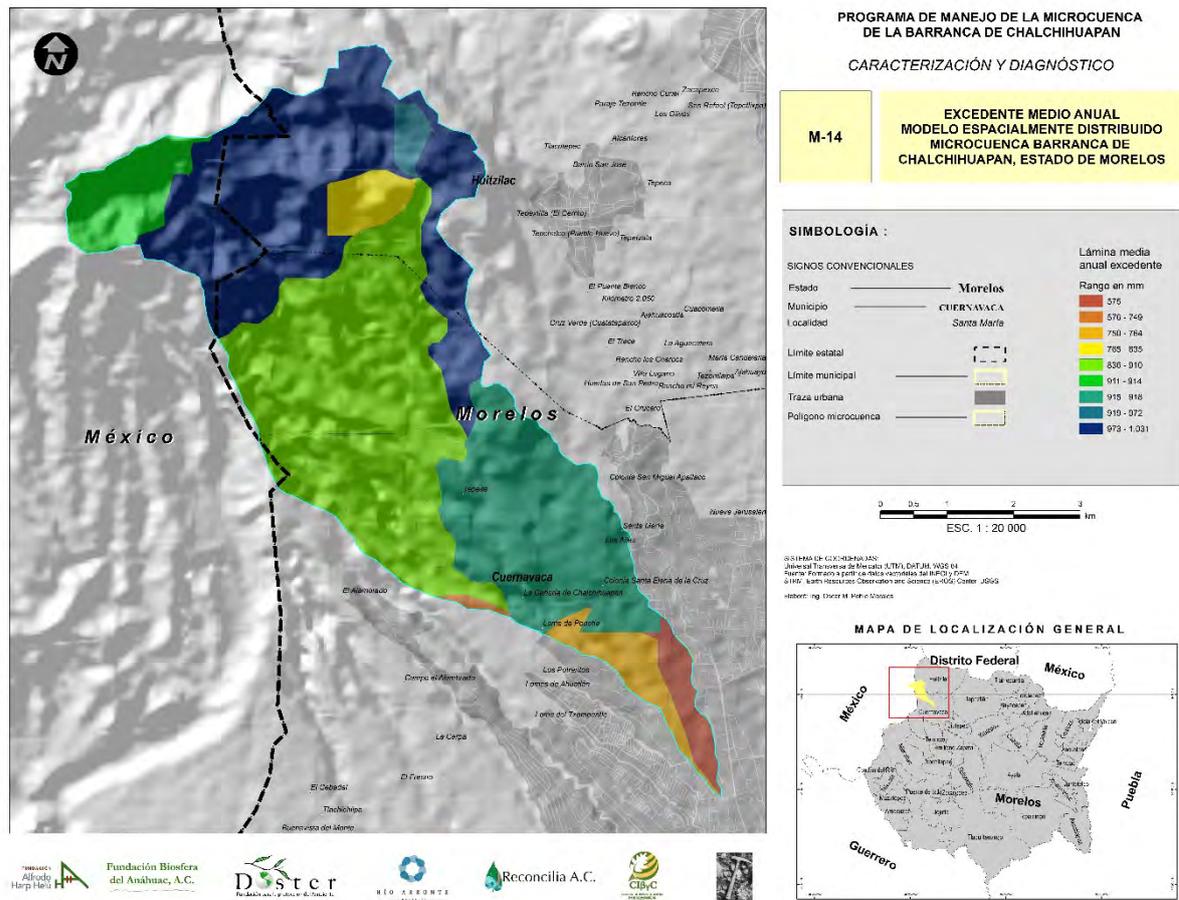


Figura 18. Modelo espacialmente distribuido de lámina excedente media anual.

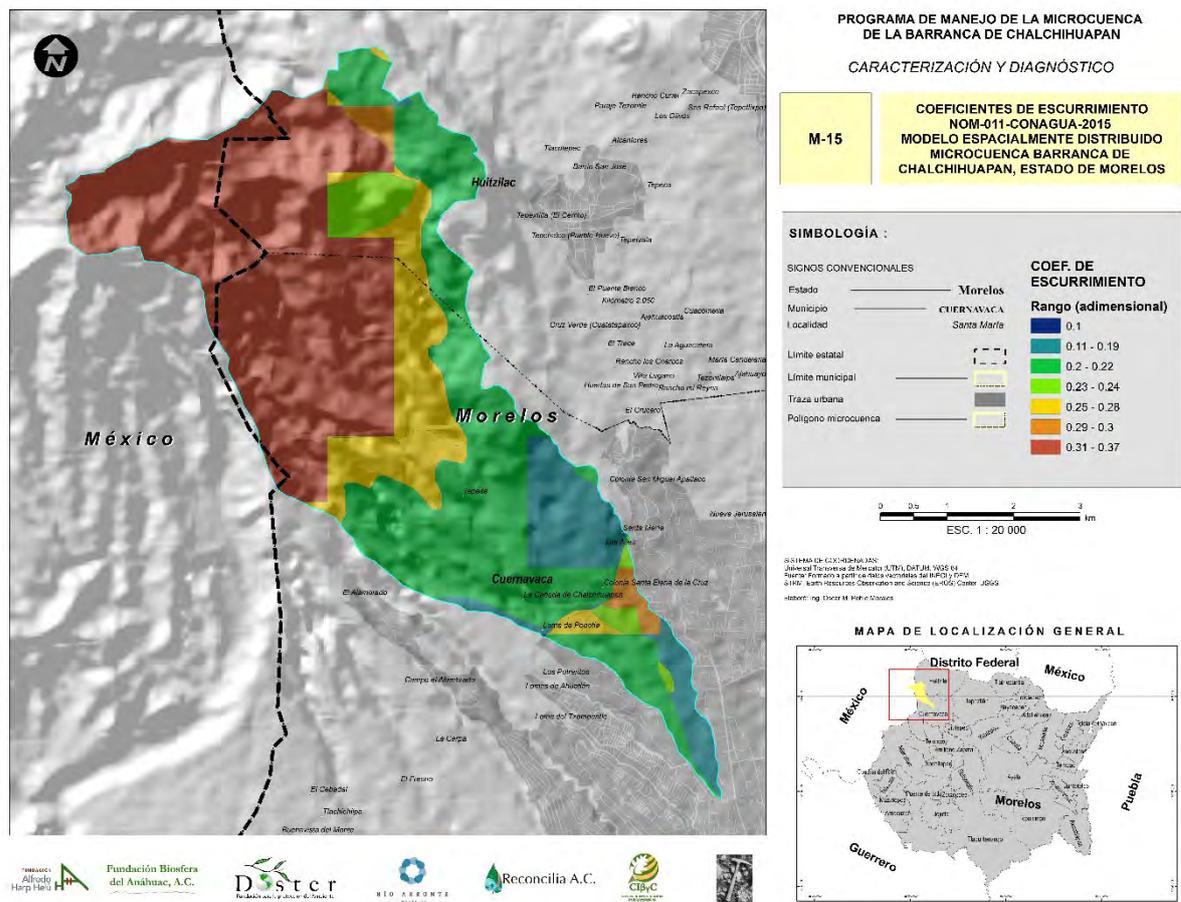


Figura 19. Modelo espacialmente distribuido de coeficientes de escurrimiento en la microcuenca.

4.6.3. Balance hidrológico

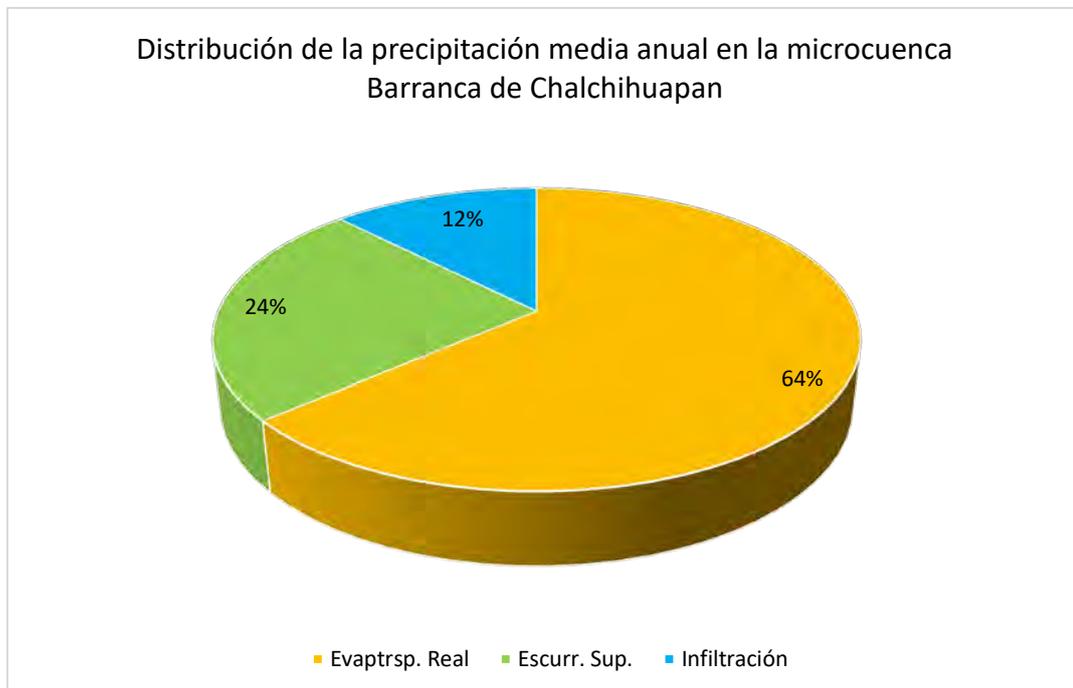
Según los resultados obtenidos por medio del balance hídrico espacialmente distribuido, se tiene la *Tabla 11* y su gráfica correspondiente (*Grafica 17*). Sobre dichos resultados, cabe aclarar que, no obstante que el clima y vegetación determinan la capacidad potencial de evapotranspiración (Etc), ésta se encuentra limitada por la disponibilidad de agua; es decir, la evapotranspiración real (Etr) que es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes, dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así, llegar a la Etc (potencial o de referencia) o no (Etr es siempre mayor o igual que Etr). Por lo anterior, el agua disponible para evaporar, será la que cae como precipitación en el mes considerado y la existente en la reserva del suelo.

Tabla 11. Distribución de la precipitación media anual espacialmente distribuido, según balance hídrico por el método de Thornthwaite.

DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN				
Variable hidrológica		Vol. en hm ³	% sobre la precipitación	
Volumen de precipitación media anual (hm ³)	Evapotranspiración real*	34.9304	64%	
	Excedente	19.9988	36%	
	Escurrimiento superficial	13.2279	24%	
	Infiltración	Recarga infiltración vertical	6.7709	12%
		Descarga de manantiales**	1.9060	3%
Recarga neta		4.8648	9%	
54.9292	SUMA	54.9292	100%	

* La evapotranspiración real no puede ser mayor al agua disponible.

** A partir de mediciones realizadas directamente durante los meses de enero y febrero de 2017, en los cauces de las barrancas El Salto y Chalchihuapan, así como el canal El Tepeite



Gráfica 17

Reduciendo las cifras anteriores a un promedio anual de litros por segundo (l.p.s.), se obtiene la *Tabla 12*, que representa el balance de agua disponible en la microcuenca

Tabla 12. Balance de agua disponible promedio en litros por segundo al año

Excedente	l.p.s. /año
Vol. Escurrimiento	419.45
Vol. Infiltración	214.70

4.6.4. Morfometría

Las características morfométricas de una cuenca hidrográfica permiten establecer sus propiedades físico - espaciales y determinar de manera preliminar las características ambientales de su territorio. En este sentido, la geometría de dicha unidad hidrológica define el volumen de agua pluvial captada, su respuesta ante eventos climáticos y su balance hidrológico que comprende el escurrimiento superficial, en términos de caudales, el transporte de sedimentos y nutrientes, así como el volumen de agua subterránea que permite captar.

Tomando como referencia el cerro Cuahutépctl, la microcuenca de Chalchihuapan se extiende hacia el sureste, a lo largo de 15 km aproximadamente, hasta su confluencia por margen izquierda con la barranca de San Pedro, ya en la zona urbana de Cuernavaca. Hasta este punto, su área de captación es de 37.34 km² y desciende desde una altitud de 3, 420 msnm hasta los 1, 670 msnm, estimándose la pendiente media de su relieve en 31%.

La mayor parte del área es montañosa y durante los primeros 8 kilómetros a partir de su origen, el cauce describe un arco labrado en el macizo andesítico del antiguo estratovolcán de Zempoala, que posiblemente alojó en épocas geológicamente recientes un pequeño glaciar, cuyos rasgos morfológicos son difíciles de distinguir actualmente, salvo por sus afiladas aristas, y profundos valles de empinadas laderas que acusan cierta forma cóncava común a la erosión abrasiva de los glaciares.

Desde el punto de vista hidrológico y geohidrológico, la microcuenca de Chalchihuapan reviste especial importancia, ya que capta la lluvia de la zona con mayor precipitación promedio anual en el estado. Esto permite que su cauce tenga un régimen perenne, alimentado por diversos manantiales durante su recorrido y que constituya una fuente importante para la recarga del acuífero de Cuernavaca.

Además de las consideraciones anteriores, la barranca de Chalchihuapan forma la base de un sistema ambiental que sustenta una amplia diversidad de especies de la flora y fauna del estado; su aprovechamiento data desde tiempos prehispánicos hasta nuestros días e indudablemente su preservación favorece la calidad de vida de su población y el entorno natural que ha hecho célebre a la ciudad de Cuernavaca.

En la *Tabla 13*, mostrada a continuación, se describen los principales parámetros morfométricos de la microcuenca de Chalchihuapan, obtenidos a partir del modelo de elevación digital elaborado para el presente estudio (*Figura 20*).

De los índices morfométricos obtenidos, se tiene lo siguiente:

Factor de forma (Magette, 1976). Siendo su valor relativamente bajo (0.64) indica una baja tendencia hacia las crecidas y se caracteriza por un colector principal de mayor longitud que la totalidad de sus tributarios. En comparación, un factor de forma cercano a 1, representa una cuenca de forma redondeada, donde los tributarios confluyen al mismo tiempo en el cauce principal lo cual provoca crecidas más significativas.

Razón de elongación (Schumm, 1956). Determina la proporción entre el diámetro del círculo asociado con la longitud de la cuenca, que en este caso es menor a 1, lo que indica una geometría alargada.

Relación de circularidad (Seyhan, 1977). Registra un valor mayor a 1 (2.9), lo cual señala una extensión casi 3 veces mayor que el ancho de la cuenca.

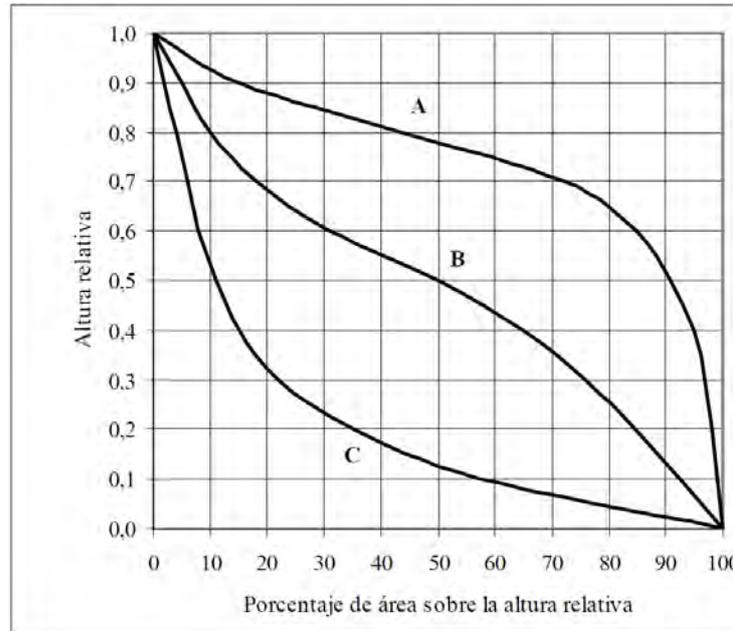
Índice de compacidad o de Gravelius. Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, lo cual tiene influencia en los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación, es decir, se encuentra estrechamente relacionado con el tiempo de

concentración. A medida que su valor tiende a 1, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor. En este caso, el valor obtenido (1.72), indica una baja tendencia a las crecidas.

Tabla 13. Morfometría de la microcuenca de Chalchihuapan, estado de Morelos.

PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA MICROCUENCA CHALCHIHUAPAN		
Región hidrológica:	Balsas	RH - 18
Cuenca:	Río Grande de Amacuzac	RH - 18F
Subcuenca:	Río Apatlaco	RH-18Fd
Microcuenca:	Barranca de Chalchihuapan	
Parámetros básicos		Valor
Área de la cuenca(A):		37.79
Perímetro de la cuenca (P):		71.77
Longitud de la cuenca (L):		12.49
Longitud del Cauce Principal (Lp)		7.52
Altitudes características		
Cota máxima de la cuenca		3,420.00
Cota mínima (punto de descarga)		1,670.00
Diferencia de cotas (desnivel)		1,750.00
Altitud media de la cuenca		2,547.93
Altitud más frecuente		2,440.10
Altitud de frecuencia media		2,541.54
Cota Inicial Cauce Principal		2,204.00
Cota Final Cauce Principal		1,684.00
Longitud Total de Cauces Lt		80.48
Ancho de cuenca (w):		2.82
Índices geomorfológicos		
Factor de forma de una Cuenca (F):		0.6426
Relación de elongación (R):		0.9042
Relación de circularidad (Rc):		2.9260
Índice de Compacidad o Índice de Gravelious (K):		1.7264
Parámetros del relieve		%
Pendiente media de la Cuenca:		31.2037
Pendiente media del cauce principal:		0.0728
Parámetros de la red hidrográfica		
Densidad de drenaje		0.07761215
Constantes de estabilidad del río		12.8845814
Densidad hidrográfica		0.05386283

- 100% de la microcuenca tiene una elevación superior a los 1, 684 m.s.n.m.
- El 83% de la misma se encuentra por encima de los 2, 116 m.s.n.m.
- Un 48% tiene una elevación superior a los 2, 548 m.s.n.m.
- El 3% de la microcuenca sobrepasa los 3, 196 m.s.n.m.



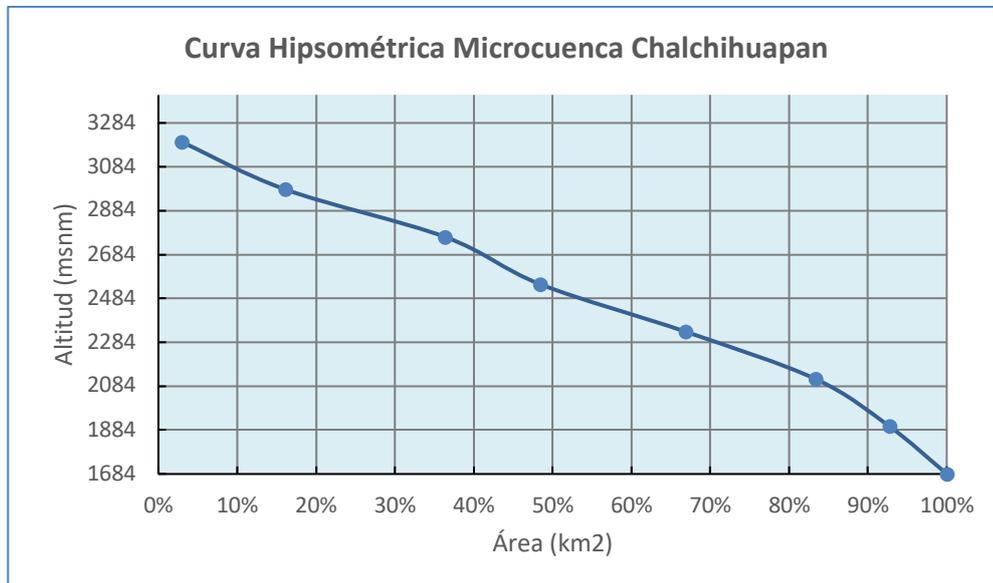
Gráfica 18. Curvas hipsométricas adimensionales, características del ciclo de erosión (Strahler).

Tabla 14. Resultados del cálculo de área – elevación, para la obtención de la curva hipsométrica de la microcuenca de Chalchihuapan.

CUADRO DE ÁREAS ENTRE CURVAS DE NIVEL DE LA MICROCUENCA CHALCHIHUAPAN

Nº ORDEN	COTA MIN	COTA MAX	Área Parcial (km ²)	Área Acumulada (km ²)	Área que queda sobre la superficie (km ²)	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	1684	1900	2.55	2.55	35.15	7.26%	100%
2	1900	2116	3.29	5.84	32.60	9.37%	93%
3	2116	2332	5.80	11.64	29.31	16.49%	83%
4	2332	2548	6.47	18.12	23.51	18.42%	67%
5	2548	2764	4.25	22.36	17.03	12.08%	48%
6	2764	2980	7.11	29.47	12.79	20.21%	36%
7	2980	3196	4.62	34.09	5.68	13.15%	16%
8	3196	3412	1.06	35.15	1.06	3.01%	3%
			35.15			100%	

Como puede apreciarse en la *Gráfica 18*, la curva hipsométrica obtenida para la microcuenca en estudio es más similar a la curva hipsométrica característica (A) de Strahler, que corresponde con un ciclo erosivo de cierta intensidad, equivalente a un estado geomorfológico juvenil o reciente.



Gráfica 18. Curva hipsométrica de la microcuenca Chalchihuapan

4.6.5. Determinación de caudales máximos o pico

El gasto o caudal máximo que llega al punto donde convergen las barranca de Chalchihuapan y San Pedro, bajo una lluvia máxima que se presenta con una frecuencia dada, se ha determinado mediante el método racional (Emil Kuichling, 1889), mediante la ecuación:

$$Q_p = 0.278 CiA \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

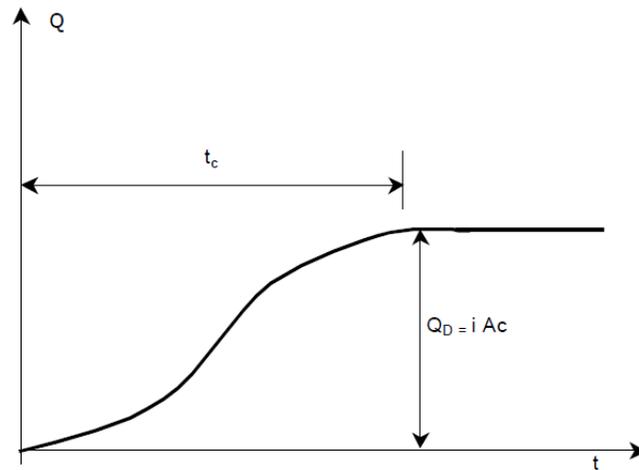
Q_p: es el caudal en m³/s

C: es un coeficiente de escurrimiento adimensional

i: es la intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (t_c), en mm/h

A: es el área de la cuenca drenada, en km²

La hipótesis fundamental del método racional considera que, una lluvia constante y uniforme que cae sobre la cuenca del estudio, producirá un gasto de descarga el cual alcanza su valor máximo cuando todos los puntos de la cuenca están contribuyendo al mismo tiempo en el punto de análisis (*Gráfica 19*)



Gráfica 19. Hipótesis fundamental de la fórmula racional.

La hipótesis se cumple para un lapso de tiempo denominado tiempo de concentración t_c , definido como el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo o estudio.

El tiempo de concentración (t_c) se estima comúnmente en México de acuerdo con el criterio de Kirpich, el cual consiste de la siguiente expresión:

$$t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

T_c : es el tiempo de concentración sobre la superficie natural, en horas

L : es la longitud del cauce principal de la cuenca, en metros

S : es la pendiente del cauce principal en valor absoluto.

Aplicando la metodología anterior para la superficie que drena hacia la confluencia con la barranca de San Pedro y partiendo de la información morfométrica obtenida, se tiene el resultado mostrado en la *Tabla 15*, en la que adicionalmente se tienen los resultados por los métodos de Rowe y SCS (Service of Conservation of Soils) para efectos comparativos, promediándose los dos resultados más bajos (Kirpich y SCS).

Tabla 15. Cálculo del tiempo de concentración en la microcuenca.

Morfometría							
Superficie		Longitud		Cota (ASNM)		Pendiente media (Sc)	Desnivel (m)
km ²	m ²	km	m	Sup	Inf		
27.9195	27,919,500.00	12.49	12,490	3,420	1,670	0.0728	1750
Tiempo de Concentración (Tc)							
Rowe		Kirpich		SCS		Promedio	P.M.A. (mm)
1.4729		1.2685		0.9760		1.1222	
88.3741		76.1100		58.5583		67.3341	
Promedio (min)						67.3341	
Promedio (hr)						1.1212	1,450

Con los resultados anteriores puede estimarse la posibilidad de una avenida súbita en el punto establecido, en este caso la confluencia de las barrancas de Chalchihuapan y San Pedro (punto de descarga), si se cumplen las siguientes condiciones: Si $T_c < 4 \text{ hr}$ y $Sc > 0.12$

Como puede advertirse, en dicho punto no se cumple la condición de pendiente, por lo que es poco probable que se tenga una avenida de este tipo; sin embargo, cabe considerar dos factores por lo que dicho fenómeno pueda ocurrir, siendo estos: a) La obstrucción repentina del cauce; y b) La variación de los valores de longitud y pendiente del mismo cauce aguas arriba.

Siguiendo con el desarrollo de la ecuación (1), los datos de intensidades de lluvia para diferentes tiempos de duración y retorno, se obtienen a partir de la *Tabla 13*, elaborada según los registros de la Estación Observatorio Cuernavaca.

Considerando que el tiempo de concentración T_c se encuentra cercano a los 60 minutos, se seleccionó la columna correspondiente a dicha duración, y aplicando la ecuación (1) se obtuvo la *Tabla 18*, donde se tiene el gasto máximo instantáneo (Q_p) que puede esperarse en el punto de descarga de la microcuenca. En la misma tabla, se comparan los gastos máximos según el coeficiente de escurrimiento (C_e) considerado actualmente (0.25); y otro hipotético, por cambio de uso del suelo o deforestación (0.30), observándose que una variación del 5% en el C_e , se refleja con un incremento del 21% en Q_p .

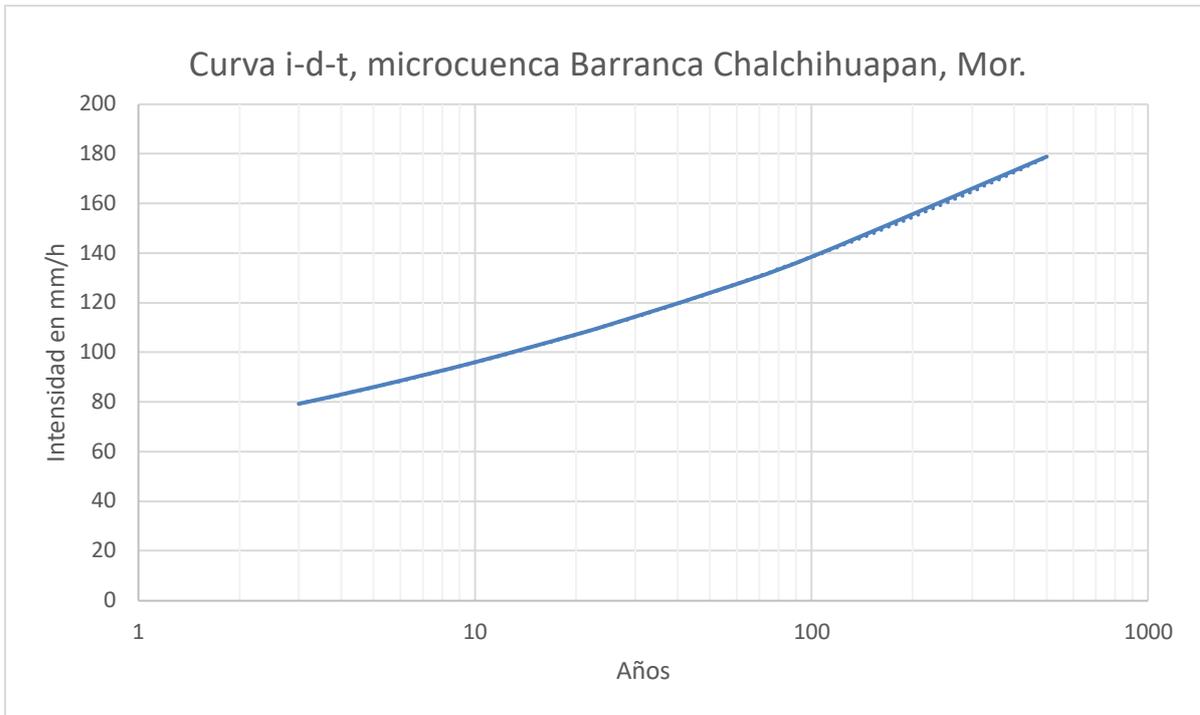
Tabla 16. Registro de intensidades de lluvia para diferentes periodos de retorno.

DATOS DE INTENSIDADES DE LLUVIA PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACIÓN TORMENTA MÁXIMA ANUAL (mm/h) OBSERVATORIO CUERNAVACA												
Tr (años)	Tiempo de duración en minutos											
	5	10	20	30	60	80	100	120	180	200	240	1440
3	153.66	118.97	82.62	79.32	54.54	45.63	39.41	34.71	26.07	24.04	20.67	3.34
5	166.66	129.04	89.61	86.03	59.16	49.49	42.74	37.65	28.28	26.08	22.42	3.62
10	186.08	144.07	100.06	96.05	66.05	55.26	47.72	42.03	31.57	29.12	25.03	4.04
20	211.30	160.86	111.71	107.24	73.74	61.70	53.28	46.93	35.25	32.51	27.95	4.52
25	219.17	166.67	115.75	111.12	76.41	63.93	55.21	48.62	36.53	33.68	28.96	4.68
50	243.35	186.08	129.23	124.06	85.31	71.38	61.64	54.29	40.78	37.61	32.33	5.22
100	266.52	207.76	144.29	138.52	95.25	79.69	68.82	60.61	45.53	41.99	36.10	5.83
500	343.46	268.35	186.37	178.91	123.03	102.93	88.89	78.29	58.81	54.24	46.63	7.53

Tabla 17. Resultado del cálculo de gastos máximos para diferentes periodos de retorno.

CÁLCULO DE GASTO MÁXIMO EN MICROCUENCA (Método racional)					
Periodo de retorno (años)	Duración (min)	Intensidad calculada (mm/h)	Gasto máximo, Q_p (m^3/s)		Incremento gasto máximo (deforestación)
			$C_e = 0.25$	$C_e = 0.30$	
3	60	54.54	140.60	169.8	21%
5	60	59.16	152.49	184.2	
10	60	66.05	170.26	205.7	
20	60	73.74	190.10	229.6	
25	60	76.41	196.96	237.9	
50	60	85.31	219.91	265.7	
100	60	95.25	245.54	296.6	
500	60	123.03	317.14	383.1	

De los datos anteriores, se obtienen la curva i-d-t, mostrada en la *Gráfica 20*, así como las secciones hidráulicas permisibles para el desalojo de los caudales máximos calculados (*Tabla 18*).



Gráfica 20. Curva intensidad-duración-tiempo de retorno microcuenca Barranca Chalchihuapan.

Tabla 18. Áreas mínimas permisibles para diferentes caudales y Tr

Periodo de retorno (años)	Área hidráulica requerida (Ah)				
	V (m/s)	L (m)	tc (h)	Qp (m³/s)	Ah (m²)
3	3.09	12,490.0	1.1222	140.60	45.48
5	3.09	12,490.0	1.1222	152.49	49.33
10	3.09	12,490.0	1.1222	170.26	55.07
20	3.09	12,490.0	1.1222	190.10	61.49
25	3.09	12,490.0	1.1222	196.96	63.71
50	3.09	12,490.0	1.1222	219.91	71.13
100	3.09	12,490.0	1.1222	245.54	79.42
500	3.09	12,490.0	1.1222	317.14	102.58

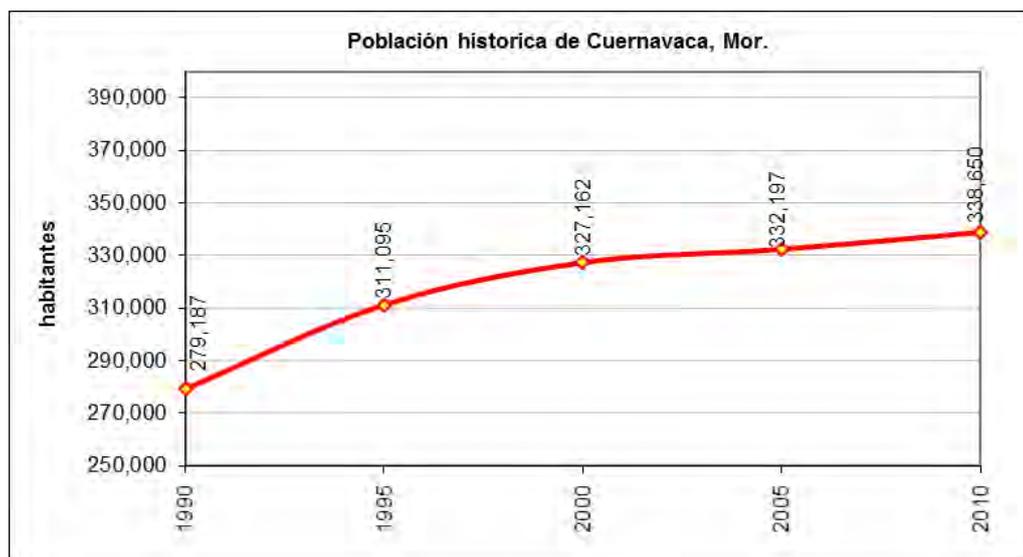
V. MARCO SOCIAL

5.1. Población

De acuerdo con los Censos y Conteos de Población y Vivienda efectuados por el INEGI desde 1990 a 2010, la ciudad de Cuernavaca ha incrementado su población en un 21% en dicho periodo, con una tasa de crecimiento media anual del 1.52%, pasando de 279 mil habitantes a 338 mil, es decir un incremento de 59 mil habitantes.

Como puede observarse en la *Gráfica 21*, el crecimiento poblacional del periodo 2000-2010 presenta un crecimiento más moderado con respecto a la década anterior, calculándose una tasa de crecimiento media anual de 0.35% para la década 2000-2010; en comparación con el 1.60% durante el periodo 1990-2000.

En concordancia con las metodologías tradicionales para la proyección de población, tales como: método aritmético, geométrico por porcentajes, geométrico por interés compuesto, Malthus, Tasa de Crecimiento Media Anual (T.C.M.A.) y Mínimos Cuadrados, se calcularon los valores correspondientes mostrados en la *Tabla 19*; incluyendo para efectos comparativos, la proyección publicada por el CONAPO, la cual se limita hasta el año 2030 para las localidades urbanas.

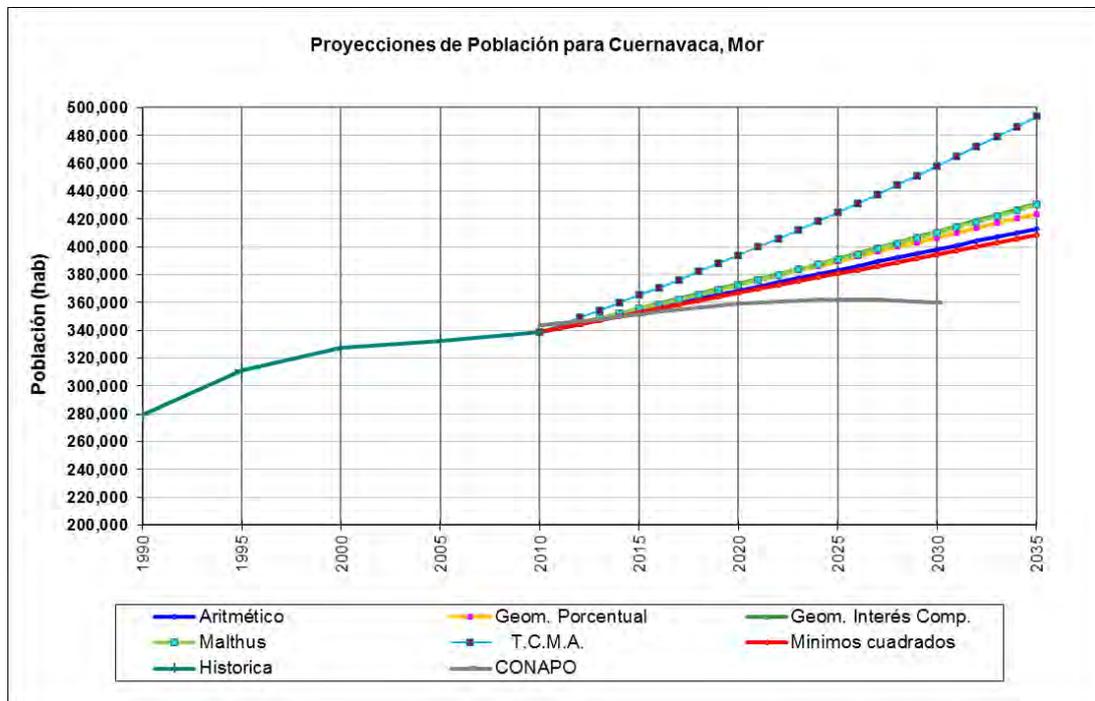


Gráfica 21. Crecimiento histórico de la población de Cuernavaca. Fuente: Censos de Población y Vivienda, INEGI.

Tabla 19. Proyecciones de la población del municipio de Cuernavaca, 2010 – 2035.

Proyección 2010 - 2035 para la población del municipio de Cuernavaca, Mor.								
AÑO	Aritmético	Geométrico por		Malthus	T.C.M.A.	Mínimos Cuadrados Ajuste lineal	CONAPO	
		Porcentajes	Interés Com				Población	Tasa %
	2973.15	1.00%	1.0097	1.00%	1.52			0.219
2010	338,650	338,650	338,650	338,650	338,650	338,650	343,400	-
2015	353,516	355,646	355,398	355,240	365,180	352,653	351,499	0.51
2020	368,382	372,642	372,974	372,642	393,788	366,656	358,946	0.33
2025	383,247	389,638	391,420	390,897	424,637	380,658	361,928	0.05
2030	398,113	406,634	410,778	410,046	457,902	394,661	359,523	-0.26
2035	412,979	423,630	431,093	430,133	493,774	408,664	359,523	-

Según los resultados mostrados en la tabla antecedente, se estima que la proyección de crecimiento demográfico más ajustada a la realidad corresponde con el método Geométrico de Interés Compuesto, ya que representa un valor medio comparado con los otros modelos (Gráfica 22). La tasa de crecimiento anual de acuerdo con el método seleccionado, se estima en 1.0097%.



Gráfica 22. Proyección demográfica del municipio de Cuernavaca estimada por diferentes métodos.

Para el caso de la microcuenca en estudio, los datos que presentan mayor desagregación son las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), elaboradas por el INEGI a partir del año 2000, utilizando para este caso las más recientes que corresponden al año 2010. Aplicando técnicas geomáticas, se determinaron las densidades de población en cada AGEB intersectada o incluida dentro de la microcuenca (*Figura 21*), para posteriormente, recalcular el número de habitantes exclusivamente dentro de dicho polígono según la densidad estimada para cada AGEB (*Tabla 20*). A continuación y de acuerdo con la tasa de crecimiento previamente estimada (1.0097%), se calculó la proyección de la población para el área de estudio y ambos márgenes de la Barranca de Chalchihuapan (*Tabla 21*).

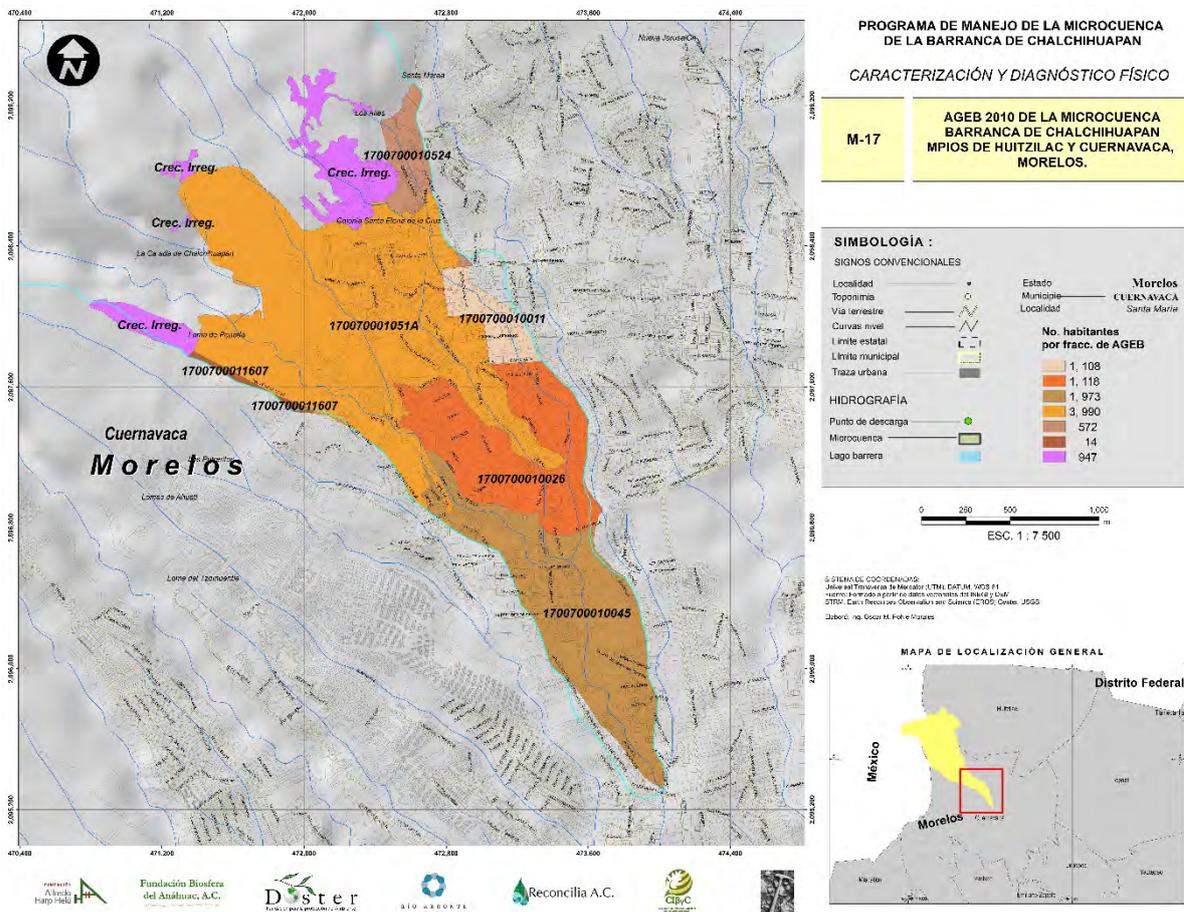


Figura 21. Fracciones de AGEB que comprende la microcuenca en estudio.

Tabla 20. Número de habitantes por fracción de AGEB y márgenes de la barranca de Chalchihuapan en 2010.

CÁLCULO DEL NO. DE HABITANTES POR FRACC. AGEB Y MARGEN, MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN								
AGEB	Sup_AGEB	Hab/ha	Sup/Fracc /AGEB	Hab/Fracc /AGEB	Sup. Márgenes (ha)		Hab /Márgenes	
					Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
170070001051A	226.86	22.45	177.71	3,990	29.53	148.17	663	3,327
1700700010011	69.28	82.26	13.46	1,108		13.46	0	1,108
1700700010026	86.86	18.54	60.29	1,118		60.29	0	1,118
1700700010045	159.26	25.13	78.50	1,973	35.12	43.38	883	1,090
1700700011607	20.90	6.22	2.23	14	2.23		14	0
1700700010524	126.76	43.06	13.27	572		13.27	0	572
Crec. Irregular			30.3098	997		30.31		997
SUMA/PROMEDIO	689.92	32.94	375.78	9,771.17	66.89	308.89	1,560	8,211

Tabla 21. Proyección 2010 – 2035 de la población según proyección estimada de 1.0097%

CÁLCULO DE PROYECCIÓN 2010 - 2035 EN MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN, SEGÚN PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DEL MUNICIPIO DE CUERNAVACA				
AÑO	POBLACIÓN CUERNAVACA	POBLACIÓN ZONA DE ESTUDIO BARRANCA CHALCHIHUAPAN		
	(HAB)	MARGEN DER.	MARGEN IZQ.	TOTAL
2010	338,650	1,560	8,211	9,771
2011	341,935	1,575	8,291	9,866
2012	345,252	1,590	8,371	9,961
2013	348,602	1,605	8,452	10,057
2014	351,983	1,621	8,534	10,155
2015	355,398	1,637	8,617	10,254
2016	358,846	1,653	8,701	10,354
2017	362,327	1,669	8,785	10,454
2018	365,842	1,685	8,870	10,555
2019	369,391	1,701	8,956	10,657
2020	372,974	1,718	9,043	10,761
2021	376,593	1,735	9,131	10,866
2022	380,246	1,752	9,220	10,972
2023	383,935	1,769	9,309	11,078
2024	387,659	1,786	9,399	11,185
2025	391,420	1,803	9,490	11,293
2026	395,217	1,820	9,582	11,402
2027	399,051	1,838	9,675	11,513
2028	402,922	1,856	9,769	11,625
2029	406,831	1,874	9,864	11,738
2030	410,778	1,892	9,960	11,852
2031	414,763	1,910	10,057	11,967
2032	418,786	1,929	10,155	12,084
2033	422,849	1,948	10,254	12,202
2034	426,951	1,967	10,353	12,320
2035	431,093	1,986	10,453	12,439

De la tabla anterior, se tiene que para el año en curso (2017), la población en la microcuenca asciende a 10, 454 habitantes, aproximadamente; y para el año 2035, llegaría a 12, 439 habitantes, es decir, crecerá un 27% más.

Cabe mencionar que la CEAGUA, en el año 2015, estimó bajo una metodología similar la proyección de la población ubicada en la misma área (*Tabla 22*), con la diferencia de calcularla en base al promedio general de las AGEBS; lo cual incrementa en 15% el número de habitantes en 2010 para llegar a 13, 345 en 2035. En todo caso, la diferencia entre uno y otro cálculo es del 6.8%, lo cual no representa una discrepancia muy significativa.

Tabla 22. Análisis densidades 2010 por AGEBS (CEAGUA)

Clave Geoestadística	Población (hab)	Superficie (ha)	Densidad (hab/km2)
1700100010524	5458	127.26	42.89
170010001051A	5094	227.74	22.37
1700100010011	5699	69.54	81.95
1700100010026	1610	87.19	18.46
1700100010045	4003	159.87	25.04
		Promedio	32.55

Fuente: Proyecto de Saneamiento de la Barranca Chalchihuapan. CEAGUA 2015

5.2. Marco socio-económico

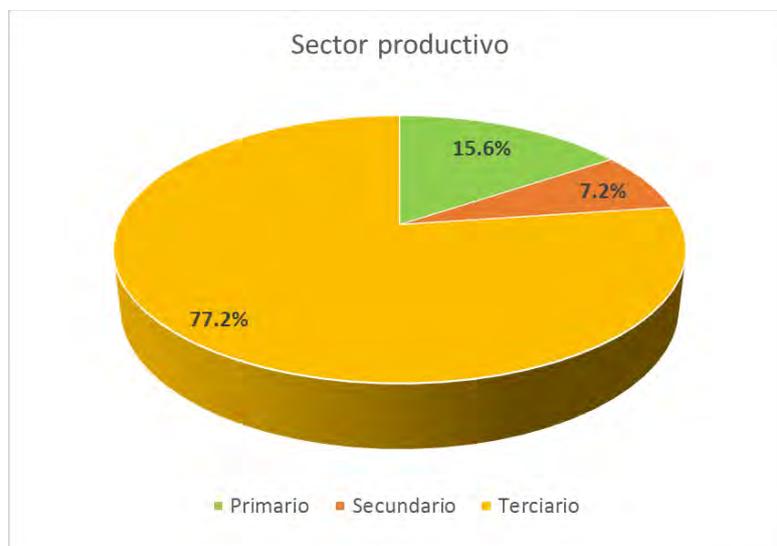
5.2.1. Actividades productivas

Para la identificación y ubicación de las actividades económicas dentro de la microcuenca, fue consultado el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2010; cuya información se encuentra desagregada para cada AGEBS. Partiendo de dicha información, se tiene que en el área de estudio opera un total de 250 unidades económicas, en la cuales predomina el sector terciario (77.2%), siguiéndole las actividades primarias (15.6%); y por último, el sector dedicado a la elaboración y fabricación de productos con el 7.2%, según se advierte en la *Tabla 23* y su gráfica respectiva (*Gráfica 23*).

Tabla 20.

Tabla 23. Distribución de actividades económicas dentro de la microcuenca.

Distribución de actividades económicas		
Sector productivo	No. Unidades	%
Primario	39	15.6%
Secundario	18	7.2%
Terciario	193	77.2%
Suma	250	100.0%



Gráfica 23. Porcentaje por sector productivo.

De la misma fuente, se tiene que la mayor parte de establecimientos corresponde con tiendas de abarrotes, ultramarinos y miceláneas (48), seguido por viveros y comercio al por menor de plantas y flores naturales (36), y en tercer término por moliendas y expendios de tortillas de maíz (8), lo cual puede constatarse en la *Tabla 24*.

Tabla 24. Actividades económicas por tipo de establecimiento y sector productivo.

RESUMEN DE ESTABLECIMIENTOS POR SECTOR PRODUCTIVO SITUADOS DENTRO DE LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN (DENUE 2010, INEGI)					
Codigo	No. Establec.	Sector productivo	Actividad económica	Empleados	AGEB
112512	1	Primaria	Piscicultura y otra acuicultura, excepto camaronicultura	0 a 5 personas	1170
466312	36	Primaria	Comercio al por menor de plantas y flores naturales	0 a 5 personas	0045
37					
236111	1	Secundaria	Edificación de vivienda unifamiliar	0 a 5 personas	0045
311812	3	Secundaria	Panificación tradicional	0 a 5 personas	0011
311830	8	Secundaria	Elaboración de tortillas de maíz y molienda de nixtamal	0 a 5 personas	0011
312112	1	Secundaria	Purificación y embotellado de agua	0 a 5 personas	051A
315223	1	Secundaria	Confección en serie de uniformes	0 a 5 personas	0045
321910	1	Secundaria	Fabricación de productos de madera para la construcción	0 a 5 personas	051A
327111	1	Secundaria	Fabricación de artículos de alfarería, porcelana y loza	0 a 5 personas	051A
332320	1	Secundaria	Fabricación de productos de herrería	0 a 5 personas	0045
337120	1	Secundaria	Fabricación de muebles, excepto cocinas integrales, muebles modulares de baño y muebles de oficina y estantería	0 a 5 personas	0045
18					
434111	1	Terciaria	Comercio al por mayor de fertilizantes, plaguicidas y semillas para siembra	0 a 5 personas	1607
461110	48	Terciaria	Comercio al por menor en tiendas de abarrotes, ultramarinos y misceláneas	0 a 5 personas	0011
461121	3	Terciaria	Comercio al por menor de carnes rojas	0 a 5 personas	0011
461122	3	Terciaria	Comercio al por menor de carne de aves	0 a 5 personas	0011
461123	1	Terciaria	Comercio al por menor de pescados y mariscos	0 a 5 personas	051A
461130	5	Terciaria	Comercio al por menor de frutas y verduras frescas	0 a 5 personas	0045
461150	2	Terciaria	Comercio al por menor de leche, otros productos lácteos y embutidos	0 a 5 personas	0011
461160	2	Terciaria	Comercio al por menor de dulces y materias primas para repostería	0 a 5 personas	0011
461190	1	Terciaria	Comercio al por menor de otros alimentos	0 a 5 personas	051A
461213	6	Terciaria	Comercio al por menor de bebidas no alcohólicas y hielo	0 a 5 personas	0011
462112	1	Terciaria	Comercio al por menor en minisúpers	6 a 10 personas	0045
463113	1	Terciaria	Comercio al por menor de artículos de mercería y bonetería	0 a 5 personas	0011
463211	4	Terciaria	Comercio al por menor de ropa, excepto de bebé y lencería	0 a 5 personas	0011
463212	1	Terciaria	Comercio al por menor de ropa de bebé	0 a 5 personas	051A
463310	1	Terciaria	Comercio al por menor de calzado	0 a 5 personas	051A
464112	3	Terciaria	Farmacias con minisúper	0 a 5 personas	0045
465212	2	Terciaria	Comercio al por menor de juguetes	0 a 5 personas	0011
465214	1	Terciaria	Comercio al por menor de equipo y material fotográfico	0 a 5 personas	0045
465311	5	Terciaria	Comercio al por menor de artículos de papelería	0 a 5 personas	0011
465911	1	Terciaria	Comercio al por menor de mascotas	0 a 5 personas	051A
465912	1	Terciaria	Comercio al por menor de regalos	0 a 5 personas	051A
466410	2	Terciaria	Comercio al por menor de artículos usados	0 a 5 personas	0011
467111	3	Terciaria	Comercio al por menor en ferreterías y tlapalerías	0 a 5 personas	0045
467113	1	Terciaria	Comercio al por menor de pintura	0 a 5 personas	0045
467114	1	Terciaria	Comercio al por menor de vidrios y espejos	0 a 5 personas	0045
485111	1	Terciaria	Transporte colectivo urbano y suburbano de pasajeros en autobuses de ruta fija	0 a 5 personas	051A

Tabla 24. Actividades económicas por tipo de establecimiento y sector productivo (continuación)

RESUMEN DE ESTABLECIMIENTOS POR SECTOR PRODUCTIVO SITUADOS DENTRO DE LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN (DENUE 2010, INEGI)					
Codigo	No. Establec.	Sector productivo	Actividad económica	Empleados	AGEB
522110	1	Terciaria	Banca múltiple	0 a 5 personas	0045
531112	1	Terciaria	Alquiler sin intermediación de viviendas no amuebladas	6 a 10 personas	051A
531113	5	Terciaria	Alquiler sin intermediación de salones para fiestas y convenciones	0 a 5 personas	0011
531311	1	Terciaria	Servicios de administración de bienes raíces	0 a 5 personas	0026
541190	1	Terciaria	Servicios de apoyo para efectuar trámites legales	6 a 10 personas	051A
541211	1	Terciaria	Servicios de contabilidad y auditoría	0 a 5 personas	0045
561432	4	Terciaria	Servicios de acceso a computadoras	0 a 5 personas	0011
611111	2	Terciaria	Escuelas de educación preescolar del sector privado	0 a 5 personas	0045
611112	1	Terciaria	Escuelas de educación preescolar del sector público	6 a 10 personas	0045
611122	4	Terciaria	Escuelas de educación primaria del sector público	11 a 30 personas	0011
611132	1	Terciaria	Escuelas de educación secundaria general del sector público	51 a 100 personas	051A
611161	1	Terciaria	Escuelas de educación media superior del sector privado	11 a 30 personas	0011
611181	2	Terciaria	Escuelas del sector privado de educación para necesidades especiales	0 a 5 personas	0045
611311	2	Terciaria	Escuelas de educación superior del sector privado	31 a 50 personas	0026
611621	1	Terciaria	Escuelas de deporte del sector privado	0 a 5 personas	0045
611631	1	Terciaria	Escuelas de idiomas del sector privado	0 a 5 personas	051A
621111	1	Terciaria	Consultorios de medicina general del sector privado	6 a 10 personas	0011
624411	3	Terciaria	Guarderías del sector privado	11 a 30 personas	0011
713120	2	Terciaria	Casas de juegos electrónicos	0 a 5 personas	0011
713943	1	Terciaria	Centros de acondicionamiento físico del sector privado	0 a 5 personas	0045
713944	1	Terciaria	Centros de acondicionamiento físico del sector público	0 a 5 personas	051A
721111	3	Terciaria	Hoteles con otros servicios integrados	31 a 50 personas	0026
721190	1	Terciaria	Cabañas, villas y similares	11 a 30 personas	0524
722511	5	Terciaria	Restaurantes con servicio de preparación de alimentos a la carta o de comida corrida	0 a 5 personas	0026
722513	2	Terciaria	Restaurantes con servicio de preparación de antojitos	0 a 5 personas	0011
722514	5	Terciaria	Restaurantes con servicio de preparación de tacos y tortas	0 a 5 personas	0045
722515	1	Terciaria	Cafeterías, fuentes de sodas, neverías, refresquerías y similares	0 a 5 personas	0045
722517	2	Terciaria	Restaurantes con servicio de preparación de pizzas, hamburguesas, hot dogs y pollos rostizados para llevar	0 a 5 personas	0045
722518	4	Terciaria	Restaurantes que preparan otro tipo de alimentos para llevar	0 a 5 personas	0011
811111	4	Terciaria	Reparación mecánica en general de automóviles y camiones	0 a 5 personas	0045
811112	1	Terciaria	Reparación del sistema eléctrico de automóviles y camiones	0 a 5 personas	051A
811121	4	Terciaria	Hojalatería y pintura de automóviles y camiones	0 a 5 personas	0045
811192	2	Terciaria	Lavado y lubricado de automóviles y camiones	0 a 5 personas	0045
811199	1	Terciaria	Otros servicios de reparación y mantenimiento de automóviles y camiones	0 a 5 personas	0045
811211	1	Terciaria	Reparación y mantenimiento de equipo electrónico de uso doméstico	0 a 5 personas	0011
811420	2	Terciaria	Reparación de tapicería de muebles para el hogar	0 a 5 personas	0011
811491	1	Terciaria	Cerrajerías	0 a 5 personas	0045
811499	2	Terciaria	Reparación y mantenimiento de otros artículos para el hogar y personales	0 a 5 personas	051A
812110	3	Terciaria	Salones y clínicas de belleza y peluquerías	0 a 5 personas	0011
812210	1	Terciaria	Lavanderías y tintorerías	0 a 5 personas	0045
812990	1	Terciaria	Otros servicios personales	0 a 5 personas	0045
813110	2	Terciaria	Asociaciones, organizaciones y cámaras de productores, comerciantes y prestadores de servicios	0 a 5 personas	0045
813120	1	Terciaria	Asociaciones y organizaciones laborales y sindicales	0 a 5 personas	0045
813210	4	Terciaria	Asociaciones y organizaciones religiosas	0 a 5 personas	0011
813230	2	Terciaria	Asociaciones y organizaciones civiles	0 a 5 personas	0045
931610	2	Terciaria	Actividades administrativas de instituciones de bienestar social	0 a 5 personas	0011

195

Por otra parte, en la *Figura 22*, se muestra la distribución espacial de cada establecimiento, según el sector productivo al que pertenece, destacando las siguientes características:

- 1) Las actividades primarias, particularmente en el caso de viveros y comercio al por menor de plantas y flores naturales, se concentran a lo largo de la parte norte de la Calle de La Cruz, dentro de los terrenos del pueblo de Tetela del Monte. Es conveniente mencionar, que al igual que en el caso de las actividades de piscicultura, los establecimientos referidos producen y comercializan directamente al público sus productos, eliminando la intermediación y consecuente elevación de costos; representando el sector económico más dinámico dentro de la microcuenca. Por otra parte, aun cuando es evidente su dependencia al recurso hídrico, no se han tomado suficientes medidas para evitar su dispendio y contaminación.
- 2) Destacan por su número, las tiendas de abarrotes y misceláneas, concentradas principalmente en el pueblo de Santa María Ahuacatlán, donde al parecer es la actividad económica predominante; y en segundo término, el corredor: Calle de La Cruz - Calzada de Los Reyes y la calle Francisco Villa. Esta distribución se atribuye a condiciones particulares de densidad y características económicas de la población, así como la ausencia de grandes tiendas de autoservicio en la zona, lo cual contribuye para el sustento de una cantidad importante de fuentes de empleo.
- 3) En cuanto a las actividades enfocadas a la fabricación y elaboración de productos, su mayor concentración se presenta en el pueblo de Santa María; siguiéndole por su número, el corredor Calla de La Cruz- Calzada de Los Reyes.

Al respecto, cada uno de los establecimientos considerados fue numerado para su identificación en la *Tabla 24*, la cual que se integra en el anexo correspondiente para su consulta.

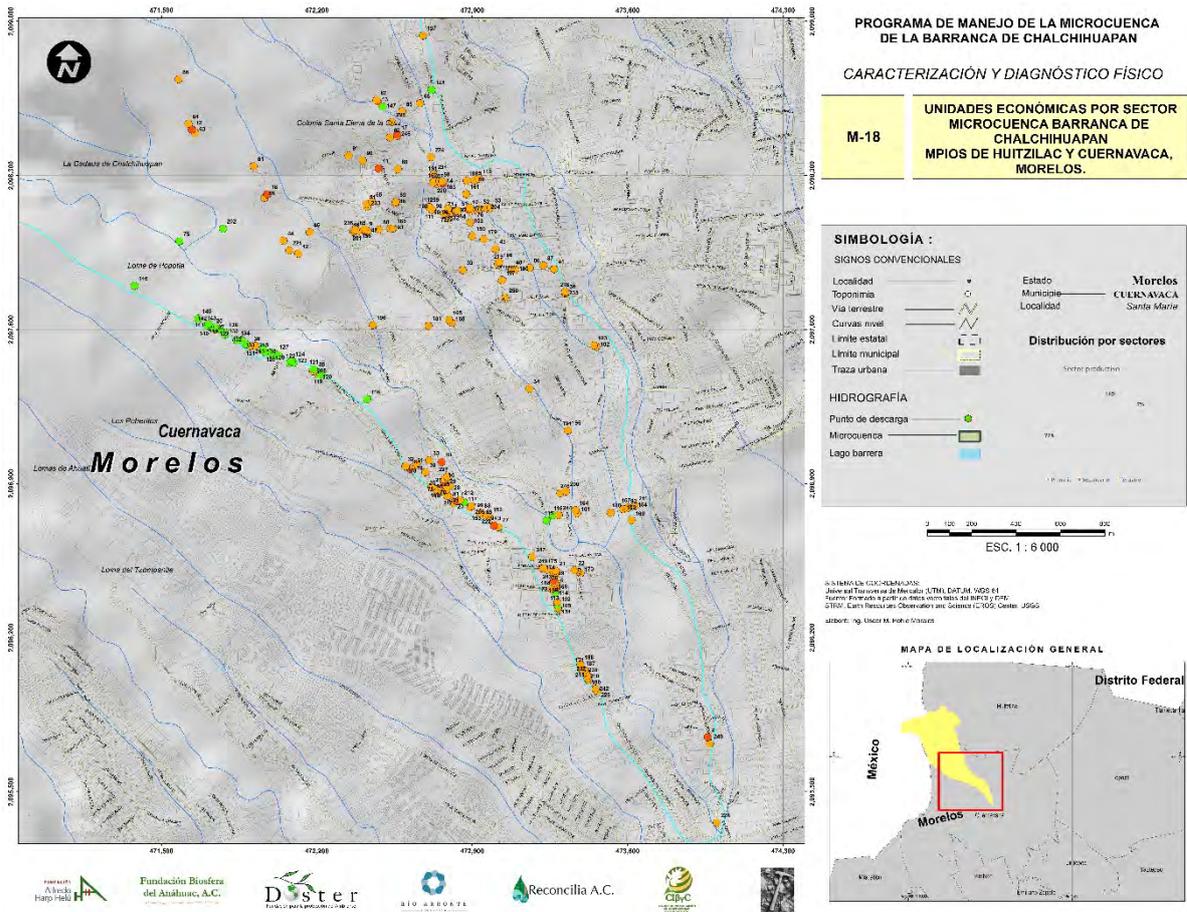


Figura 22. Distribución espacial de establecimientos en la microcuenca por sector productivo.

En relación con el cultivo y comercialización de plantas y flores, esta actividad es realizada por pequeños productores que cultivan gran variedad de especies hortícolas, principalmente en viveros cubiertos por mallas de sombra o naves de estructura semicilíndrica que proporcionan cierto control sobre la temperatura y humedad.

Las principales especies cultivadas son la nochebuena, azalea, rosa, belén, begonia, crisantemo, margarita y bugambilia, entre otras. Los principales mercados de la producción hortícola son la ciudad de Cuernavaca, Mor. y Xochimilco, CDMX. El cultivo más sobresaliente es la flor de nochebuena, ya que representa su mayor producción, no obstante que su venta se realiza únicamente durante los meses de noviembre y diciembre.

De acuerdo con Sánchez y Saldaña (2009), la actividad hortícola en Tetela del Monte inicia en los años cuarenta a partir del establecimiento del vivero Jardín de Cortés y el desarrollo de los trabajos de jardinería en la colonia Rancho Cortés. Posteriormente, durante las décadas de los 60's y 70's, la actividad hortícola inicia su etapa incipiente en Tetela del Monte con la apertura de algunos viveros. Para la siguiente década, dicha actividad crece y se consolida por la apertura de nuevas vías de comunicación y el acceso a los servicios de agua y energía eléctrica. A partir de los años 90, la actividad hortícola muestra una diferenciación económica de los viveros con el surgimiento de pequeños empresarios.

5.2.2. Grado de marginación

El CONAPO define la marginación como “un fenómeno multidimensional y estructural originado, en última instancia, por el modelo de producción económica expresado en la desigualdad distributiva del progreso, en la estructura productiva y en la exclusión de diversos grupos sociales, tanto del proceso como de los beneficios del desarrollo”. Esto es, que la marginación se encuentra asociada a la carencia de oportunidades, bienes y servicios fundamentales para el desarrollo de las comunidades. En este sentido, el CONAPO desarrolló una serie de indicadores o parámetros estadísticos para las diferentes áreas geoestadísticas estatales y municipales, según su grado de marginación, el cual se ve reflejado en la *Figura 23*, presentado a continuación.

En cuanto a la zona que presenta un grado de marginación muy bajo, ésta se localiza en la parte central de la microcuenca; lo cual pudo constatarse en los recorridos de campo mencionados.

De las observaciones anteriores, se considera que la distribución espacial de la marginación proporcionados por el CONAPO, no corresponden con la realidad, pudiéndose establecer en base a pruebas de campo que las porciones centro y sur del área urbana de la microcuenca (tomando como referencia la colonia Rancho Cortés y Tlaltenengo, respectivamente), pueden considerarse con un bajo grado de marginación. En contraste, la mitad norte – noroeste, presentan un alto grado de marginación, teniendo como referencia los poblados de Tetela del Monte y Santa María Ahuacatlán.

VI. USO DEL SUELO

6.1. Uso actual del suelo

Con base a la interpretación y comparación de imágenes satelitales World Imagery y Google Earth, así como el análisis espacial de datos vectoriales del INEGI y la CONANP, fueron determinados seis tipos de uso del suelo (*Figura 24*), cuya descripción se hace a continuación.

- Uso forestal. Ocupa una superficie de 3, 262.58 ha, equivalente al 87.4% del área de la microcuenca, siendo por lo tanto la de mayor extensión. La mayor parte de esta superficie, se encuentra incluida dentro de dos áreas naturales protegidas; el Corredor Biológico Chichináutzin (COBIOCH) y el Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ), según decretos publicados en el Diario Oficial de la Federación, con fechas: 30 de noviembre de 1988 y 19 de mayo de 1947, respectivamente. En el ámbito estatal, la porción norte y noroeste forma parte del Parque Otomí – Mexica, según decreto emitido el 8 de enero de 1980 por el gobierno del estado de México. De lo anterior se desprenden las siguientes observaciones:
 - a) Existe una franja de aproximadamente 5.5 km de largo por 0.6 km de ancho que no está considerado dentro de alguna ANP, la cual se localiza en el extremo centro-occidental del área en estudio.

- b) La expansión de la mancha urbana en forma de asentamientos irregulares, invade progresivamente el COBIOCH, sin que se hayan tomado las medidas pertinentes.
- c) La vocación de uso del suelo de la mayor parte de la microcuenca es de protección y conservación, debido a sus recursos biofísicos (*Foto 9*).



Foto 9. Vista norte de la barranca chalchihuapan. Nótese el grado de conservación de la cobertura arbórea.

- Uso urbano. Cubre el vértice sureste de la microcuenca, ocupando el 6.7% de su superficie (251.93 ha). Presenta una saturación relativamente elevada, considerando que existen grandes propiedades que llegan a exceder los 33, 000 m², como las que se ubican principalmente en la margen izquierda - parte media-baja de la barranca -, de la colonia Bellavista. Las mayores densidades de población se ubican en primer lugar en el pueblo de Santa María Ahuacatitlán, siguiéndole la colonia Jardín Tetela y en último término Rancho Cortés. Actualmente, la presión del crecimiento urbano se desarrolla en la parte norte y noroeste del poblado mencionado, ocupando tierras comunales e invadiendo parte del COBIOCH (*Foto 10*).



Foto 10. Fraccionamiento y hostel en Calle Tepeite, Sta. María Ahuacatitlán.

- Uso agrícola. Ocupa poco más de 100 ha, por lo que representa un 2.9% de la superficie en estudio. Dentro de este rubro se ha integrado la superficie ocupada por los viveros de Tetela del Monte, áreas de desmonte ubicadas en partes cumbresales interfluviales y pequeñas planicies fluviales intermontanas situadas sobre el cauce principal de los arroyos El Salto, Chalchihuapan y El Tepeite (*Foto 11*). Los terrenos más aptos para las actividades agrícolas son las planicies fluviales o vegas, limitadas a pequeñas extensiones (*Foto 12*). Las menos aptas, son las superficies cumbresales que tienen un espesor reducido de suelo y baja cantidad de nutrientes, por lo que es común el abandono y apertura de nuevos desmontes, extendiéndose a lo largo de los lomeríos descritos.



Foto 11. Zona de cultivo en planicie aluvial El Tepelite.



Foto 12. Zonas de cultivo en superficies cumbrales.

- Asentamientos irregulares. Como ya ha sido descrito en párrafos anteriores, este tipo de asentamientos se desarrolla en la porción nor-noroeste del área urbana, a expensas

de terrenos comunales de Santa María Ahuacatlán (*Foto 13*); y debido al crecimiento de la colonia San Miguel Apatlaco, no obstante que la accidentada topografía en esa zona constituye una limitante considerable. Además de la topografía, la falta de abastecimiento de agua potable a frenado aún más dicho crecimiento, ya que la mayor parte es proporcionada por camiones cisterna (“pipas”) provenientes de los municipios de Huitzilac y Cuernavaca, cuyo servicio es oneroso e irregular. La superficie que cubre este uso del suelo es de poco más de 56 ha, equivalentes al 1.5% de la zona de estudio.



Foto 13. Asentamiento irregular en zona forestal del COBIOCH.

- **Cauce.** Comprende las franjas del terreno donde fluyen los escurrimientos principales de El Salto, Chalchihuapan y El Tepeite, cuya superficie ocupa en conjunto 47 ha, o el 1.3% de la microcuenca. No obstante la relevancia que tienen los cauces y sus márgenes, por sus implicaciones hidrológicas y bióticas, es una zona poco respetada.

Así, un poco antes de la confluencia de las barrancas de El Salto y Chalchihuapan y conforme van fluyendo los cuerpos de agua pendiente abajo, se van incorporando decenas de descargas de aguas residuales domiciliarias y municipales, así como residuos sólidos de todo tipo, hasta convertir las aguas originalmente cristalinas, en un río contaminado. La invasión de la zona federal es común, disminuyendo el área hidráulica sensiblemente aun cuando esto constituye un peligro por inundación e inestabilidad de las márgenes; condición que se presenta principalmente en la zona baja de la microcuenca (*Foto 14*).

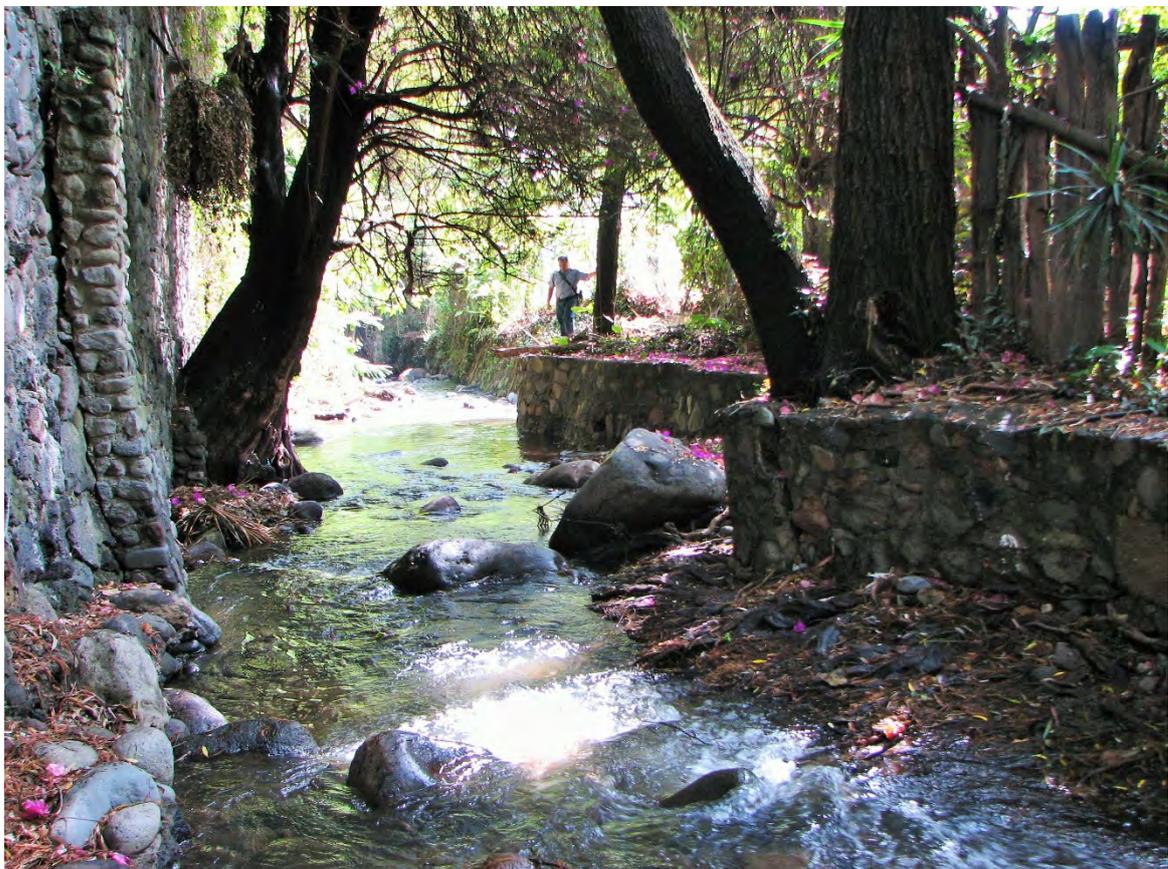


Foto 14. Reducción de sección hidráulica por invasión de zona federal, colonia Rancho Cortés.

Adicionalmente, existen también decenas de tomas marginales por medio de cárcamos y bombas domésticas, que extraen clandestinamente el agua para riego de jardines particulares, principalmente (*Foto 15*).



Foto 15. Instalaciones de bombeo en margen derecha de barranca Chalchihuapan, colonia Jardín Tetela.

Es notable constatar, como las propiedades más suntuosas se distinguen por la descarga de aguas servidas al lecho del río (*Foto 16*), sin que ninguna autoridad tome

las medidas pertinentes; como por ejemplo, la que se localiza en la margen izquierda de la colonia Bellavista (“Casa Blanca”), junto a la cascada de Tetela.



Foto 16. Descarga de agua residual “Casa Blanca”.

Por otra parte, también es evidente el esfuerzo de algunos colindantes de la barranca por paliar la contaminación y preservar en alguna medida las condiciones ambientales del cauce principal; incluso, han construido pequeños pasajes rivereños que sugieren de forma incipiente, lo que sería el desarrollo de un proyecto turístico – ecológico similar o aún más amplio y natural que el Parque Chapultepec (*Foto 17*), considerando las numerosas cascadas y riqueza biótica que todavía persiste a lo largo de esta zona.

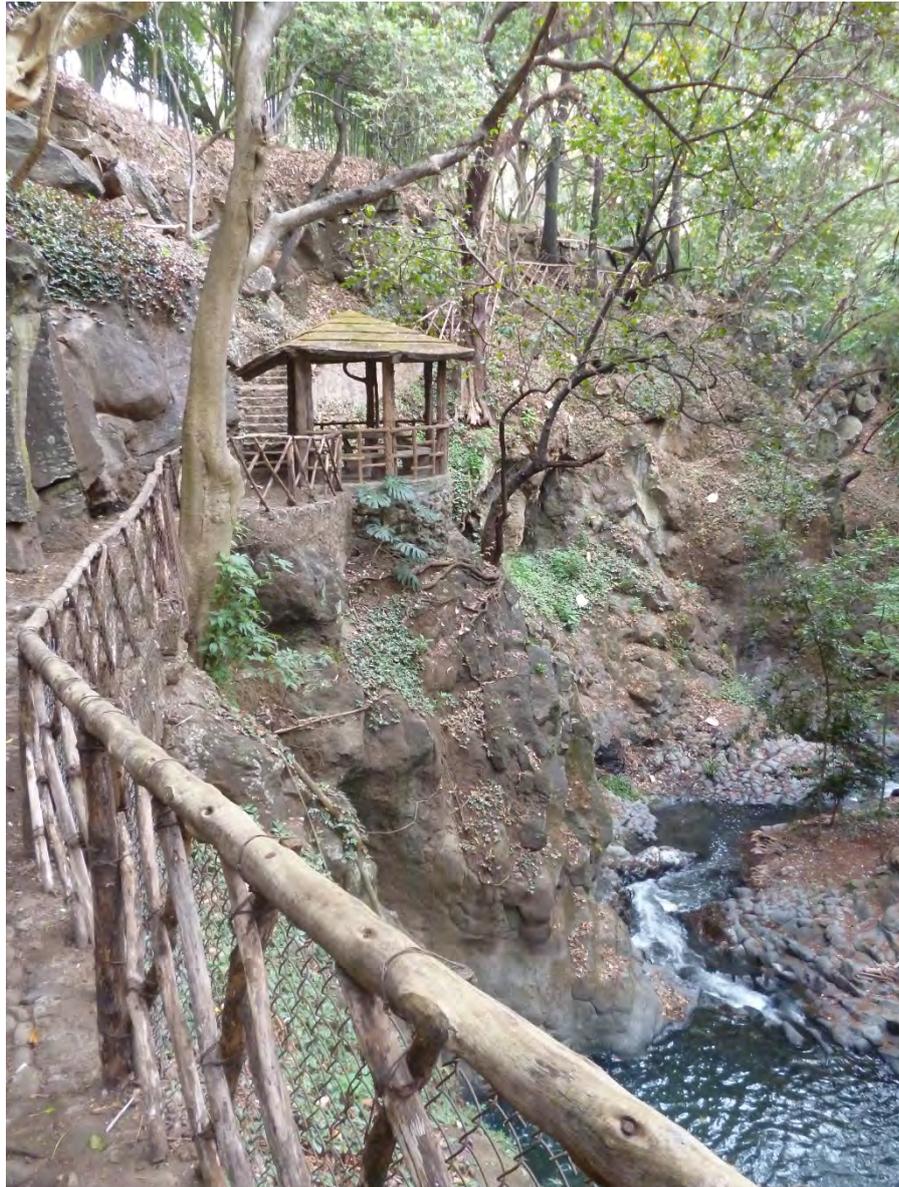


Foto 17. Paseo riverero en margen izquierda de Chalchihuapan, colonia Bellavista.

Con respecto a las cascadas citadas, se pueden considerar cinco por su belleza escénica, siendo estas las de: Tetela, Agua Azul, Los Reyes, Quetzalcóatl y El Salto; las dos últimas son intermitentes, ya que solo ocurren durante la época de lluvias. Sus imágenes se muestran a continuación en las fotografías 18, 19, 20, 21 y 22, respectivamente.

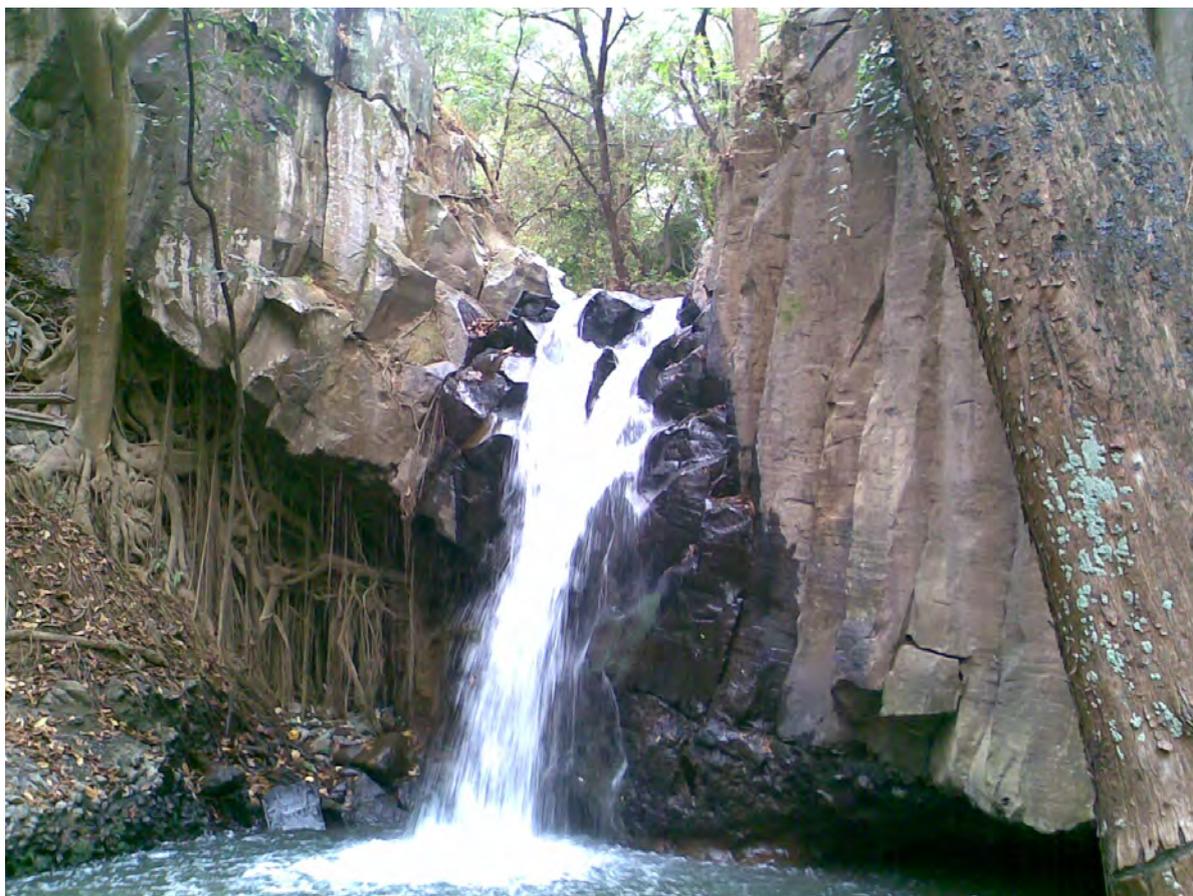


Foto 18. Cascada Tetela. Nótese el basalto columnar similar al de San Antón.



Foto 19. Cascada Agua Azul



Foto 20. Cascada Los Reyes.



Foto 21. Cascada Quetzalcóatl, barranca Chalchihuapan.

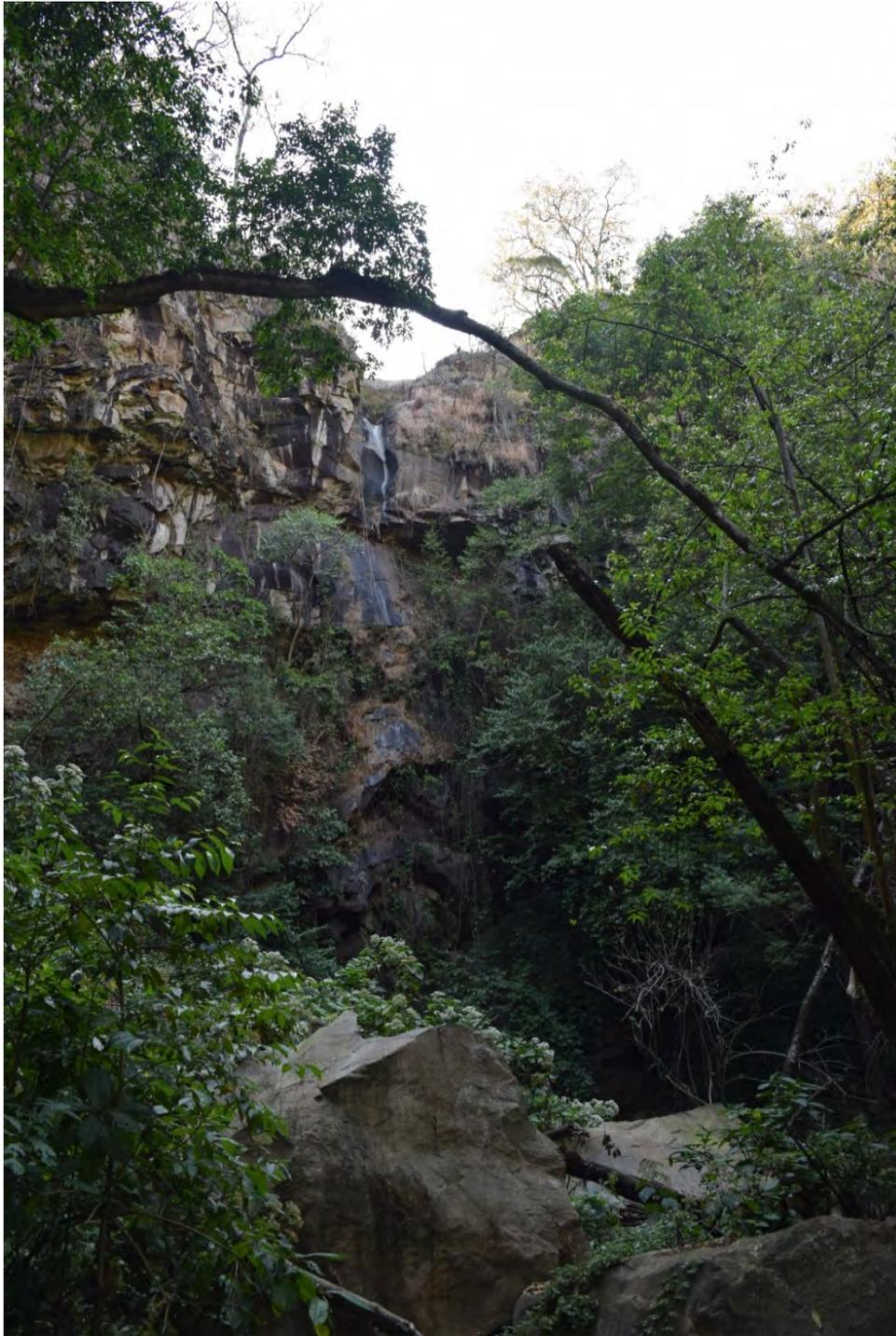


Foto 22. Cascada El Salto, barranca El Salto.

Por último, para ilustrar claramente la distribución espacial de los diferentes usos del suelo en la microcuenca, se muestra la *Figura 24*; así como las superficies y porcentajes correspondientes (*Tabla 25*), esquematizados en la *Gráfica 24*.

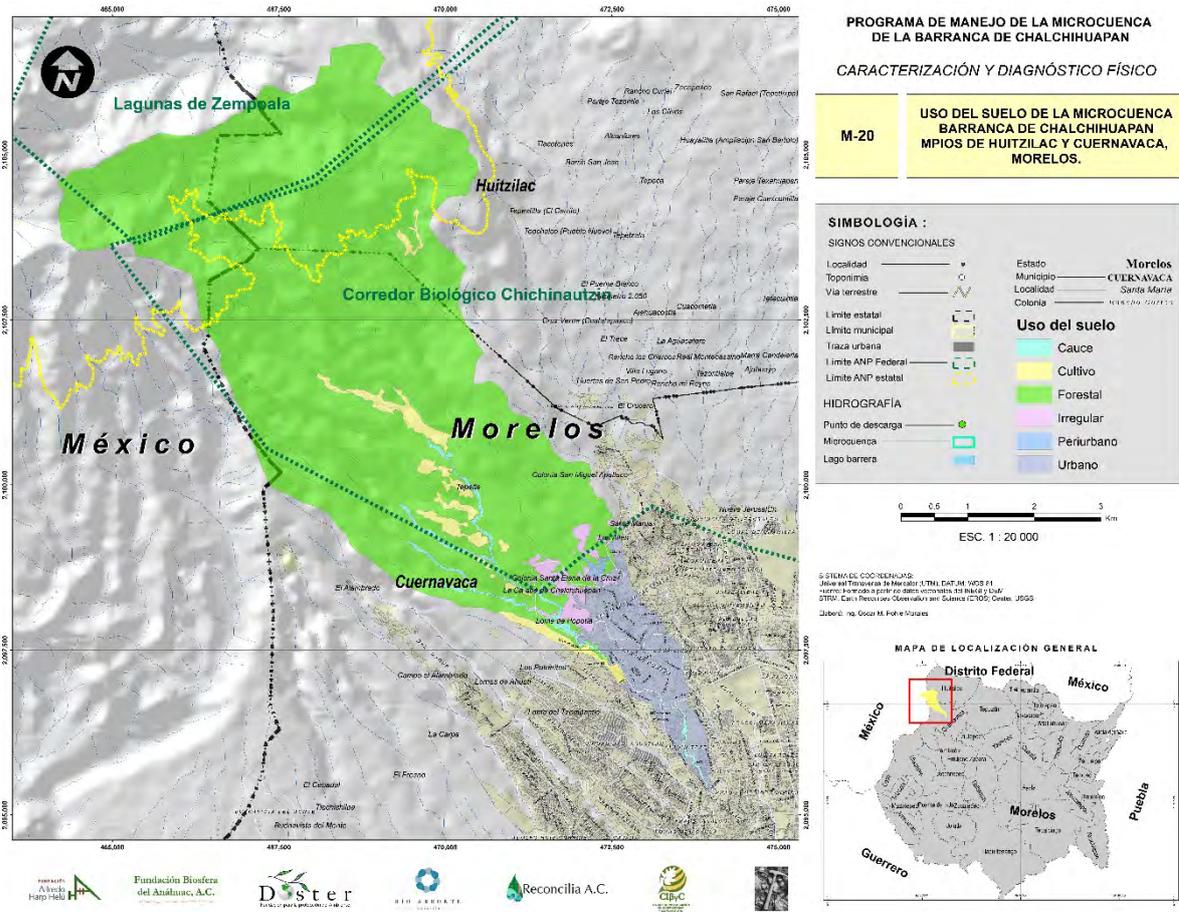


Figura 24. Carta de uso actual del suelo en la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.

Tabla 25. Uso del suelo

DISTRIBUCIÓN DE USO DEL SUELO EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN		
Uso	Área (ha)	%
Cauce	47.05	1.3%
Cultivo	108.65	2.9%
Forestal	3,262.58	87.4%
Irregular	56.37	1.5%
Periurbano	7.60	0.2%
Urbano	251.93	6.7%
Suma:	3,734.18	100.0%



6.2. Dinámica de uso del suelo

Según los registros cartográficos del INEGI, sobre el crecimiento histórico de la zona urbana de Cuernavaca durante los años 1953, 1966, 1982, 1993, 2000, 2010; así como imágenes satelitales históricas Google Earth 2004 – 2017, se elaboró el mapa mostrado en la *Figura 25*, del cual deriva la *Tabla 26* y su gráfica correspondiente (*Gráfica 25*). Con base en el análisis de dicha información, se tiene lo siguiente:

- 1) A principio de los años 50's, la población establecida dentro de la microcuenca se ubicaba en pequeñas zonas aisladas, tales como los pueblos de Tetela del Monte, Santa María Ahuacatlán; y el inicio de las colonias Rancho Cortés y Loma Linda, teniendo todos ellos como eje de desarrollo la Avenida Morelos Norte (actualmente Emiliano Zapata), que se prolongaba hacia el Norte por el antiguo Camino Nacional hasta la Ciudad de México; camino empedrado, construido durante la Colonia para llegar al

Gráfica 24. Distribución porcentual de usos del suelo.

Puerto de Acapulco (Camino de Asia); el cual posteriormente fue sustituido por la Carretera Federal México – Cuernavaca, construida entre 1927 y 1929 por la entonces Secretaría de Caminos y Obras Públicas (SCOP). La superficie ocupada en dicha fecha representaba el 6.6% (24.26 ha) del área urbana actual y el 0.6% de la superficie total de la microcuenca.

- 2) Para el año 1966, la expansión de la mancha urbana presenta el mayor incremento de urbanización (31.2%), cubriendo una superficie de 114.35 ha, equivalente al 3.1% de la microcuenca. En dicha fecha se tienen la mayor parte de los asentamientos de la colonias: Jardín Tetela, Bellavista, Rancho Cortés, Loma Linda y zona sur del poblado de Santa María Ahuacatlán.
- 3) Hacia 1993, se ocupan amplias franjas de terreno, principalmente en la margen derecha de la barranca de Chalchihuapan en Tetela del Monte, los corredores Norte y Sur de Rancho Cortés y las zonas poniente y norte de Santa María Ahuacatlán. En este caso también se observa un incremento considerable de 92.06 ha, lo que representa el 25.1% de la superficie actual del área urbana y un 2.5% del total de la microcuenca.
- 4) Durante el año 2000, la expansión urbana sufre una brusca disminución, llegando a sólo 5.0 ha (1.4%) de extensión, localizadas en la zona poniente del poblado de Santa María.
- 5) En 2010 se observa nuevamente un incremento importante de la mancha urbana, llegando casi al 10%, con 36.0 ha de la superficie urbana actual. Cabe destacar que la mayoría de dicha superficie ocupa terrenos comunales del pueblo de Santa María Ahuacatlán.
- 6) Finalmente hacia el 2015, la tendencia de expansión se ve nuevamente aumentada al llegar a 94.6 ha, equivalentes al 25.8% de la superficie total de la zona urbana. Al igual que en 2010, la expansión se da a expensas de los terrenos comunales de Santa María, los cuales se encuentran actualmente bajo una fuerte presión especulativa, internándose y fragmentando cada vez más el Corredor Biológico Chichináutzin.

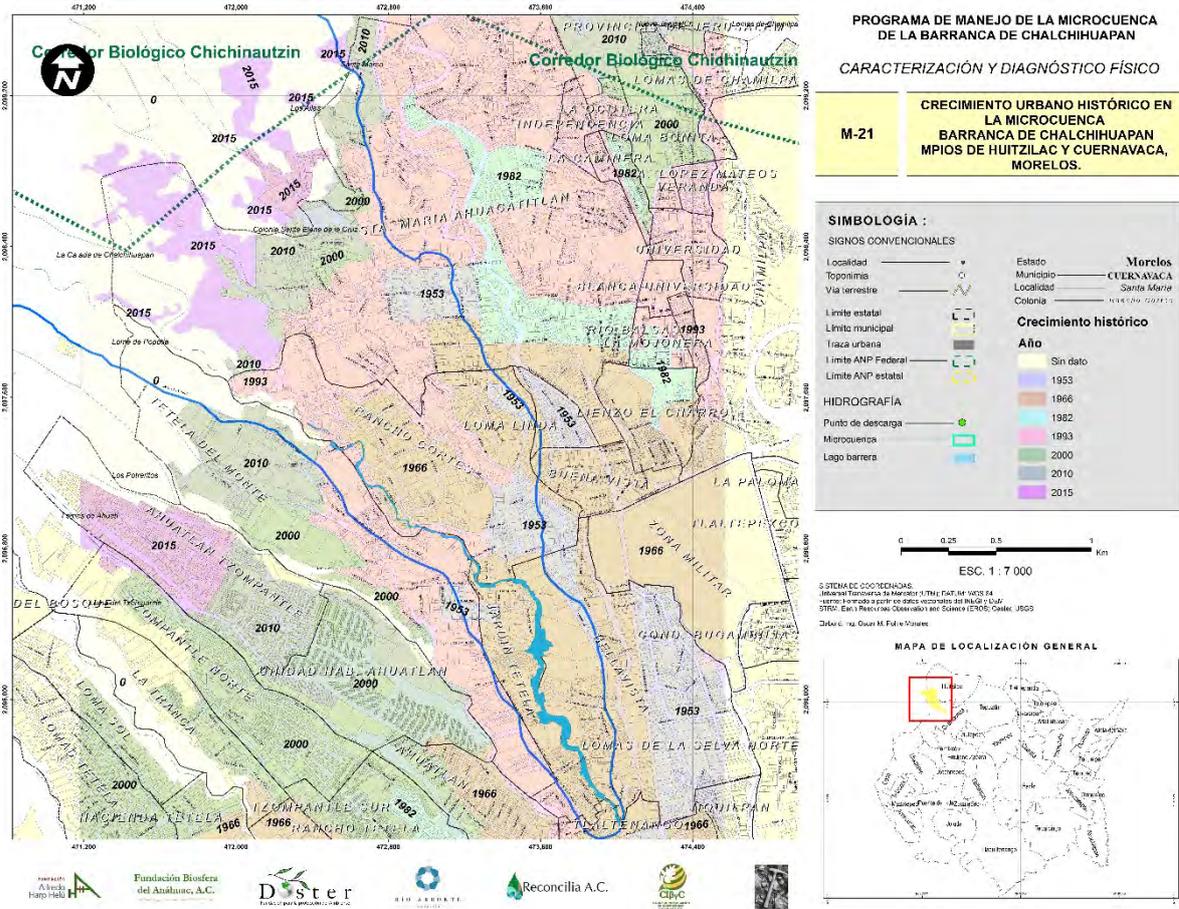
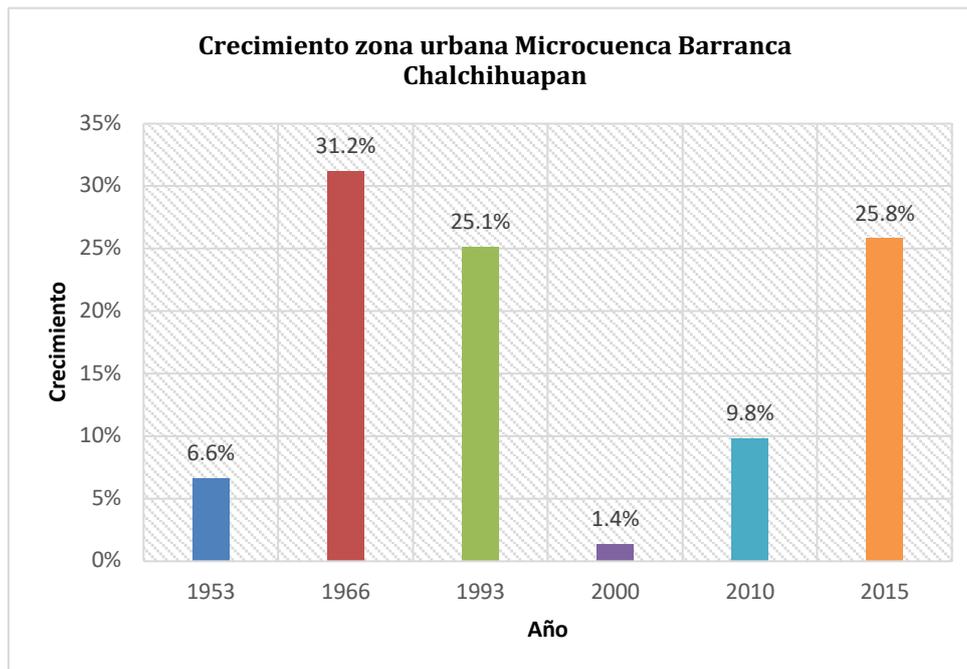


Figura 25. Crecimiento histórico de la mancha urbana región norponiente de Cuernavaca

Tabla 26.

CRECIMIENTO HISTÓRICO DEL ÁREA URBANA EN LA MICROCUENCA BARRANCA CHALCHIHUAPAN			
Año	Superficie (ha)	% Zona Urbana	% Área acumulada
1953	24.26	6.6%	6.6%
1966	114.35	31.2%	37.8%
1993	92.06	25.1%	63.0%
2000	5.01	1.4%	64.3%
2010	36.01	9.8%	74.2%
2015	94.59	25.8%	100.0%
Suma	366.28	100.0%	



Gráfica 25. Incremento histórico porcentual de área urbana en la microcuenca.

VII. DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA

7.1. Situación actual del manejo del agua

El acelerado crecimiento de la población; la intensa especulación de tierras comunales y ejidales, inducida por las modificaciones al Artículo 27 constitucional; y, la crónica e inexistente planeación urbana, particularmente característica en el estado de Morelos, han traído como consecuencia el deterioro del recurso hídrico, agudizado cada vez más por su sobreexplotación y el vertido de aguas residuales y residuos sólidos urbanos en los cuerpos de agua superficial.

Aunque dicha condición es un factor común en todas las barrancas urbanas de Cuernavaca, no deja de llamar la atención en el caso de la microcuenca en estudio; ya que, aun cuando la importancia de su conservación es evidente para viveristas, ejidatarios y colonos, no existe actualmente entre las partes un consenso sobre su manejo sustentable.

7.1.1. Agua superficial

De las mediciones obtenidas con flujómetro digital durante la temporada de estiaje 2017, se tiene la relación de caudales aforados en los manantiales, canales y cauces (Tabla 27), que en conjunto sumaron un total de 73.24 litros por segundo (l.p.s.), cantidad muy cercana al volumen concesionado por la CONAGUA que es de 72.60 l.p.s., equivalente a 2.29 hm³ anuales.

Tabla 27.

RELACIÓN DE CAUDALES AFORADOS EN MANANTIALES Y CAUCES DE LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN (ESTIAJE 2017)								
Sitio	Coordenadas UTM			Gasto (lps)	Temp (°C)	Conduct. (µS)	TSD (ppm)	Observaciones
	X	Y	Z					
Tules de Atexcapa	467,611.27	2,105,497.50	2,855.81	0.81	S.D.	S.D.	S.D.	Manantial de ladera, limte N Tules Atexcapa
Canal Tepeite	469,561.94	2,101,098.62	2,263.40	35.24	11.00	70.00	35.00	Canal revestido El Tepeite
Manantial Quetzalcóatl	471,342.92	2,098,415.45	1,896.33	0.25	15.3	90	45	Manantial de fondo, cauce Chalchihuapan
Manantial fondo	471,386.69	2,098,401.00	1,907.32	1	S.D.	S.D.	S.D.	Manantial de fondo, cauce Chalchihuapan
Manantial ladera	471,387.10	2,098,395.25	1,952.73	2.6	S.D.	S.D.	S.D.	Base zona de derrumbe, cauce Chalchihuapan
Manantial El Salto 1	470,843.57	2,098,292.17	1,980.30	0.1	16.40	85.00	44.00	Manantial de ladera, M.I. cauce El Salto
Manantial El Salto 2	470,873.58	2,098,289.68	1,986.41	0.25	15.5	80	50	Manantial de ladera, M.I. cauce El Salto
Cauce El Salto	470,873.58	2,098,289.68	1,858.00	2.2	16.4	S.D.	S.D.	Medición en cauce principal
Cauce Chalchihuapan	471,620.74	2,097,981.06	1,856.00	24	S.D.	S.D.	S.D.	Medición en cauce principal
Canal El Salto	471,588.99	2,097,960.95	1,854.00	2.4	S.D.	S.D.	S.D.	Canal para derivación de riego
Mangueras	471,314.01	2,098,098.81	1,875.00	9.4	S.D.	S.D.	S.D.	Mangueras para conducción de agua a viveristas
SUMA*:				73.24				

Suma = Suma de caudales en cauces principales de las barrancas: El Salto, Chalchihuapan (Truchas), canal El Tepeite, canal El Salto y estimación de caudal total de mangueras por diferencia. El caudal del manantial Tules de Atexcapa no se consideró en la suma.*

Partiendo también de los recorridos de campo realizados durante el presente estudio, se tienen las características generales de los cuerpos de agua superficial descritas a continuación:

Manantial Tules de Atexcapa

Manantial de ladera, localizado en el límite norte de la microcuenca, dentro del municipio de Huitzilac, Mor (Figura 26). Geohidrológicamente, consiste en el área de descarga de un pequeño acuífero colgado, alojado dentro de rocas fracturadas de composición andesítico – basálticas que forman la meseta volcánica denominada Mesa La Gloria, en contacto con rocas menos permeables de la formación Andesita Zempoala. Su caudal es muy reducido actualmente, pero en el pasado alimentaba un pequeño lago de barrera del cual sólo quedan vestigios por los sedimentos lacustres que rellenan su vaso.

El manejo del sitio es predominantemente piscícola desde hace algunas décadas, incluyendo los servicios de un rústico restaurante, una cabaña abandonada, áreas de esparcimiento y campamento, así como paseos a caballo; y veredas que se internan dentro de las montañas ofreciendo un paisaje incomparable. Desafortunadamente, la inseguridad ha hecho presa de este idílico lugar, que apenas subsiste con el pastoreo de ovejas, algunos turistas arriesgados y un incipiente aprovechamiento forestal.

También cabe mencionar, que en fecha reciente, la CEAGUA intentó captar el agua del manantial para derivarla por gravedad hacia el poblado de Huitzilac; sin embargo, esto no fue posible debido al desnivel en que se encuentra dicho vaso. No obstante, actualmente es un sitio de abastecimiento para las “pipas” que comercializan el agua dentro del municipio mencionado, refiriéndose por sus pobladores que diariamente se llenan de 6 a 7 pipas con capacidad aproximada de 10, 000 litros, cada una.

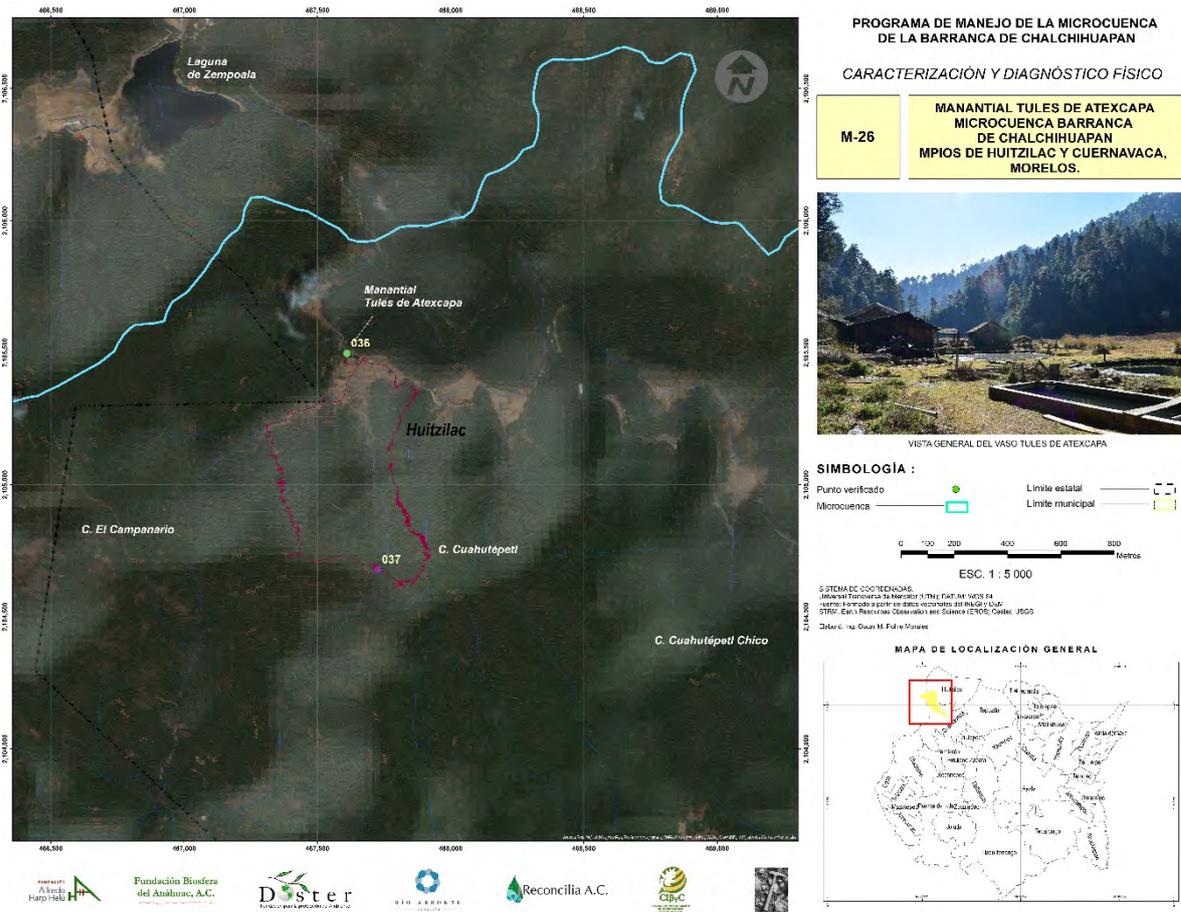


Figura 26. Localización del manantial Tules de Atexcapa, Huitzilac, Mor.

Canal Tepeite

Obra de conducción que desvía el escurrimiento base del arroyo El Tepeite, localizada en la zona centro-oriental de la microcuenca (Figura 27). Su sección transversal es aproximadamente cuadrada, de 0.53 m x 0.50 m, con capacidad máxima de 40 l.p.s., cuyo flujo es controlado por un sistema de compuerta y tanque regulador. En la mayor parte de su trayecto se encuentra “encofrado”, el cual termina en las inmediaciones de la población de Santa María Ahuacatlán.

Como se ha mencionado, dicho canal capta el volumen total del escurrimiento base durante la época de estiaje; por lo que, el cauce del río permanece totalmente seco durante dicha temporada aguas abajo de las obras de captación mencionadas, afectando la funcionalidad ecológica del ciclo hidrológico de la microcuenca.

Esta situación, contraviene las disposiciones contenidas en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012; en la cual se define el caudal ecológico como: “la cantidad, calidad y variación del gasto o agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales”.

Para efectos comparativos, los 35. 24 l.p.s. aforados en el canal El Tepeite durante el estiaje, serían suficientes para dotar de agua potable a 10, 149 habitantes, si consideramos una dotación diaria de 300 litros/persona/día; esto es, el 97% de la población total estimada en la microcuenca para el año 2017.

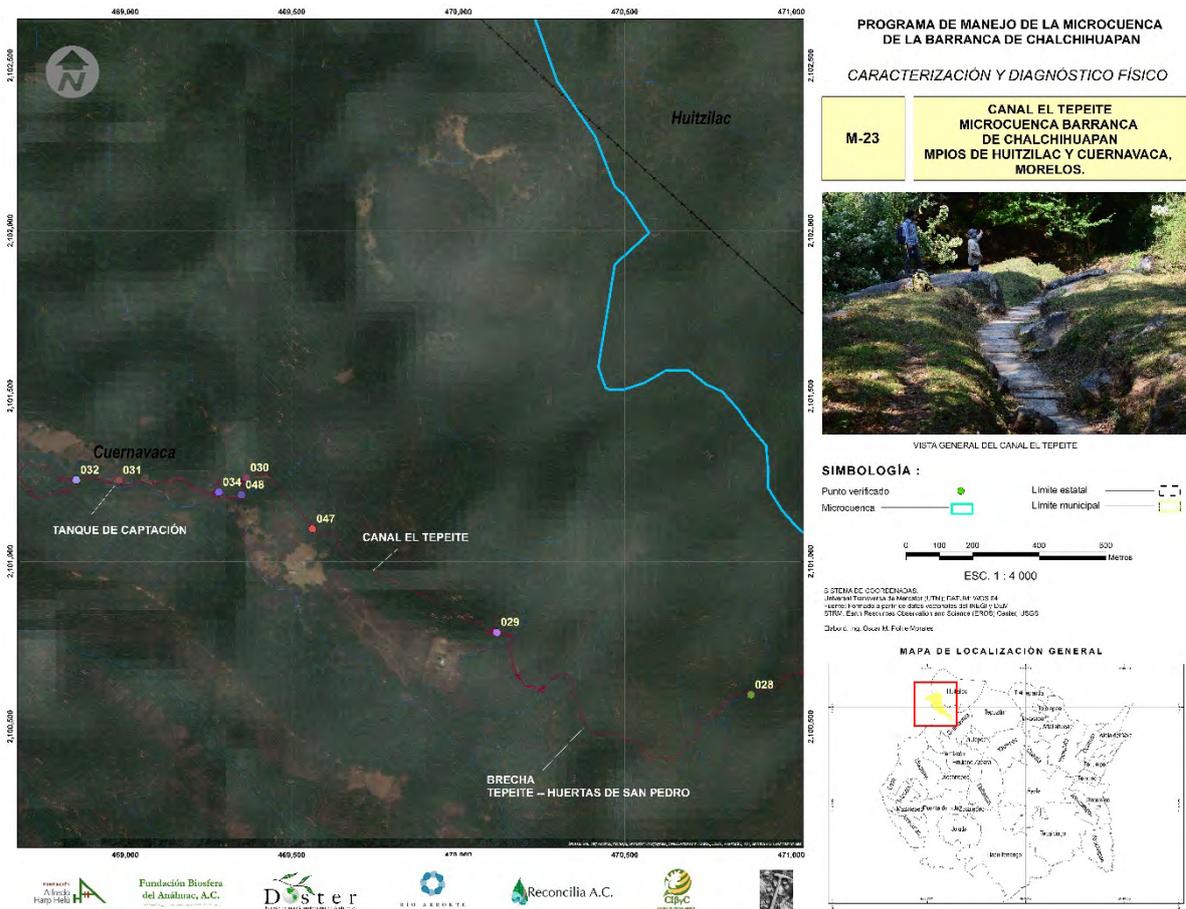


Figura 27. Localización del canal El Tepeite, Cuernavaca, Mor.

Manantial Quetzalcóatl

Pequeño manantial que surge del relleno fluvial que ocupa el cauce de la barranca (Figura 28), a partir de cual se restablece el flujo perenne y en el cual se van incorporando otras surgencias de fondo hasta sumar un caudal de 24 l.p.s., según el aforo realizado en dicho cauce antes de confluir con la barranca El Salto. Durante dicho trayecto, existen algunas tomas particulares, siendo la más importante la ubicada en el punto 040, que consiste de una pequeña obra de almacenamiento, cárcamo e instalaciones de bombeo (Foto 23).

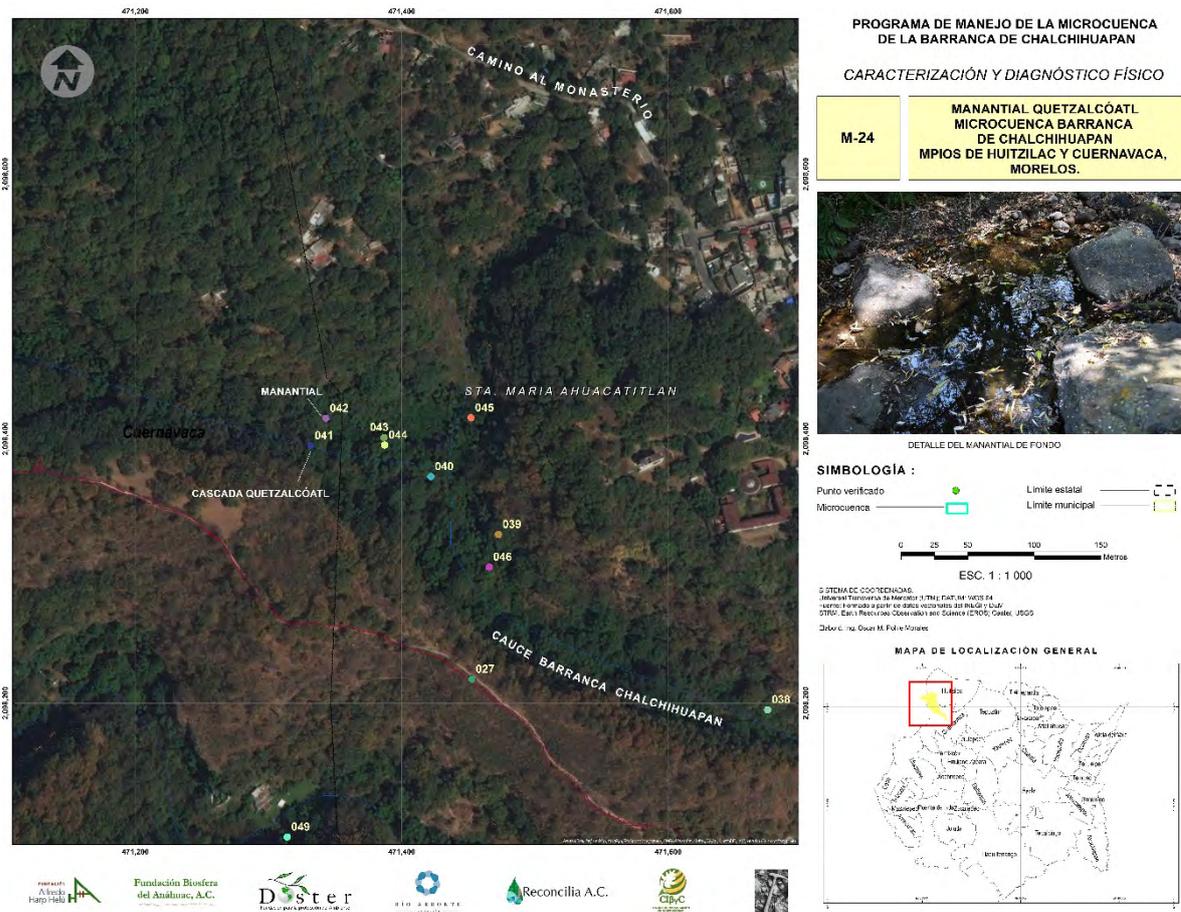


Figura 28. Localización del manantial Quetzalcóatl

Aguas abajo de la obra de captación referida, una parte del caudal que escurre por el cauce se desvía por medio de pequeños canales y mangueras a estanques acuícolas destinados para la crianza y engorda de trucha arcoíris (Foto 24). Los principales impactos al ambiente por las actividades acuícolas se relacionan con el alimento desperdiciado por los peces, escape de

crías a la corriente natural, captación y retención parcial del caudal, incremento de algas e insectos acuáticos, cambio en la composición química del agua y generación de residuos sólidos urbanos.



Foto 23. Pequeño almacenamiento y caseta de bombeo. Margen izquierda barranca Chalchihuapan.



Foto 24. Estanque para crianza de truchas. Margen izquierda barranca de Chalchihuapan.

Manantiales El Salto (1 y 2)

Formados en el contacto geológico de rocas andesítico - basálticas fracturadas y depósitos laháricos asignados a la Formación Cuernavaca. A diferencia de la barranca de Chalchihuapan, estos manantiales se manifiestan como surgencias de ladera, por el cambio de permeabilidad entre las dos formaciones y el profundo corte erosivo que expone el nivel freático (*Foto 25*).

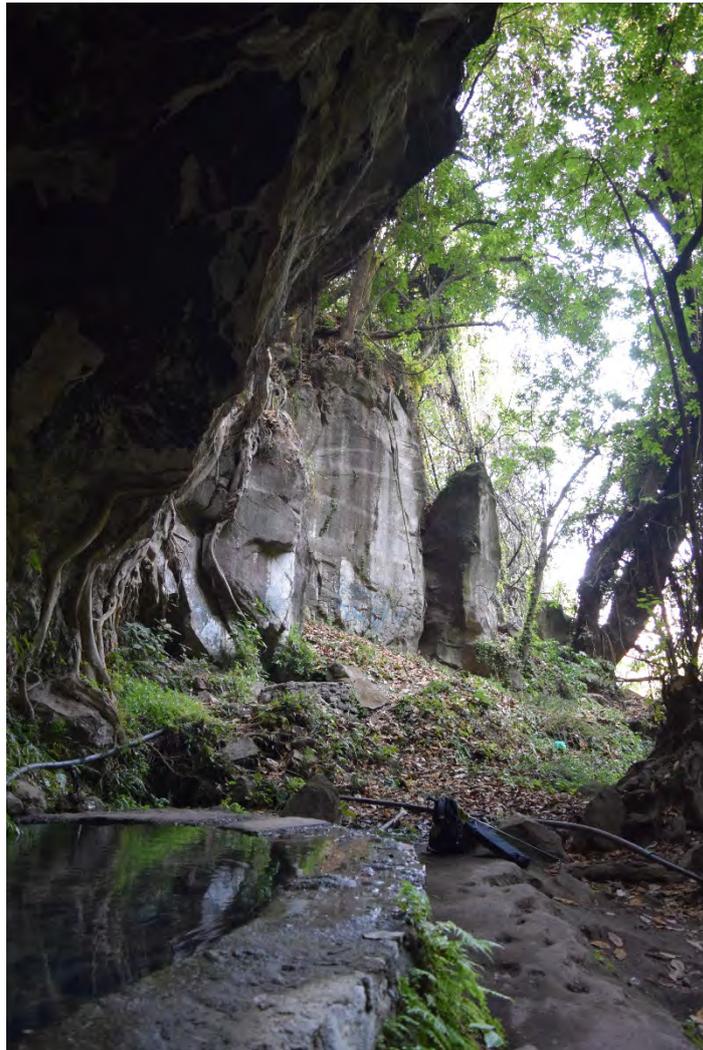


Foto 25. Manantial de ladera en contacto geológico, barranca El Salto

Estos manantiales se ubican en la margen izquierda de la barranca, en el desnivel que forma la cascada de El Salto, ya descrita en capítulos anteriores, y cuya localización geográfica se muestra en la *Figura 29*.

A partir de dicho sitio, el cauce tiene una longitud de aproximadamente 1 km hasta unirse a la barranca de Chalchihuapan, dentro de cuyo intervalo va aumentando su caudal al incorporarse una mayor cantidad de flujos de fondo, principalmente.

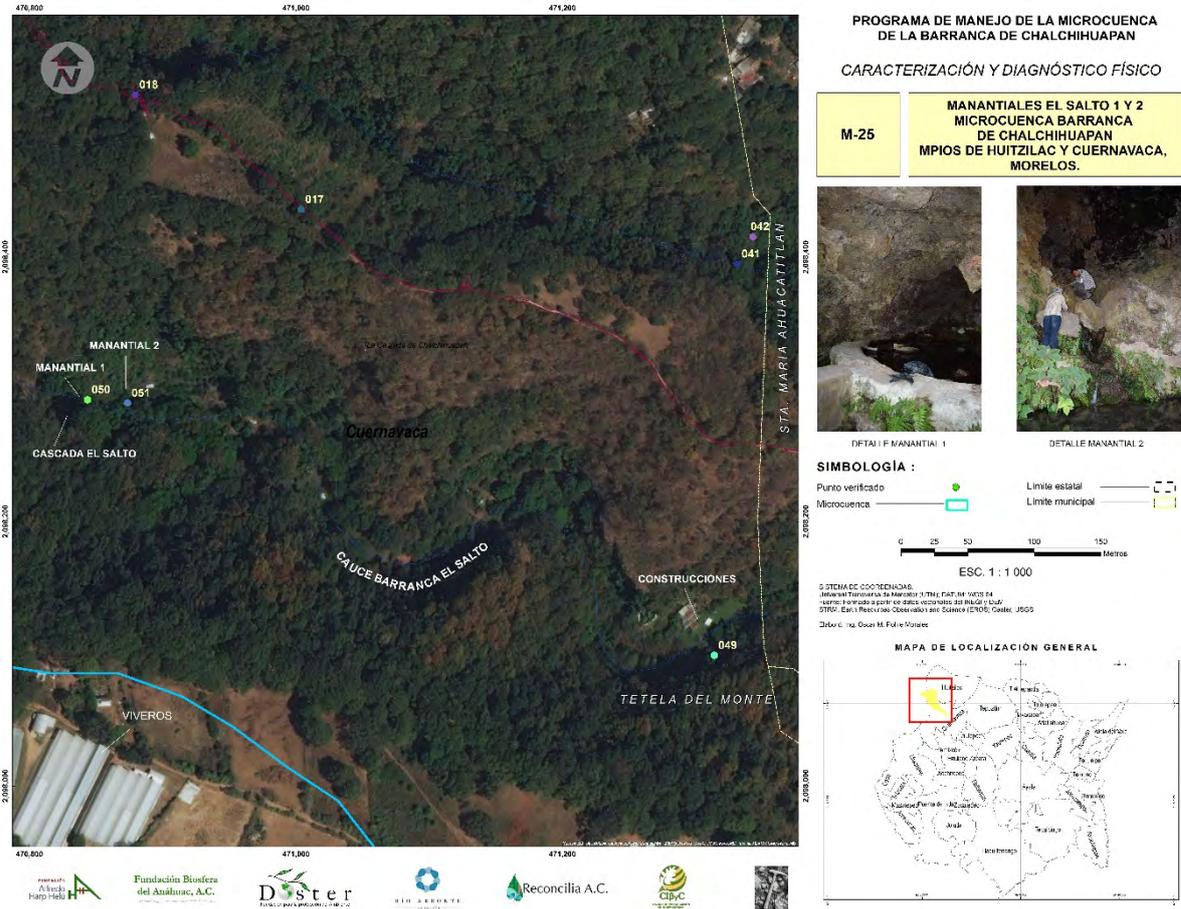


Figura 29. Localización de los manantiales 1 y 2, barranca El Salto.

No obstante que el caudal total aforado se estimó en 16.8 l.p.s., esta corriente perenne se ve drásticamente disminuida por 28 tomas, que según registros del año 2011, abastecen a 121 usuarios, que corresponde con la concesión otorgada a los viveristas por la CONAGUA, de 640, 840 m³ anuales (CONAGUA, 2010), que equivalen a 20.32 l.p.s. Está claro que, considerando únicamente el caudal de la barranca El Salto, éste es insuficiente para proporcionarlo durante el estiaje, ya que representa el 82.7% del volumen concesionado. Por lo anterior, la barranca de Chalchihuapan debe aportar los 3.5 l.p.s. faltantes (17.3%); quedando teóricamente un caudal ecológico de 20.48 l.p.s.

Con respecto al manejo del recurso para los fines antes descritos, se puede considerar como súmamente ineficiente, ya que la infraestructura que existe para dicha dotación consiste en una densa red de mangueras de PVC que se van bifurcando durante todo el trayecto hasta los depósitos de cada usuario registrado. Esto trae como consecuencia una red caótica de distribución, que presenta numerosas fugas; y amén de esto, ofrece una deplorable impresión visual que arruina completamente el hermoso paisaje riveroño, frenando totalmente su desarrollo potencial para uso recreativo y ecoturístico (*Foto 26*).

Por otra parte, al inicio de esta barranca, existen algunos asentamientos sobre la margen izquierda del cauce, así como un establecimiento acuícola con restaurante que capta prácticamente todo el caudal para el desarrollo de sus actividades.

Finalmente, existen evidencias de un incipiente intento para su aprovechamiento ecoturístico por medio de una infraestructura básica, consistente en cabañas rústicas, servicios sanitarios y área de esparcimiento, que actualmente se encuentran abandonados (*Foto 27*).



Foto 26. Vista del deplorable paisaje que se ofrece al visitante a lo largo de esta hermosa barranca.



Foto 27. Instalación rústica abandonada, presuntamente destinada para servicios ecoturísticos.

A partir de la convergencia de las barrancas de El Salto y Chalchihuapan, no se advierten manantiales superficiales importantes sobre el cauce hasta el punto de descarga de la microcuenca, que se ubica en la confluencia con la barranca de San Pedro; lo cual no descarta la existencia de surgencias de fondo a lo largo del mismo y aportaciones de corrientes tributarias, como en el caso del escurrimiento perenne que se origina en el manantial Tepehuajes (*Foto 28*), que se encuentra a 70 metros por arriba del cauce de Chalchihuapan y que descarga al mismo por su margen izquierda (*Foto 29*).



Foto 28. Manantial Tepehuajes, Santa María Ahuacatlán.

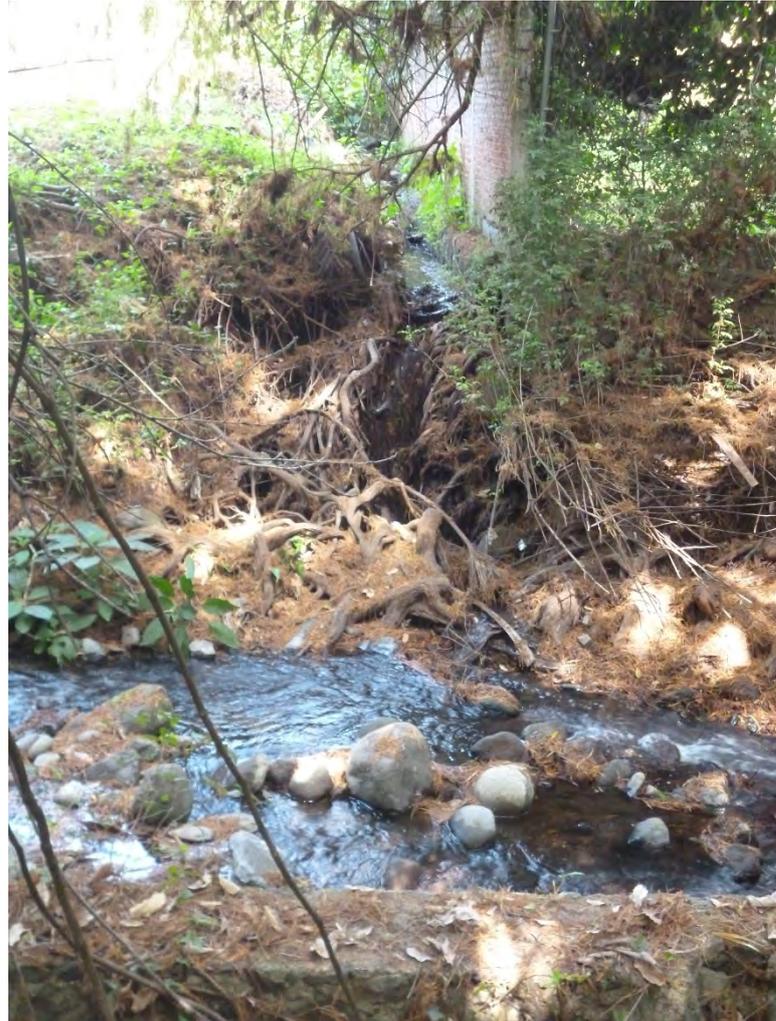


Foto 29. Cauce del arroyo Tepehuajes, afluente de la barranca Chalchihuapan.

Una vez que la barranca de Chalchihuapan se interna dentro de la mancha urbana, se van integrando gradualmente descargas de aguas residuales domiciliarias y más adelante municipales, las cuales van aumentando su caudal cada vez más contaminado.

De los recorridos de campo efectuados en el tramo señalado, se identificaron 24 descargas de diversos diámetros, cuya localización se muestra en la *Figura 26* y se relacionan a continuación en la *Tabla 28*.

Tabla 28. Descargas identificadas dentro del cauce de la barranca Chalchihuapan.

RELACIÓN DE DESCARGAS IDENTIFICADAS EN EL CAUCE DE LA BARRANCA CHALCHIHUAPAN						
Id	Tipo	Material	Diam. (cm)	Gasto aprox. (lps)	Clave predial	Observaciones
1	Colector	Cemento	91.00	25.00	18815	Descarga principal Sta. María Pte. y Rancho Cortes, MD
2	Atarjea	Cemento	20.00	0.00	19231	Línea marginal MI, colapsada
3	Colector doble	PVC	20.00	2.00	22103	Descarga doble MD
4	Colector	PDA	60.00	8.00	23766	Descarga MI, Casa blanca
5	Atarjea	Cemento	20.00	2.00	30192, 30542, 30516, 30743, 30915, 31061, 31195, 31532	Línea marginal MI, condominios El Amate y Mirlos
6	Colector	Cemento	20.00	3.00	31929	Descarga MD, Calle Priv. Los Reyes
7	Colector	PDA corrugado	60.00	5.00	32325	Descarga MI, Calle Tabachines
8	Atarjea	PVC	6.00	1.00	32325	Descarga domiciliaria, MI
9	Colector	Cemento	30.00	5.00	34312, 34346	Descarga MD, Calles Jazmines, Tulipanes, Fresno y Nísperos
10	Colector doble	Cemento	30.00	8.00	35710	Descargas MD, Priv. de Atzingo
11	Atarjea	PVC	6.00	0.50	35538	Descarga domiciliaria, MI
12	Colector doble	Cemento	36.00	30.00	s/n	Descarga Los Reyes, MD, Puente/Lavado autos
13	Atarjea	PVC	10.00	1.00	28738, 30419, 30620	Descarga domiciliaria, MD
14	Surgencia	N.R.	0.00	2.00	27415	Descarga domiciliaria, MI
15	Escurrimiento	N.R.	0.00	3.00	26094	Descarga domiciliaria, MD
16	Tren septico	Rotoplas	200.00	0.00	S/N	Pretratam. fraccionamiento, MD
17	Atarjea	PVC	20.00	3.00	17272	Descarga condominio, MD
18	Colector	Cemento	60.00	10.00	17114	Descarga Rancho Cortes, MI, Baldío
19	Colector marginal	Acero (encofrado)	60.00	5.00	16851	Descarga calle Pino, MD. Fracc. Calle Pino (túnel)
20	Atarjea	PVC	20.00	2.00	s/n	Descarga calle Pino, MI, puente peatonal calle Pino
21	Colector	Cemento	30.00	5.00	12470	Descarga Priv. Pino, MI
22	Cauce	Cauce	0.00	8.00	s/n	Descarga Asen. Irreg. MI
23	Colector	Cemento	60.00	20.00	10020	Descarga Sta. María, Puente Xala, Barranca San Pedro
24	Registro	Cauce	S.D.	S.D.	s/n	Descarga Hotel Aristos, Barranca Tepehuajes
SUMA:				149		

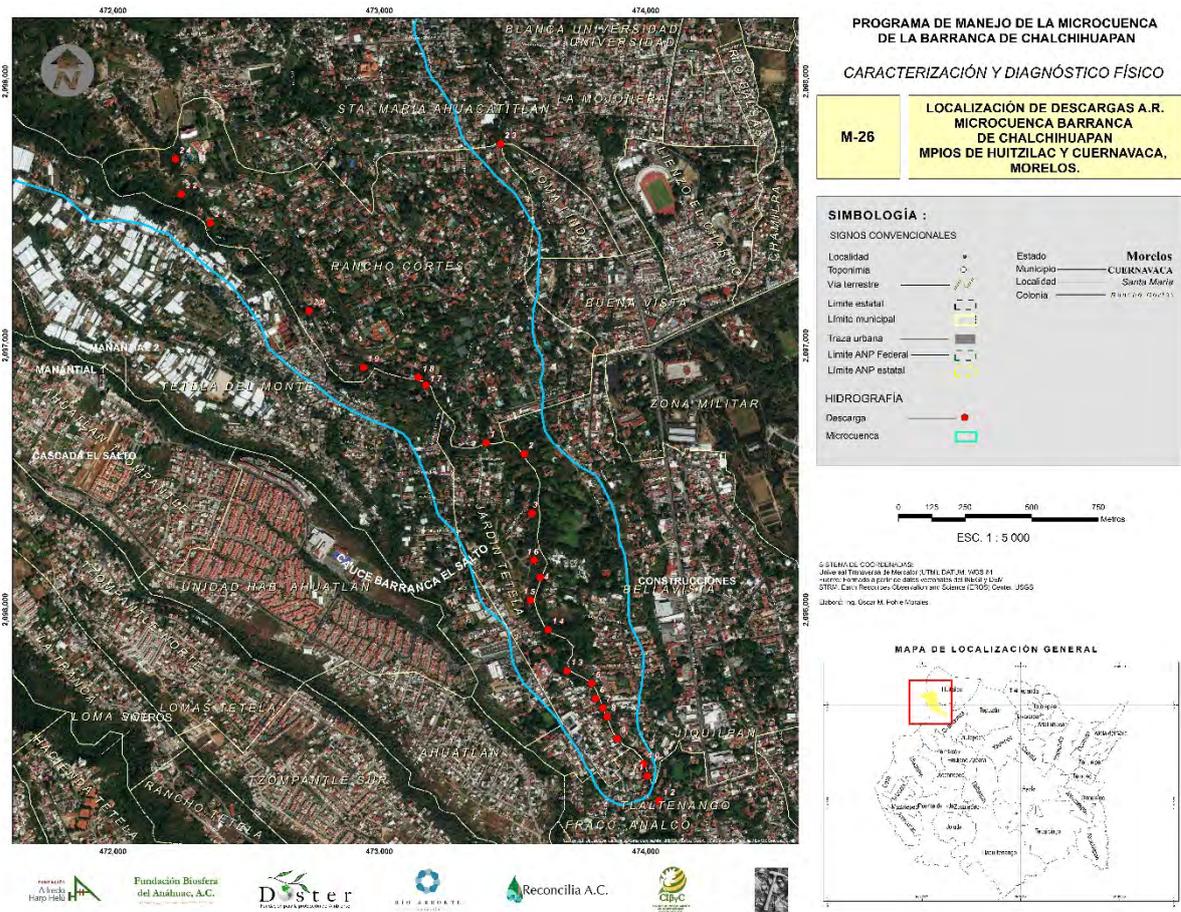


Figura 30. Localización de descargas de aguas residuales.

De la tabla anterior, se tiene que el caudal de aguas residuales vertido a la barranca de Chalchihuapan en el área del estudio es de aproximadamente 129 l.p.s. (sin considerar la descarga de Santa María Ahuacatitlán en el puente Xala, que se encuentra fuera de la microcuenca).

7.1.2. Agua subterránea

En concordancia con la información del Registro Público de Derechos de Agua, divulgado por la CONAGUA en su Sistema de Información del Agua (SIGA), se tiene que dentro de la microcuenca existen siete pozos profundos, de los cuales, dos son operados por el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Cuernavaca y el resto son concesiones particulares, según se muestra en la *Tabla 29*.

La ubicación de las fuentes de aprovechamiento subterráneo se muestra en la *Figura 27*. De la misma figura destaca la distribución de las obras de alumbramiento, que prevalece en la parte alta de la zona urbana (colonia Rancho Cortés y Santa María Ahuacatlán) para facilitar la distribución del agua por gravedad, a pesar de los exiguos gastos obtenidos; siendo la excepción, el pozo Rancho Cortés II operado por el SAPAC, cuyo aforo registra 22.34 l.p.s. (SAPAC, 2008).

Tabla 29

REGISTRO DE POZOS PROFUNDOS UBICADOS DENTRO DE LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN											
No.	Pozo	Registro REPDA	Coordenadas UTM		Uso	Titular	Gasto (l.p.s.)	Operación (horas)	Volumen (m3)		
			x	y					Diario	Anual	
1	Rancho Cortés I	A5MOR101523/18HMG96	472513.13	2097559.12	Particular	Promotora Cortés-Trapiche, S.C.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
2	Santa María	04MOR101520/18IMG04	472426.23	2098112.49	Diversos	Mirage Internacional de San Felipe, S.A. de C.V.	2.00	N.D.	172.8	63,072	
3	Hotel Aristos	04MOR104380/18EMDA09	472381.9	2097799.05	Servicios	Inmobiliaria Abandanes, S.A. de C.V.	1.37	N.D.	118.368	43,330.47	
4	Rancho Cortés Barranca	04MOR102768/18HSDA13	472308.44	2097559.42	Público-urbano	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Cuernavaca	4.16	24	359.42	131,190	
5	Rancho Cortés II	04MOR102768/18HSDA13	472630.14	2097589.68	Público-urbano	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Cuernavaca	22.34	24	1,930.18	704,514	
6	Bellavista I	A5MOR100636/18CMGE94	473851.42	2096346.28	Particular	Ma. Teresa Trouyet Hauss	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
7	Bellavista II	04MOR101619/18CMOC08	473943.53	2096266.27	Doméstico	Beatriz Alemán Velasco y Copropietarios	2.55	N.D.	220.32	80,518	

Fuente: Consulta de datos REPDA, actualizados a marzo de 2017 y registro de pozos SAPAC, 2008.

De la tabla anterior, se tiene que el gasto proporcionado por los pozos operados por el SAPAC sería suficiente para el consumo doméstico diario de 7, 632 habitantes (300 l/hab/día); y el gasto concesionado a particulares cubriría las necesidades diarias de 1, 705 habitantes, bajo las mismas condiciones de consumo. Esto sin considerar las dos concesiones de las cuales no se proporcionan datos.

En conjunto, se estima que el volumen anual de agua subterránea explotada a través de pozos profundos se aproxima a 1.1 hm³, el cual forma parte del volumen concesionado en el REPDA 2017.

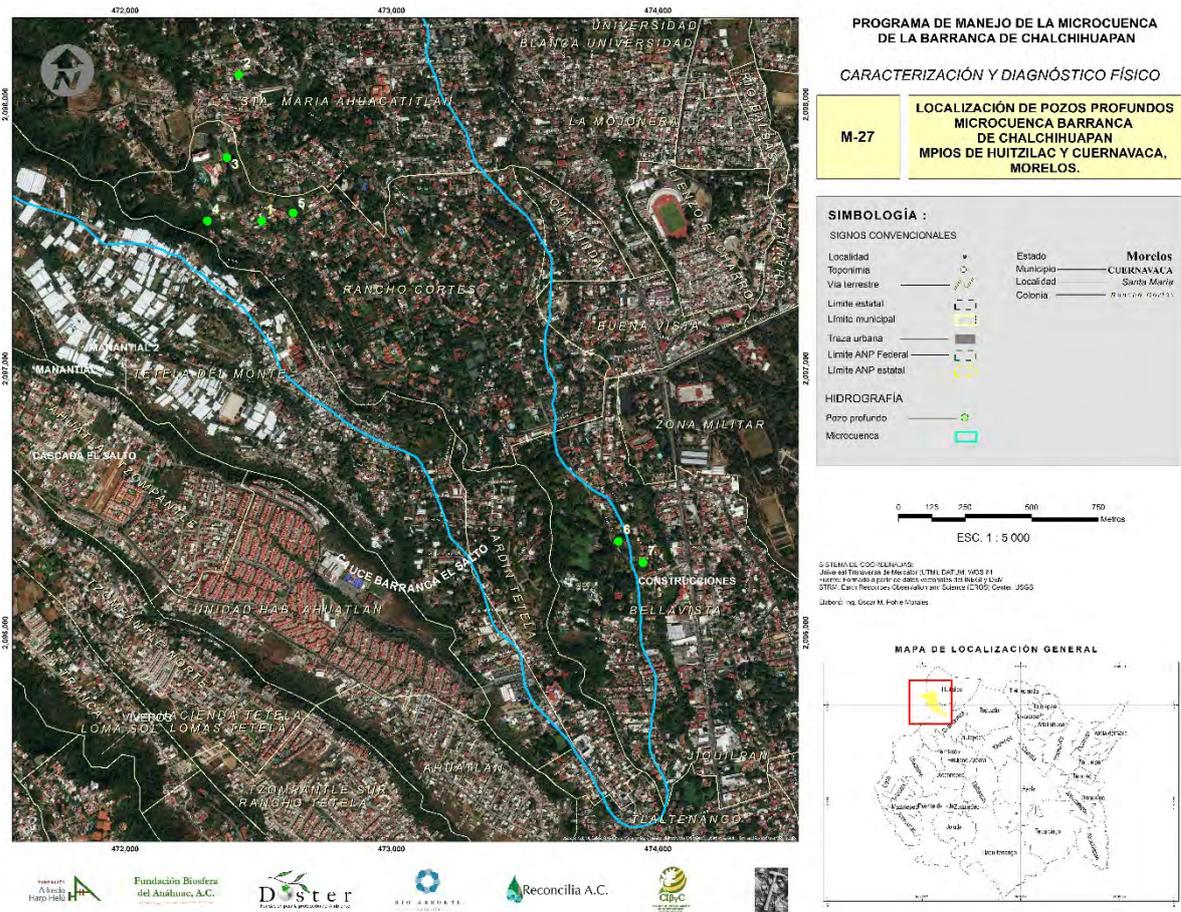


Figura 31. Localización de pozos de agua potable en la microcuenca.

7.1.3. Consumo y dotación de agua potable

Para determinar los volúmenes de consumo y dotación de agua potable dentro de la zona del estudio, según la metodología establecida por la CONAGUA, se determinaron tres estratos socio-económicos, tomando en consideración el promedio de la superficie de construcción de los predios y la colonia donde estos se encuentran ubicados. Partiendo de dichos datos, se calificaron como predios populares los que se encuentran localizados en colonias del mismo tipo y cuya construcción no excede los 150 m²; de estrato medio, los que tienen una superficie mayor a 150 y menor a 401 m², situados en colonias consideradas como medias; y estrato alto o residencial, las construcciones que exceden los 400 m² y que se encuentran en fraccionamientos y condominios de lujo o pertenecen a grandes propiedades (Tabla 30).

Comparando el número total de predios catastrales con los de cada estrato socioeconómico, se obtiene un porcentaje ponderado de su población, el cual se aplicó en la proyección demográfica de la microcuenca (*Tabla 31*) de acuerdo con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento determinado por la CONAGUA (*Tabla 32*), considerando el clima semicálido, para efectos del presente trabajo

Tabla 30

ESTADÍSTICA DE ESTRATOS SOCIOECONÓMICOS SEGÚN SUP. DE CONSTRUCCIÓN Y COSTO DEL TERRENO					
COLONIA	No. Predios	Estrato S.E. asignado	% Población	Promedio área construida (m ²)	Suma área construida (m ²)
BELLAVISTA	248	Residencial	10.7%	2003.68	496,912.12
BUENA VISTA	8	Popular	0.3%	85.64	685.11
JARDIN TETELA	302	Medio	13.1%	196.04	59,204.18
LOMA LINDA	6	Residencial	0.3%	665.98	3,995.85
NO REGISTRADA	9	Popular	0.4%	39.11	352.01
RANCHO CORTES	772	Residencial	33.4%	301.10	232,451.94
STA. MARIA AHUACATITLAN	686	Medio	29.7%	318.32	218,367.24
TETELA DEL MONTE	262	Medio	11.3%	359.15	94,097.23
TLALTENANGO	18	Medio	0.8%	393.99	7,091.86
SUMA:	2,311		100%	4,363	1,113,158

Tabla 31. Porcentaje de población por estrato socio-económico, consumo y dotación de agua potable estimados para la microcuenca.

PORCENTAJE DE POBLACIÓN, CONSUMO Y DOTACIÓN POR ESTRATO SOCIOECONÓMICO EN 2017 Y 2035							
Estrato socioeconómico	%	Población		Consumo doméstico (l/día)		Dotación (l/día)	
		2017	2035	2017	2035	2017	2035
Popular	0.7356%	77	92	9,997.12	11,895.37	12,996.25	15,463.98
Medio	54.87%	5,736	6,825	1,175,860.13	1,399,131.83	1,528,618.17	1,818,871.38
Residencial	44.40%	4,641	5,522	1,392,358.81	1,656,739.16	1,810,066.45	2,153,760.91
Suma:	100.00%	10,454	12,439	2,580,233.05	3,069,801.36	3,353,697.87	3,990,131.26

Tabla 32. Consumo doméstico per-cápita por estrato socio-económico y tipo de clima.

CONSUMO DOMÉSTICO PERCÁPITA POR ESTRATO SOCIOECONÓMICO (l/hab/día)			
Clima	Popular	Medio	Residencial
Cálido (> 22 °C)	185	230	400
Semicálido (entre 18° y 22° C)	130	205	300
Templado (< a 18° C)	100	195	250

Fuente: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, CONAGUA.

De la Tabla 32, se tiene que el volumen requerido para la dotación diaria de agua potable en el año 2017 se calcula en 39 l.p.s.; y para 2035, de 46 l.p.s. Cabe señalar que el volumen de la dotación de agua potable se determina teniendo en cuenta las pérdidas por fugas en la red, que en este caso se considera de un 30%, por ser de construcción relativamente reciente.

7.1.4. Disponibilidad del recurso hídrico

De los datos referidos en los apartados antecedentes, se tiene que existe una disponibilidad de agua superficial de al menos 35.24 l.p.s. derivados del canal El Tepeite; así como la correspondiente a los pozos administrados por el SAPAC, que en conjunto aportan 26.5 l.p.s. Por lo tanto, la suma de dichos caudales, que es de 61.74 l.p.s., excede en un 59% y 34% los requerimientos de dotación calculados para el año 2017 y 2035, respectivamente.

En relación con el caudal ecológico y de acuerdo con los datos anteriores, existe la posibilidad de utilizar la totalidad o parte del remanente para dicho fin, considerando como ejes de acción:

- 1) Eficientar la dotación y distribución del agua.
- 2) Reducir las fugas en el sistema y evitar el desperdicio de agua domiciliaria.
- 3) Reutilizar el agua residual para riego de jardines y viveros.
- 4) Implementar el uso obligatorio de sistemas de tratamiento, principalmente en zonas residenciales.
- 5) Regular efectivamente las descargas de agua residual en la barranca y eliminar las tomas clandestinas.

7.1.5. Generación de aguas residuales

Para la determinación de los gastos medios de agua residual generados dentro de la microcuenca, se consideró que dicho volumen corresponde al 75% del consumo doméstico definido para cada estrato socio-económico y su proyección demográfica, según se muestra a continuación en la *Tabla 33*.

Tabla 33. Proyecciones de los gastos medios de agua residual generados por estrato socio-económico.

CÁLCULO DE GASTOS MEDIOS DE AGUA RESIDUAL GENERADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO								
AÑO	Población por estrato económico				Gasto medio Q (l.p.s.)			
	Popular	Media	Residencial	TOTAL	Popular	Media	Residencial	Total
2010	72	5361	4338	9,771	0.11	12.72	15.06	27.89
2011	73	5413	4380	9,866	0.11	12.84	15.21	28.16
2012	73	5465	4422	9,961	0.11	12.97	15.35	28.43
2013	74	5518	4465	10,057	0.11	13.09	15.50	28.71
2014	75	5572	4508	10,155	0.11	13.22	15.65	28.99
2015	75	5626	4552	10,254	0.11	13.35	15.81	29.27
2016	76	5681	4597	10,354	0.11	13.48	15.96	29.56
2017	77	5736	4641	10,454	0.12	13.61	16.11	29.84
2018	78	5791	4686	10,555	0.12	13.74	16.27	30.13
2019	78	5847	4731	10,657	0.12	13.87	16.43	30.42
2020	79	5904	4777	10,761	0.12	14.01	16.59	30.71
2021	80	5962	4824	10,866	0.12	14.15	16.75	31.02
2022	81	6020	4871	10,972	0.12	14.28	16.91	31.32
2023	81	6078	4918	11,078	0.12	14.42	17.08	31.62
2024	82	6137	4966	11,185	0.12	14.56	17.24	31.93
2025	83	6196	5014	11,293	0.12	14.70	17.41	32.24
2026	84	6256	5062	11,402	0.13	14.84	17.58	32.55
2027	85	6317	5111	11,513	0.13	14.99	17.75	32.86
2028	86	6378	5161	11,625	0.13	15.13	17.92	33.18
2029	86	6440	5211	11,738	0.13	15.28	18.09	33.50
2030	87	6503	5262	11,852	0.13	15.43	18.27	33.83
2031	88	6566	5313	11,967	0.13	15.58	18.45	34.16
2032	89	6630	5365	12,084	0.13	15.73	18.63	34.49
2033	90	6695	5417	12,202	0.14	15.89	18.81	34.83
2034	91	6759	5470	12,320	0.14	16.04	18.99	35.17
2035	92	6825	5522	12,439	0.14	16.19	19.17	35.51

Por otra parte, si se comparan los gastos calculados de la tabla antecedente con la *Tabla 25*, que corresponde con el levantamiento de descargas observadas en campo, se advierte una diferencia de 119 l.p.s., de los cuales deben restarse las descargas de Santa María en la

barranca de San Pedro (Puente Xala) y el colector doble que se encuentra bajo el puente de Tlaltenango (Calzada de Los Reyes), lo que da como resultado un caudal de 69 l.p.s. más de lo estimado. Lo anterior puede explicarse debido a los siguientes factores:

- 1) Al carecer de un sistema de captación pluvial, las precipitaciones son captadas por el sistema de colectores.
- 2) Importación de aguas residuales de otras microcuencas
- 3) Captación de fugas de agua potable en el sistema de saneamiento

En todo caso, es necesario contar con información actualizada del SAPAC sobre el particular, ya que la caracterización detallada del sistema de alcantarillado es de su competencia y se llevó a cabo sin su participación, en la medida de lo posible. En la *Figura 28*, se muestra la red de atarjeas y colectores localizada dentro de la zona del estudio y áreas adyacentes, según información obtenida durante recorridos de campo y datos proporcionados por la CEAGUA (2015).

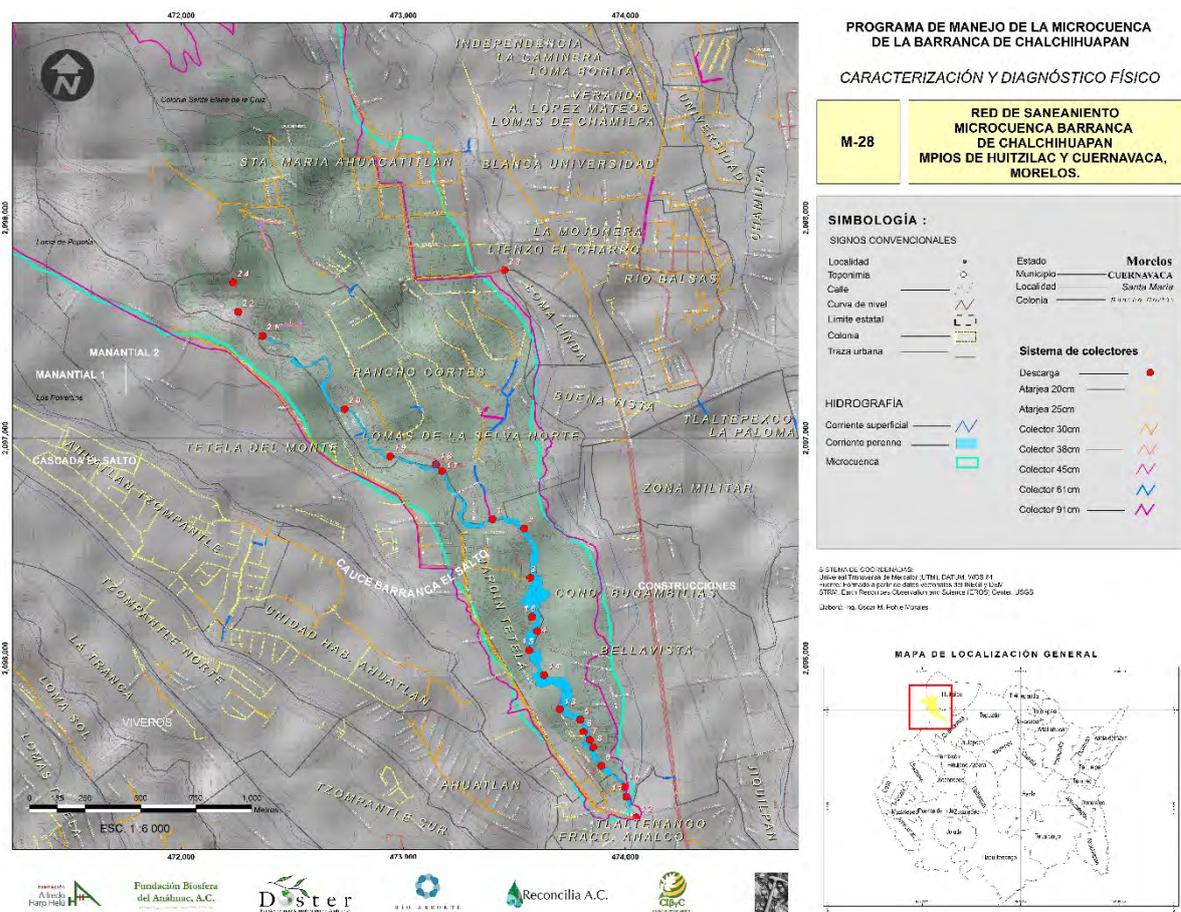


Figura 32. Red de captación de aguas residuales.

De acuerdo con la CEAGUA, la longitud total de la tubería de alcantarillado sanitario dentro de la microcuenca es de 18.4 km, considerando las atarjeas y colectores existentes en sus diferentes diámetros, lo cual se estima que sólo representa el 42% de la cobertura necesaria en el área de estudio.

7.2. Generación de residuos sólidos urbanos

Uno de los problemas que impactan visiblemente a la microcuenca dentro del área urbana, es la disposición inadecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU); principalmente dentro de su cauce y laderas que lo limitan, reflejando una actitud indiferente de una parte importante de la población que le rodea.

Como parte fundamental para buscar la solución a dicha problemática, es necesario cuantificar el volumen de RSU per-cápita que produce cada uno de sus habitantes, los cuales presentan variaciones en función del estrato socio-económico al que pertenecen. La generación per-cápita de RSU se evalúa en kilogramos por habitante por día (kg/hab/día) y auxilia para conocer la cantidad de residuos que produce cierta ciudad, colonia o área de la localidad en cuestión; siendo un parámetro trascendente para el correcto diseño o evaluación del manejo, tratamiento y disposición final de dichos residuos.

7.2.1. Generación per-cápita en la microcuenca

Dado que no existen estudios sobre generación de residuos sólidos específicos en la microcuenca, se tomó como base el estudio realizado para el municipio de Cuernavaca durante el año 2002, diseñado y ejecutado por la entonces Dirección de Estudios y Proyectos Ambientales del Ayuntamiento de Cuernavaca (DEPA, 2000 – 2003).

En el estudio de referencia, se obtuvo una generación media total per-cápita de residuos sólidos domiciliarios (RSD) igual a 0.667 kg/hab/día, lo cual representa entre el 40 y el 60% de la generación total de residuos sólidos urbanos (RSU), éstos últimos constituidos por fuentes de tipo municipal, tales como: comercios, escuelas, oficinas, mercados, hospitales y clínicas, hoteles, aeropuertos, centrales camioneras, etc.

Tomando en consideración lo anterior, para determinar la cantidad total de RSU se consideró el 60% adicional a la suma de los RSD cuantificados para cada estrato, tal como fue establecido en las proyecciones de población estimadas en la *Tabla 33*, dando como resultado los valores proyectados que se muestran a continuación en la *Tabla 35*.

Tabla 34. Cuantificación de generación de residuos sólidos urbanos en la microcuenca.

Generación de RSD (kg/hab/día) por estrato socio-económico					
AÑO	Popular	Medio	Residencial	Suma	Total RSU (otras fuentes)
	0.5765	0.787	0.688		
2010	41.51	4,219.11	2,984.54	7,245.16	11,592.25
2011	42.08	4,260.03	3,013.44	7,315.56	11,704.89
2012	42.08	4,300.96	3,042.34	7,385.38	11,816.60
2013	42.66	4,342.67	3,071.92	7,457.25	11,931.60
2014	43.24	4,385.16	3,101.50	7,529.91	12,047.85
2015	43.24	4,427.66	3,131.78	7,602.68	12,164.28
2016	43.81	4,470.95	3,162.74	7,677.50	12,284.00
2017	44.39	4,514.23	3,193.01	7,751.63	12,402.61
2018	44.97	4,557.52	3,223.97	7,826.45	12,522.32
2019	44.97	4,601.59	3,254.93	7,901.48	12,642.37
2020	45.54	4,646.45	3,286.58	7,978.57	12,765.71
2021	46.12	4,692.09	3,318.91	8,057.13	12,891.40
2022	46.70	4,737.74	3,351.25	8,135.68	13,017.10
2023	46.70	4,783.39	3,383.58	8,213.67	13,141.87
2024	47.27	4,829.82	3,416.61	8,293.70	13,269.92
2025	47.85	4,876.25	3,449.63	8,373.73	13,397.97
2026	48.43	4,923.47	3,482.66	8,454.55	13,527.29
2027	49.00	4,971.48	3,516.37	8,536.85	13,658.96
2028	49.58	5,019.49	3,550.77	8,619.83	13,791.73
2029	49.58	5,068.28	3,585.17	8,703.03	13,924.84
2030	50.16	5,117.86	3,620.26	8,788.27	14,061.24
2031	50.73	5,167.44	3,655.34	8,873.52	14,197.63
2032	51.31	5,217.81	3,691.12	8,960.24	14,336.38
2033	51.89	5,268.97	3,726.90	9,047.75	14,476.39
2034	52.46	5,319.33	3,763.36	9,135.15	14,616.25
2035	53.04	5,371.28	3,799.14	9,223.45	14,757.52

De la tabla anterior, se tiene que actualmente se generan aproximadamente 12.4 toneladas diarias de RSU dentro de la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.

7.2.3. Análisis de subproductos

Derivado del estudio de referencia (DEPA, 2000 – 2003), se obtuvieron los diferentes porcentajes en peso para cada subproducto, los cuales se aplicaron en la generación de RSU proyectada en el año 2017 (Tabla 35).

De los resultados obtenidos y agrupando los subproductos reciclables, resaltados con color verde, se tiene que el porcentaje de residuos revalorizables suman un total de 7.57 toneladas diarias, lo que representa una reducción del 61% de los RSU (Tabla 36)

Tabla 32. Estimación de subproductos generados diariamente en la microcuenca

Tabla 35.

GENERACIÓN DIARIA ESTIMADA DE SUBPRODUCTOS EN RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS			
Núm.	Subproducto	Media en peso	Kg/día
1	Algodón	0.047%	5.89
2	Cartón	3.352%	415.77
3	Cuero	1.066%	132.20
4	Residuo Fino	8.721%	1,081.62
5	Env. Carton Encerado	1.182%	146.61
6	Fibra dura vegetal	0.000%	0.00
7	Fibras Sintet.	0.083%	10.29
8	Hueso	0.685%	84.93
9	Hule	0.027%	3.29
10	Lata	1.087%	134.82
11	Loza y cerámica	1.337%	165.81
12	Madera	1.129%	140.05
13	Mat. de Construcción	1.048%	130.03
14	Metal Ferroso	1.476%	183.11
15	Metal no Ferroso Aluminio	0.729%	90.40
16	Papel	9.450%	1,171.99
17	Pañal Desechable	5.005%	620.81
18	Plástico Película	0.735%	91.11
19	PET	1.983%	245.95
20	PVC	0.230%	28.56
21	Polietil. Alta densidad	4.395%	545.06
22	Polietil. baja densidad	5.152%	638.98
23	Polipropileno	0.000%	0.00
24	Estireno	0.000%	0.00
25	Poliuretano	0.000%	0.00
26	Poliestireno expandido	0.638%	79.07

27	Residuos Alimenticios	25.516%	3,164.70
28	Residuos de Jardinería	11.137%	1,381.27
29	Trapo	3.342%	414.53
30	Vidrio de Color	1.286%	159.51
31	Vidrio Transparente	5.017%	622.20
32	Baterías eléctricas	0.226%	27.97
33	Env. Pintura, Solventes	0.267%	33.09
34	Res. Biol. Infecciosos	0.625%	77.54
35	Envases de Tetrapack	1.187%	147.21
36	Otros	1.841%	228.27
Total		100%	12,402.62

Tabla 36. Cantidad estimada de residuos valorizables en la microcuenca.

Subproductos de fácil separación y reciclado		
Subproducto	Kg/día	%
Papel y cartón	1,587.76	21%
Lata	134.82	2%
Metal ferroso	183.11	2%
Aluminio	90.40	1%
PET	245.95	3%
Residuos biodegradables	4,545.96	60%
Vidrio	781.70	10%
Suma	7,569.70	100%

VIII. ZONIFICACIÓN Y MANEJO DE LA MICROCUENCA

8.1. Criterios de zonificación

En este apartado se han considerado en primer término, los atributos físicos que caracterizan el territorio comprendido dentro de la subunidad hidrográfica Barranca de Chalchihuapan, definidos por su relieve, clima, hidrología, geología y recursos ambientales asociados; ya que de estos depende el uso y aprovechamiento territorial de su población; lo cual a su vez, repercute aguas abajo en el sistema hidrológico que integra el río Apatlaco, la subcuenca más contaminado del estado de Morelos.

Dentro de la diversidad de criterios que pueden existir para determinar el uso y aprovechamiento del territorio, se han tomado como base las características geomorfológicas,

hidrológicas y ambientales de la microcuenca, ya que éstas indican claramente el uso potencial del suelo. En este sentido, se tiene la zonificación que a continuación se describe.

8.1.1. Zonificación de peligros geológicos

El peligro geológico puede definirse como la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno geológico que produzca daños a personas, bienes, infraestructura o medio ambiente; y se encuentra asociado al movimiento de masas generado por la interacción de la gravedad, la erosión, condiciones geológicas y movimientos sísmicos.

Entre los principales parámetros que se han considerado para la zonificación de peligros geológicos (Figura 29), se tienen: la pendiente o ángulo de inclinación del terreno y sus características geológica; tales como: litología, estructura, meteorización, fracturamiento y nivel freático.

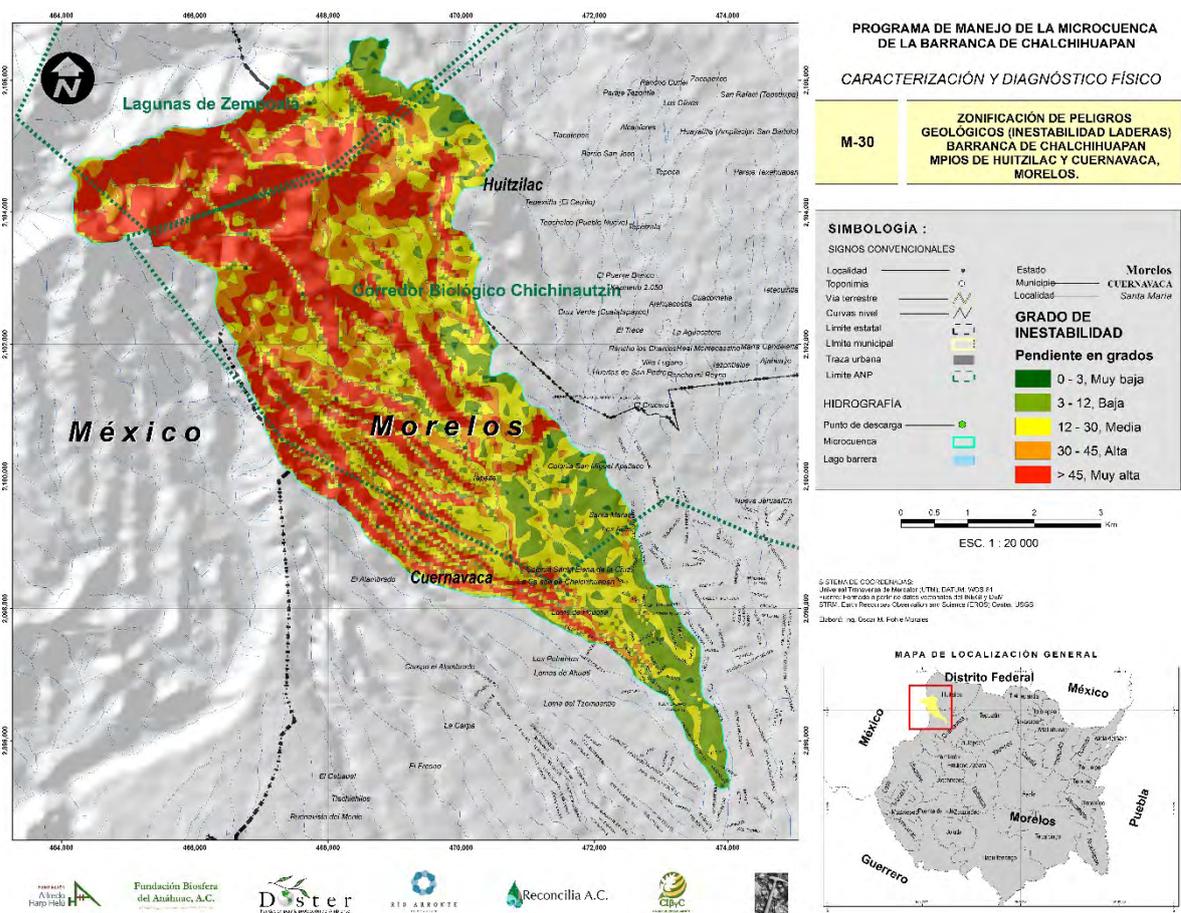


Figura 33. Mapa de zonificación de peligros geológicos en la microcuenca.

De la figura anterior, se distinguen cinco categorías de peligro geológico, según el grado de inestabilidad que se tiene en función de la pendiente y condición geológica del terreno, siendo éstas:

- 1) Inestabilidad muy baja o ausente (0 – 3 grados). Zonas planas a ligeramente inclinadas, localizadas principalmente en antiguos Lagos de barrera volcánica, constituidos por sedimentos lacustres recientes. No obstante, es pertinente considerar que los vasos mencionados son zonas sujetas a inundación, debido a la convergencia de drenaje endorreico que escurre durante la época de lluvias (*Foto 30*). También cabe señalar que, son áreas susceptibles a hundimientos diferenciales y amplificación de ondas sísmicas (efecto de sitio) por la presencia de arcillas; y consecuentemente, poco recomendables para la construcción de edificaciones.

Este relieve puede encontrarse así mismo, en planicies aluviales intermontanas y superficies cumbrales de borde redondeado, siendo las primeras propicias a inundarse; y en el segundo caso, dentro de campos de lava de superficie muy irregular (malpaís o pedregal, *Foto 31*) que pueden presentar grandes cavidades proclives a colapsar.



Foto 30. Sedimentos lacustres del antiguo Lago de barrera Atexcapa, Huitzilac, Mor.



Foto 31. “Hornito” en colada de lava. Brecha Tepeite, Huitzilac, Mor.

- 2) Inestabilidad baja (3 – 12 grados). Se encuentra presente en superficies cumbrales de borde redondeado y parte alta de lomeríos interfluviales tendidos (Glacis), cima de mesetas y domos volcánicos. Constituyen el relieve característico de la zona oriental de la microcuenca, formada principalmente por derrames de andesita basáltica y traquibasalto fluidal, limitados por bordes de laderas muy empinadas e inestables que delimitan frentes de lava y el contacto geológico entre las formaciones Chichináutzin y Cuernavaca - Facies Glacis de Buenavista -, cuya traza sigue el cauce de la barranca Chalchihuapan . Sobre dicha superficie se ha desarrollado la mayor parte de la zona urbana de la microcuenca, situada en el extremo sureste de la misma.

- 3) Inestabilidad media (12 – 30 grados). Son las superficies que ocupan el declive o zona de transición entre los lomeríos y superficies cumbrales de baja pendiente y las laderas de fuerte pendiente que modelan las profundas barrancas de la microcuenca. En dicha zona se pueden observar fenómenos asociados a movimiento de masas, tales como reptación (*Foto 32*) y falla de ladera.



Foto 32. Reptación de suelo. Nótese la inclinación de los árboles situados en la ladera. Margen derecha barranca de Chalchihuapan.

- 4) Inestabilidad alta (30 – 45 grados). Condición que se presenta en laderas de montaña, piedemontes, frentes de lava fracturados y laderas de valles encajados que forman las barrancas, entre otras. La probabilidad de ocurrencia de deslizamientos bajo este escenario, se incrementa notablemente por la ocurrencia de lluvias intensas que saturan el suelo, reduciendo la fricción en la interfase suelo-roca (*Foto 34*); o bien provocando un flujo de escombros (*Foto 35*).



Foto 33. Deslizamiento de suelo en ladera de barranca.

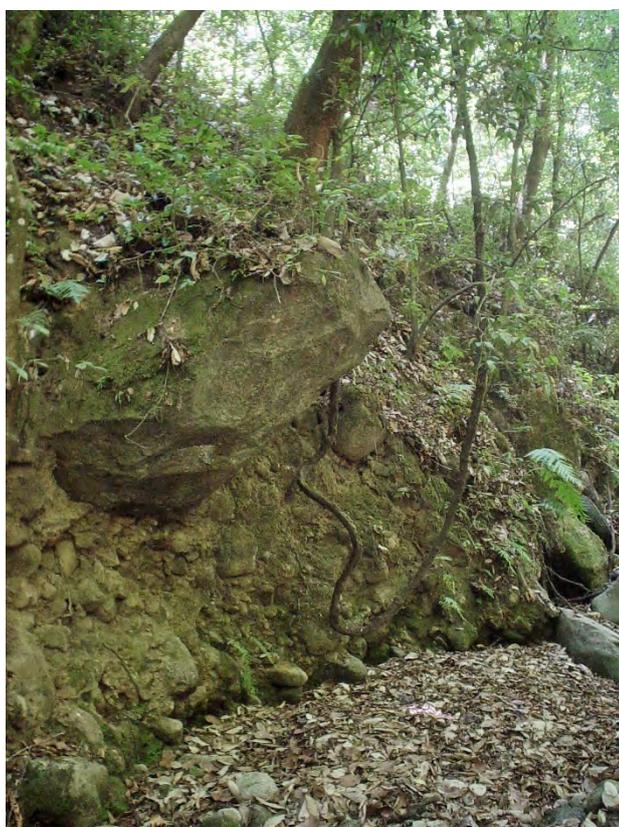


Foto 34. Depósito de flujo de escombros en cauce de barranca.

- 5) Inestabilidad muy alta (> 45 grados). Zonas donde se encuentran laderas montañosas empinadas, paredes de frentes de lava, valles encajados y escarpes de barrancas (*Foto 36*). Se consideran áreas muy susceptibles a deslizamientos y caídos, potenciados por la ocurrencia de lluvias intensas y sismos, o por vibraciones ocasionadas por explosivos y operación de maquinaria pesada.

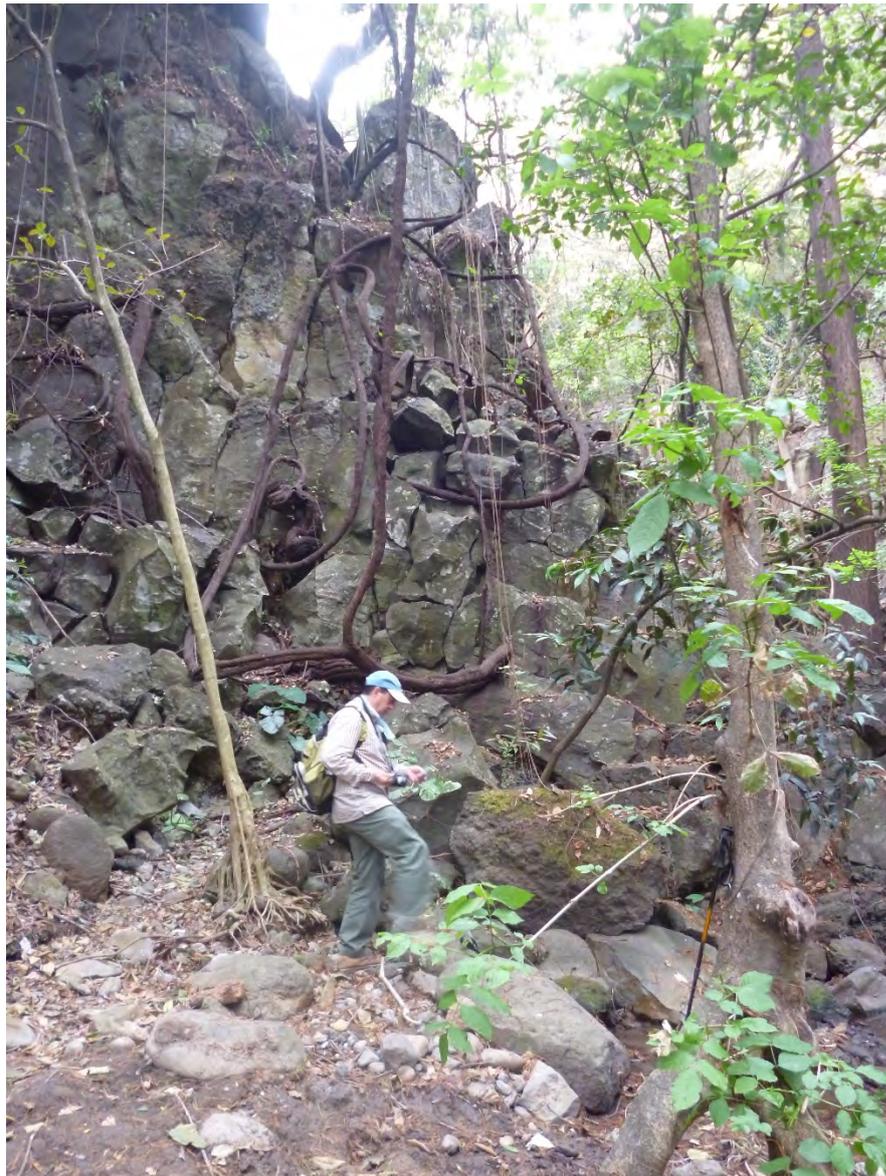


Foto 35. Escarpe inestable en ladera de barranca, por intenso fracturamiento en colada de andesita basáltica. Margen derecha barranca Chalchihuapan.

En resumen, pueden establecerse los criterios mostrados a continuación en la *Tabla 37*

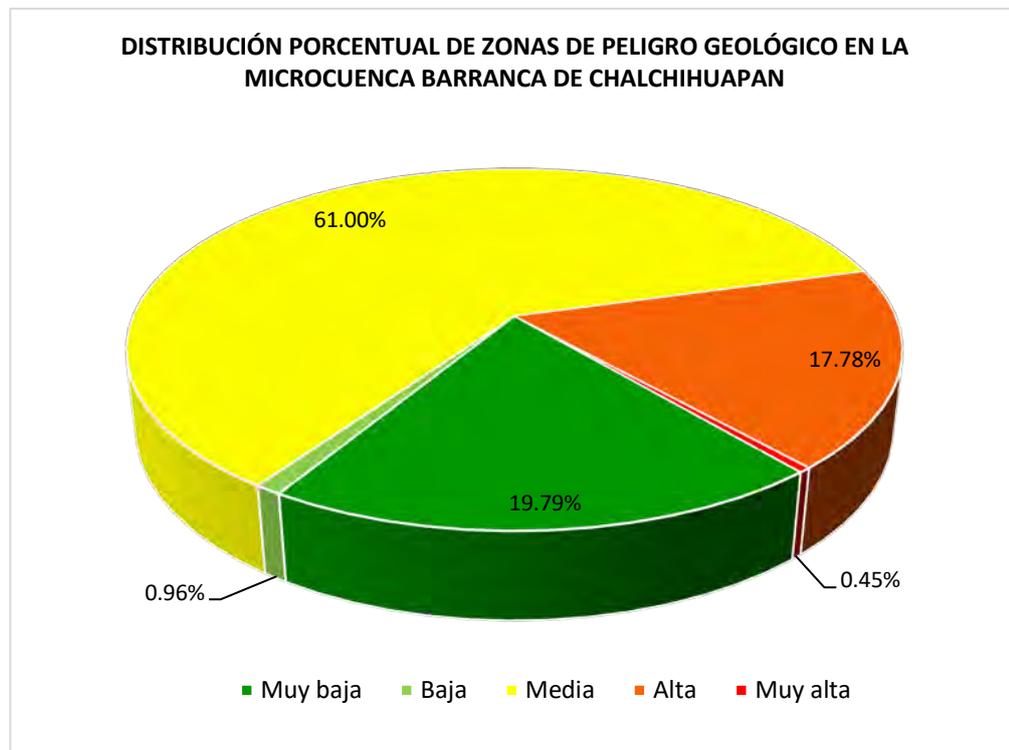
Tabla 37. Criterios generales para la zonificación de peligros geológicos en la microcuenca Barranca de Chalchihuapan.

Riesgo de inestabilidad de laderas	Característica	Recomendaciones
Muy bajo	Áreas estables, muy baja pendiente	Se debe considerar la presencia de zonas adyacentes con riesgo medio a muy alto. Apto para usos urbanos
Bajo	Zonas estables que requieren medidas correctivas menores. Se recomienda especial atención en terrenos con rellenos mal compactados.	Igual anterior.
Medio	Sectores que requieren obras de ingeniería, como: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, etc.	No se debe permitir la construcción de infraestructura sin la realización de estudios geotécnicos y de mejora para acondicionamiento del sitio. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
Alto	Evidencias de inestabilidad y alta probabilidad de deslizamiento por lluvias de alta intensidad	En caso de no poderse asegurar la estabilidad del terreno, debe destinarse como área de protección.
Muy alto a Extremadamente alto	Zonas muy inestables por existir fuertes pendientes y alta probabilidad de deslizamientos en caso de lluvias intensas, la ocurrencia de sismos o vibración ocasionada por explosivos y operación de maquinaria pesada.	Prohibido su uso para fines urbanos, sólo debe destinarse como área de protección

Finalmente, en la *Tabla 38* y su gráfica asociada (*Gráfica 26*), se presenta la distribución de cada categoría de peligro geológico, la superficie que abarca y su porcentaje correspondiente.

Tabla 38

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y PORCENTUAL DEL PELIGRO GEOLÓGICO EN LA MICROCUENCA			
Pendiente (grados)	Inestabilidad	Sup (ha)	% Territorio
0 -3	Muy baja	739.23	19.79%
3 - 12	Baja	36.02	0.96%
12 - 30	Media	2,278.28	61.00%
30 -45	Alta	664.16	17.78%
> 45	Muy alta	16.93	0.45%
Suma:		3,734.62	100.00%



Gráfica 26

8.1.2. Zonificación ambiental

A la fecha existen tres decretos de carácter federal y uno estatal (Figura 30), que incluyen en conjunto la mayor parte del área de la microcuenca (88%) dentro de un esquema de conservación y protección, siendo éstos:

- 1) Decreto mediante el cual se establece la creación de él Parque Nacional Lagunas de Zempoala; DOF, 05/04/1936.
- 2) Decreto que determina la instauración de la Zona Protectora Forestal de la Ciudad de Cuernavaca; DOF, 17/11/1937.
- 3) Decreto publicado en el Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del estado de México, él 8 de enero de 1980; el cual establece la creación de él Parque Ecológico, Turístico – Recreativo, Otomí – Mexica, Zempoala – La Bufa.
- 4) Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación, mediante el cual se determina el área de protección de la flora y fauna, denominado: Corredor Biológicos Chichináutzin.

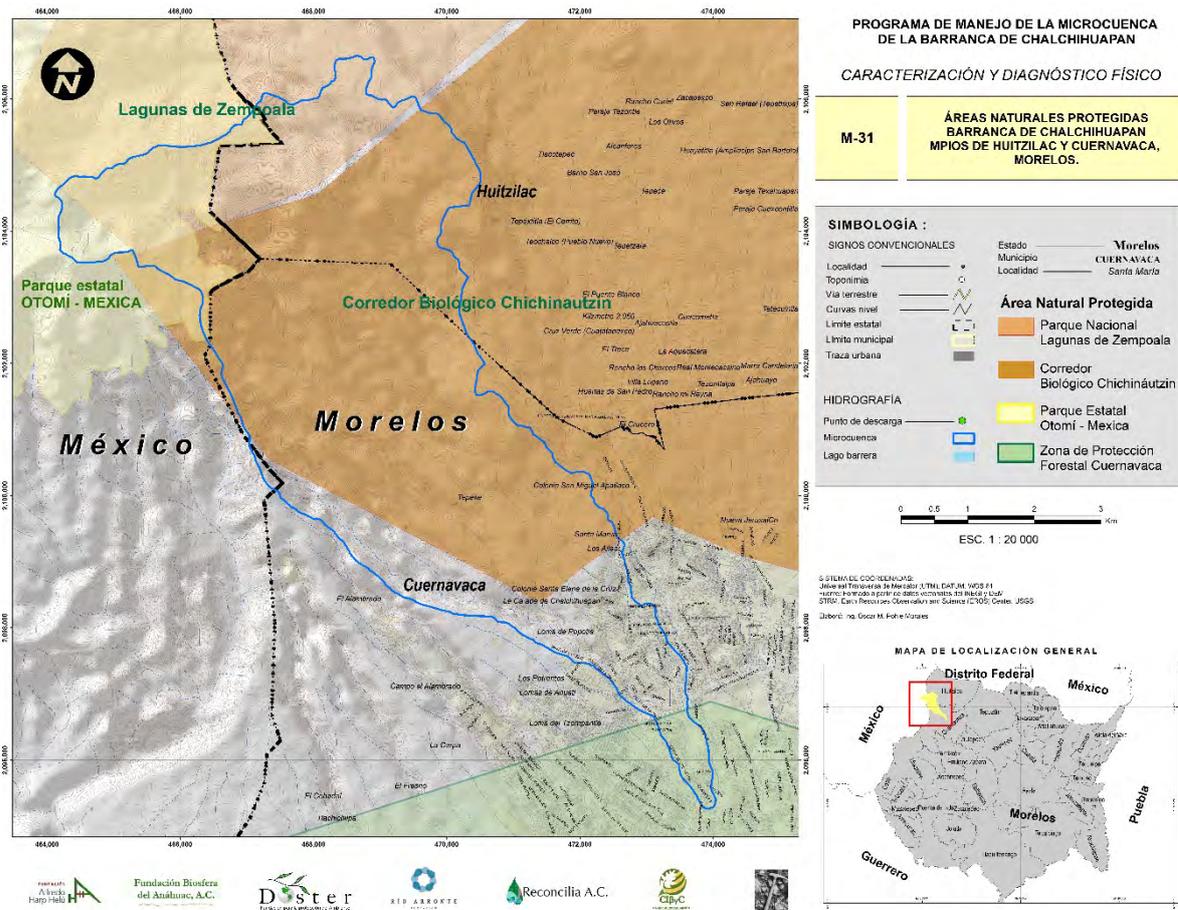


Figura 34. Áreas naturales protegidas que se encuentran dentro de la microcuenca.

Como puede observarse, el Corredor Biológico Chichináutzin, ocupa el mayor porcentaje de superficie de la microcuenca (60%); la cual, actualmente recibe una fuerte presión por los asentamientos irregulares que origina el crecimiento urbano de la zona norte de Cuernavaca, tomando como ejes principales para su expansión, la zona periurbana de Santa María Ahuacatlán, la Carretera Federal México – Cuernavaca y la Carretera Estatal Cuernavaca – Huitzilac.

Le sigue en extensión la porción sureste del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, con el 16%; cuya topografía agreste impide el emplazamiento de asentamientos humanos. Sin embargo, es una zona expuesta a la tala clandestina y desmontes con fines agrícolas por parte de comuneros de Huitzilac; y es también considerada de alto riesgo para actividades ecoturísticas, debido a la presencia de asaltantes provenientes de la misma población y localidades cercanas del estado de México. Esto último, ha inhibido drásticamente la afluencia turística que antaño solía visitar las hermosas lagunas y bellos parajes del Parque, repercutiendo en la economía de la región y consecuentemente, ha originado condiciones de pobreza en sus habitantes.

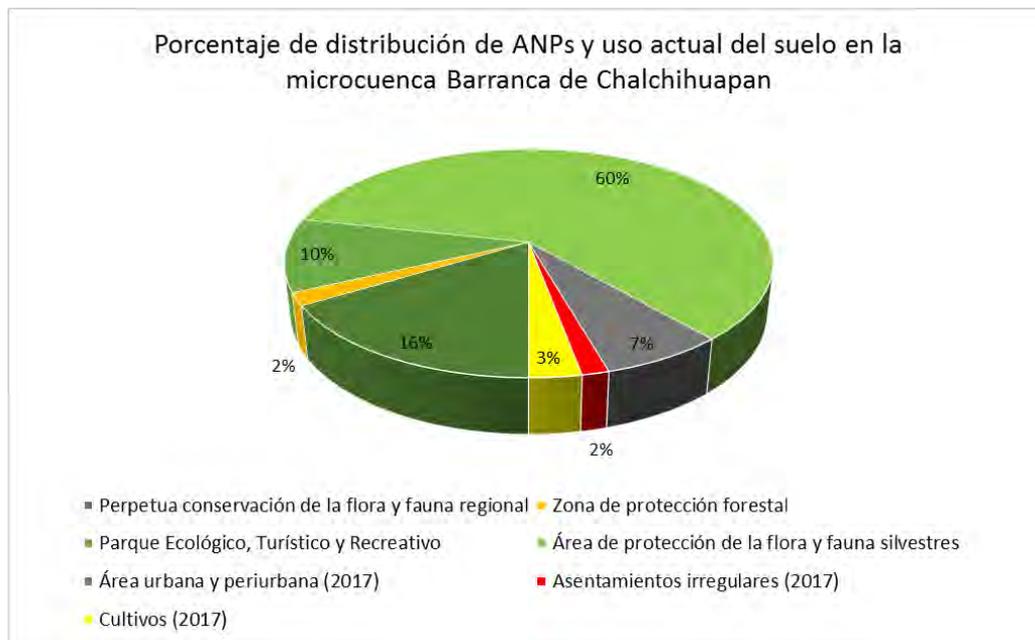
En el tercer sitio por su extensión (10%), se encuentra una pequeña parte del Parque Estatal Otomí - Mexica, el cual ocupa la parte más inaccesible de la microcuenca, formada por la cabecera hidrográfica de la microcuenca en estudio; y por lo tanto, se encuentra prácticamente libre de perturbación humana.

Finalmente, partiendo de la calle Francisco Villa, el extremo sur de la microcuenca se interna dentro de una pequeña parte del territorio delimitado como Zona de Protección Forestal de Cuernavaca, la cual ha sido asimilada a la zona urbana de la ciudad sin que se haya respetado en lo esencial el decreto que aún sigue vigente.

En la *Tabla 39* y *Gráfica 27*, se muestra la zonificación territorial descrita en los párrafos antecedentes.

Tabla 39. Resumen de la zonificación territorial de la microcuenca hidrográfica.

DISTRIBUCIÓN DE USO DEL SUELO CONSIDERANDO ANPs DECRETADAS Y USO ACTUAL (2017) EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN			
USO	ORDENAMIENTO	Sup (ha)	%
Perpetua conservación de la flora y fauna regional	Parque Nacional Lagunas de Zempoala, Decreto: DOF, 5/04/1936, modif. 19/05/1947	606.87	16%
Zona de protección forestal	Zona Protectora Forestal de la ciudad de Cuernavaca. Decreto: DOF, 17/11/1937	67.13	2%
Parque Ecológico, Turístico y Recreativo	Parque Ecológico, Turístico Recreativo Otomí - Mexica, Zempoala - La Bufo. Decreto: Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Edo.de México, 08/01/1980	386.54	10%
Área de protección de la flora y fauna silvestres	Corredor Biológico Chichináutzin, Decreto: DOF del 30/11/1988.	2,249.09	60%
Área urbana y periurbana (2017)		259.53	7%
Asentamientos irregulares (2017)		56.37	2%
Cultivos (2017)		108.65	3%
SUMA:		3,734.18	100%



Gráfica 27. Distribución territorial de ANPs y uso actual del suelo.

8.1.3. Ordenamientos ecológicos territoriales

Con base en la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Morelos, se define el ordenamiento ecológico como el instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos.

Mediante decreto publicado en el Periódico Oficial “Tierra y Libertad”, órgano del gobierno del estado libre y soberano de Morelos, con fecha 1 de mayo de 2009, fue promulgado el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Cuernavaca, el cual consideró entre sus objetivos:

- Caracterizar y analizar los patrones de ocupación del territorio
- Elaborar un diagnóstico temático de los diferentes elementos naturales, sociales y económicos que conforman la ocupación espacial del territorio y el aprovechamiento y conservación de los recursos naturales del municipio.
- Contribuir a la construcción de índices e indicadores para la evaluación de los efectos de las actividades sectoriales del municipio, bajo los lineamientos de aptitud de uso del suelo.
- Elaborar un modelo de ordenamiento ecológico del territorio para el municipio.

Aun cuando son muy discutibles los resultados obtenidos bajo los análisis multicriterio y multiobjetivo en la obtención de mapas de aptitud por sector (p ej. no se tiene en consideración la disponibilidad real del agua en la zona poniente, ni los efectos del cambio climático a mediano y largo plazo), se observa una mayor coincidencia sobre las unidades de gestión ambiental (UGA's) determinadas dentro de la microcuenca, mismas que contemplan cuatro políticas ambientales, siendo estas:

- a) Protección. Enfocada a la integración de áreas naturales susceptibles de integrarse al Sistema nacional de Áreas Protegidas (SINAP) o a sistemas equivalentes en los ámbitos estatal y municipal.
- b) Conservación. Dirigida a zonas o áreas naturales cuyos usos actuales o propuestos no interfieren con su función ecológica relevante y su inclusión en los sistemas de áreas naturales en el ámbito estatal y municipal es opcional.

- c) Restauración. Enfocada hacia las áreas que muestran un proceso de deterioro ambiental acelerado y en las cuales, es necesaria la realización de diversas actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.
- d) Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Asignada para las áreas que por sus características, son apropiadas para el uso y manejo de los recursos naturales, de manera que resulten eficientes, socialmente útiles y no impacten negativamente al medio ambiente.

De acuerdo con lo anterior, se establecieron una serie de lineamientos, usos y criterios para determinar un total de 199 UGA's, de las cuales, 21 se encuentran dentro del área de estudio (Tabla 40), cuya distribución espacial se muestra en la Figura 40.

Tabla 40. Zonificación y políticas de UGAs en la microcuenca.

UNIDADES DE GESTIÓN AMBIENTAL Y POLÍTICAS DE USO (POETMC) EN LA MICROCUENCA BARRANCA DE CHALCHIHUAPAN				
No.	Grupo	UGA	Sup. (ha)	Política
1	RBo	UGA 2	2,005.1300	Protección
2		UGA 3	3.1512	Protección
3		UGA 7	66.7839	Conservación
4		UGA 14	57.4243	Protección
5		UGA 15	208.7770	Protección
6		UGA 33	5.5862	Protección
7	RBop	UGA 1	333.0600	Protección
8		UGA 12	20.0471	Restauración
9		UGA 13	0.6145	Protección
10		UGA 37	18.2540	Restauración
11		UGA 53	0.0259	Restauración
12		UGA 54	7.9276	Restauración
13	SH	UGA 52	17.9009	Aprovechamiento
14		UGA 61	13.2861	Aprovechamiento
15	SHBop	UGA 21	38.6446	Aprovechamiento-Restauración
16	UB	UGA 45	8.7046	Conservación
17	UBp	UGA 59	34.2843	Protección
18	UH	UGA 17	203.6180	Aprovechamiento
19		UGA 60	2.6620	Aprovechamiento
20		UGA 71	21.0562	Aprovechamiento
21		UGA 77	27.3729	Aprovechamiento
SUMA:			3,094.3113	

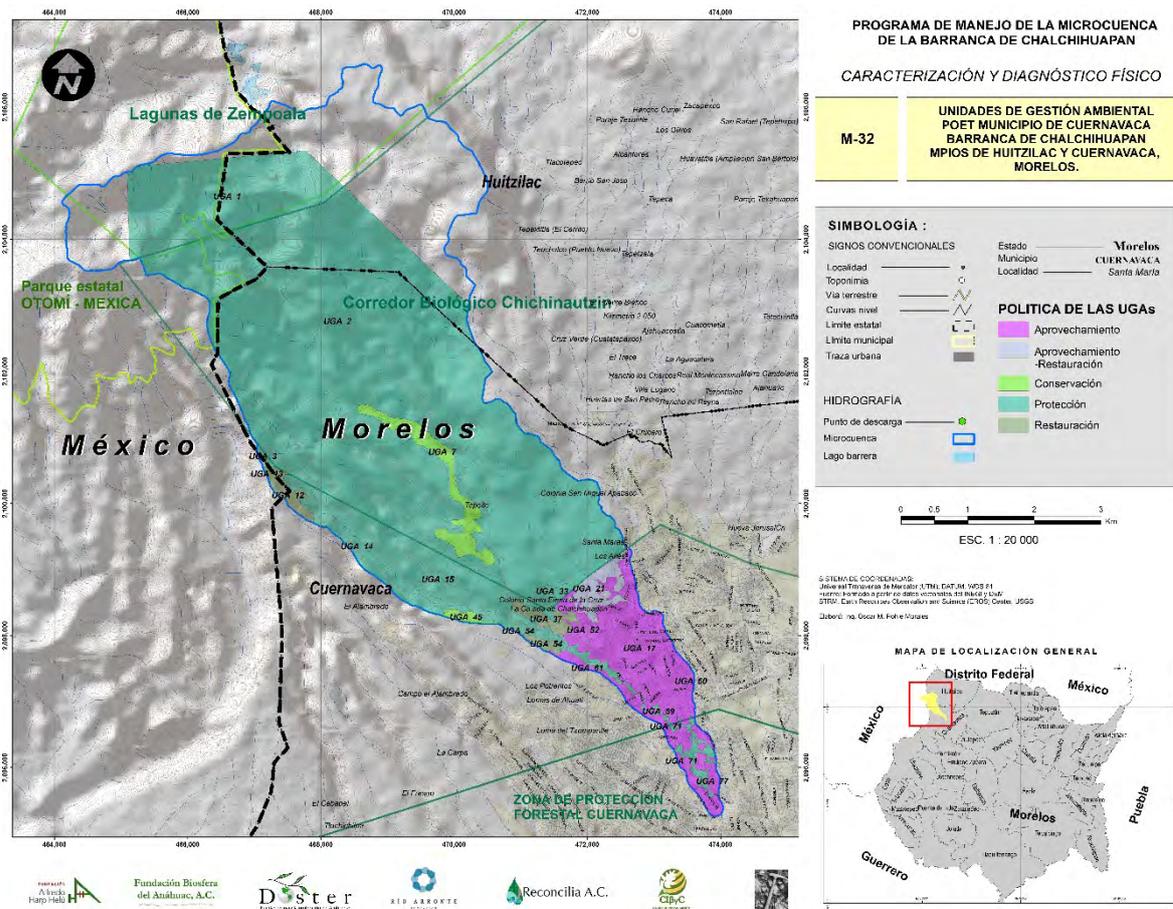


Figura 35. Zonificación de la microcuenca, según políticas de UGAs definidas en el POET del municipio de Cuernavaca..

Al comparar la zonificación anterior, con la delimitación de peligros geológicos y ANP's (Figura 32), se observa que coinciden en gran medida con algunas discrepancias, que pueden obedecer a la escala de trabajo; particularmente, en las zonas urbana y semiurbana. De cualquier forma, es necesario detallar las características de cada UGA urbana y semiurbana a una escala más grande (p.ej. 1 : 5, 000), para definir claramente las zonas de peligro geológico, ajustar la zona federal en las barrancas, consolidar las políticas de uso a que están sujetas; y corregir y detener la progresiva invasión de las zonas que han sido determinadas para su protección, conservación y restauración.

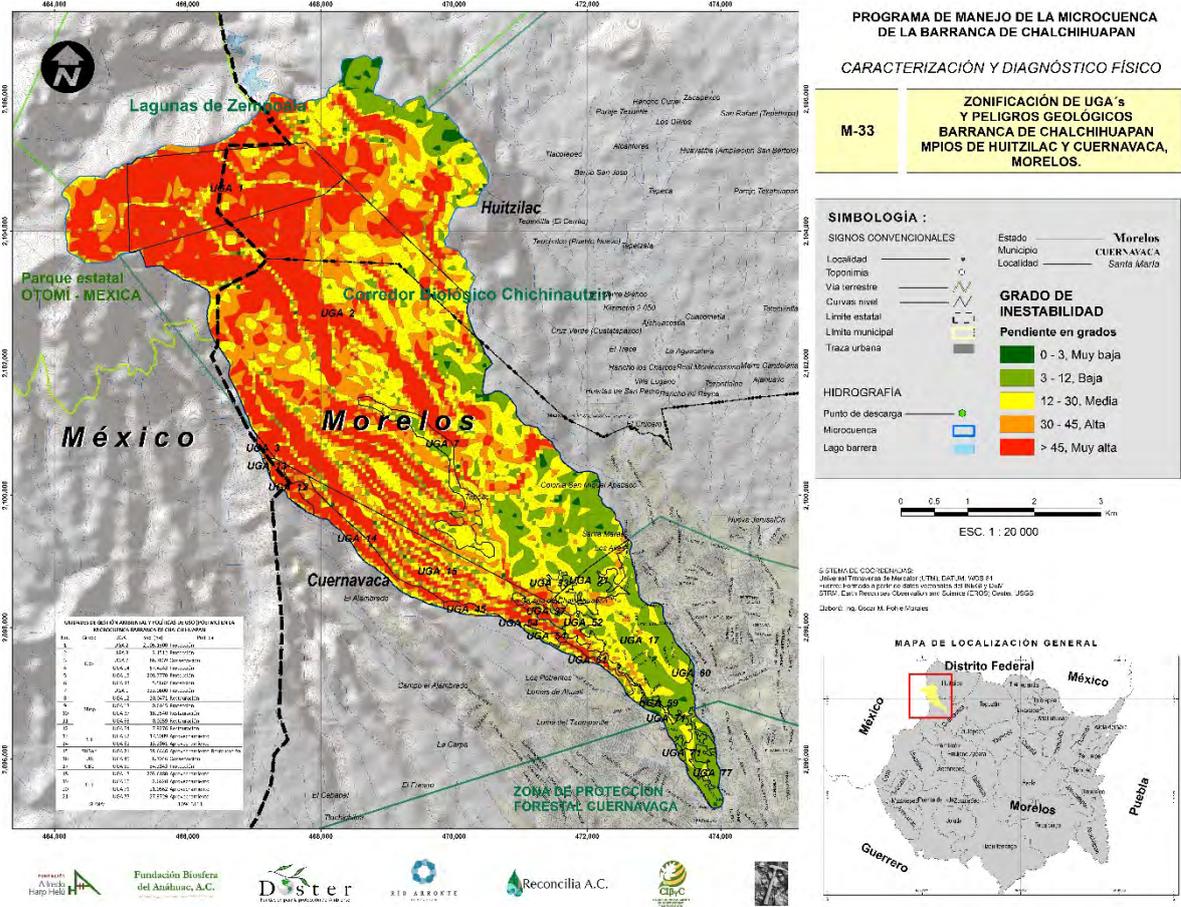


Figura 36. . Sobreposición de zonificación de UGA's y peligros geológicos.

8.2. Propuesta de manejo de la microcuenca

El manejo de una cuenca hidrográfica consiste en el uso racional de los recursos naturales (agua, aires, suelo, flora y fauna) que se encuentran dentro de sus límites y no debe ser orientado únicamente para resolver los problemas derivados de un desarrollo poblacional indiscriminado, la falta de suministro de agua potable asociada, el manejo político clientelar de grupos de poder y administraciones en turno; así como la desenfrenada especulación de tierras, que beneficia a particulares e inmobiliarias amparados bajo prácticas corruptas de quienes deberían velar por los intereses de la población que asumen representar.

Lo anterior constituye una certeza, cuando se constatan los resultados de numerosos planes, programas, ordenamientos, estudios, etc., que finalmente engrosan un amplísimo catálogo de buenas intenciones, las cuales se ven obstaculizadas legal o ilegalmente, relegadas u omitidas de alguna manera, por indolentes autoridades incrustadas dentro de los tres órdenes de gobierno.

Para revertir dicha tendencia, se hace necesario en primer lugar, la participación activa y exigencia ciudadana, de manera que se encuentre representada ampliamente en el consejo o comité de cuenca - en este caso, microcuenca -, respaldada por académicos y profesionistas de probada calidad científica y moral; asumiendo en conjunto la toma de decisiones que cristalicen en un programa realmente sustentable para el manejo de la microcuenca. En cualquier caso, las autoridades de los diferentes órdenes de gobierno, organizaciones o liderazgos políticos, sociales o económicos, no deberán prevalecer sobre la opinión ciudadana en la toma de decisiones.

En segundo término, es indispensable hacer valer las sanciones establecidas en la reglamentación en vigor, o implementar nuevas medias, para las personas físicas o morales que afecten los recursos naturales y el funcionamiento hidráulico de la microcuenca hidrológica.

Bibliografía

- Batllori, G., A., 2003, Las Barrancas de Morelos, enfoque educativo para un cambio de comportamiento de los moradores: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
- Caracterización de la microcuenca Denominada Barranca Chalchihuapan: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Balsas, 2014.
- Caracterización del subsistema natural, aspectos físicos. Memoria Técnica: Programa de Ordenamiento Ecológico del Municipio de Cuernavaca, 2008.
- Decreto por el que se declara el área de protección de la Flora y Fauna silvestres, ubicada en los municipios de Huitzilac, Cuernavaca, Tepoztlán, Jiutepec, Tlalnepantla, Yautepec, Tlayacapan y Totolapan, Morelos. Diario Oficial de la Federación DOF, 11-30-88.
- Decreto que crea el parque Nacional “Lagunas de Zempoala”, Diario Oficial de la Federación DOF, 27-11-1936.
- Decreto del ejecutivo del Estado por el que se crea el Parque Ecológico Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa, que se denominará Parque Otomí – Mexica. Periódico oficial del Gobierno constitucional del Estado de México, 22 de octubre de 1980.
- Decreto por el que se expide el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del estado de Morelos. Periódico Oficial “Tierra y Libertad”, Órgano del Gobierno del Estado Libre y Soberano de Morelos., 29 de septiembre de 2014.
- Decreto que declara Zona Protectora Forestal de la ciudad de Cuernavaca, Mor. los terrenos que el mismo limita. Diario Oficial de la Federación DOF, Tomo CV, Núm 15, 17 de noviembre de 1937.
- Demant, A., 1978, Características del eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, vol. 2, núm. 2 (1978), p. 172-187.
- Diccionario de Datos Climáticos, Escalas 1: 250 000 y 1 : 1 000 000 (vectorial): Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI), 2000.
- Espinasa, P. R., 2014, Historia de la actividad del Volcán Popocatepetl, 17 años de erupciones: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Dirección de Investigación, Subdirección de Riesgos Geológicos, versión electrónica 2014.
- García, T. F., 2008, Avalancha de Escombros del Pleistoceno Tardío del Cono Los Pies, Complejo Volcánico Iztaccíhuatl: Tesis para obtener el título de Maestro en

- Ciencias en Geología, Opción Riesgos Geológicos, Instituto Politécnico Nacional, 2008.
- Macías, J. L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, Núm. 3, 2005, p. 379-424.
 - Madrigal, U. D., y González, T. M.A., 1996, Geomorfología glacial y periglacial del Nevado de Toluca: Ciencias de la Tierra y de la Atmósfera, Vol. 3, Número Uno, Marzo 1996, p. 95-101.
 - Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. DOF, 27 de marzo de 2015.
 - Programa de Ordenamiento Ecológico del Municipio de Cuernavaca, publicado en el Periódico Oficial “Tierra y Libertad”, Órgano del Gobierno del Estado Libre y Soberano de Morelos, No. 4691; así como la publicación del resumen del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Cuernavaca, con el No. 4704, realizado el 1 de mayo de 2009.
 - Rodríguez-López, T., y Guzmán-Ramírez, N. B., 2014, El Manejo del agua e interacciones cooperantes de los usuarios de la barranca Chalchihuapan en el norte de Cuernavaca, Morelos, México: Revista Agricultura, Sociedad y Desarrollo, p. 53-70, 2014.
 - SINCE, 2010, Sistema para la consulta de la información censal (vectorial9, Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI), 2010.
 - Suarez, J., Deslizamientos: Análisis Geotécnico, Zonificación de Susceptibilidad Amenaza y Riesgo, www.erosion.com.co
 - Vázquez, S. L., 1991, Glaciaciones de cuaternario tardío en el volcán Teyótl, Sierra Nevada: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Revista Investigaciones Geográficas, No. 22, 1991.
 - Velasco-Tapia, F., y P. Verma, S., 2001, Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichináutzin: análisis de información y perspectivas: Revista Mexicana de Ciencias Geológica, v. 18, núm. 1, 2001, p. 1-36.