

ANÁLISIS GEOECOSISTÉMICO DE LA CUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MÉXICO*

Lilia de Lourdes Manzo Delgado**

José López García**

Resumen

Este trabajo es un ensayo metodológico elaborado en el marco de la ecología del paisaje, que permite identificar la relación de los elementos ambientales, de manera integral y sistémica, haciendo posible conocer la estructura y funcionamiento de un geosistema bien delimitado como es la cuenca hidrográfica del río Temascaltepec.

Como parte medular del desarrollo, se manejan como indicadores ambientales la eficiencia energética de la precipitación, la capacidad de amortiguamiento de la cobertura vegetal y la densidad de drenaje, y mediante esta evaluación se definió y precisó la organización y jerarquía de los elementos y componentes representados en unidades geoecológicas. Como resultado se identificaron cinco unidades geoecológicas de las cuales, el páramo de alta montaña, las tierras altas frías y los valles intermontanos, mantienen una estrecha relación estructural, funcional y morfoclimática, que permite una baja velocidad de erosión hídrica y con ello el mantenimiento de una alta estabilidad.

Las dos unidades restantes se mantienen espacial y funcionalmente como organizaciones independientes; de ellas, las tierras intermedias templadas muestran una erosión hídrica moderada, que le confiere una estabilidad media, y la unidad de tierras bajas y lomeríos cálidos presenta una baja velocidad de erosión logrando así una alta estabilidad.

Summary

This paper is a methodological essay that was made within the frame of Landscape Ecology, which lets us see the relation among the different environmental elements, in a systematic and integral way, enabling the knowledge of the structure and functioning of a well-limited geoecosystem as in the case of the río Temascaltepec Basin.

Some environmental indicators were used for the central part of the development of the work: the energetic efficiency of rainfall, the cushioning capacity of the plant cover and the density of surface drainage, by means of whose evaluation it was possible to define the organization and hierarchy of the elements and components represented in each of the geoecological units. As a final result, five ecological units were identified, of which the first tree - composed of the high mountain barren land (paramo), the cold highland and the mountain valley - still maintain a strong structural, functional and morphoclimatic relationship a strong structural, functional and morphoclimatic relationship that allows a low rate of hydric erosion and consequently the maintenance of a high stability.

* Recibido: 6 de junio de 1997.

** Instituto de Geografía, UNAM, México.

The other two units are spatially and functionally independent of these, the intermediate Temperate Land maintains a moderate hydric erosion, wich confers to it a moderate stability. Finally, it was determined that the lowland and the hilly warmlands shows low rate of erosion achieving a high stability.

Introducción

Actualmente se ha incrementado la necesidad de realizar estudios ambientales integrales para llevar a cabo la planeación y el óptimo aprovechamiento de los recursos naturales. Tales estudios han recurrido a técnicas y métodos, con diferentes enfoques, para conocer la relación que guardan los múltiples componentes que integran los geoecosistemas naturales (Cervantes, 1989).

Una alternativa de análisis se logra a través de la ecología del paisaje, ya que permite identificar la relación de los componentes ambientales de manera integral y sistémica logrando a la vez conocer la estructura, función y estabilidad de un geoecosistema (De Bolós, 1992).

El término de ecología del paisaje o geoeología, como la identificó su iniciador C. Troll, en 1939, pretende la búsqueda de las múltiples relaciones existentes entre los factores y elementos de los paisajes naturales y culturales (Cervantes, 1989).

Actualmente la palabra paisaje tiene diferentes concepciones, ya que ha sido retomada por varias disciplinas entre las que destacan la geografía, la ecología, la edafología, la antropología y la sociología, entre otras (Naveh y Lieberman, 1993).

A partir de los años sesenta se difundió ampliamente el enfoque o método sistémico (Bertalanffy, 1989) en muchas disciplinas, entre ellas la ecología del paisaje, lo cual dio lugar a que el paisaje fuera considerado como una noción espacial denominada geoeosistema natural, que fue definida por Schochava en 1963 (De Bolós, 1992).

Un geosistema natural, desde el punto de vista sistémico, es un sistema autorregulado, abierto, formado por componentes y complejos interrelacionados entre sí, que incluye los subsistemas abiótico, biótico y antrópico. Presenta una organización espacial y temporal que se identifica como la estructura vertical, horizontal y funcional del paisaje, cuyas características definen el estado en que se encuentra, el cual es dinámico y cambiante a lo largo del tiempo (Cervantes, 1989).

La sucesión de los diferentes estados de un geosistema, a lo largo del tiempo, define su comportamiento, de tal manera que cuando sus componentes regulan eficientemente la entrada y salida de energía, su estructura y su función se mantienen dentro de límites

precisos, logrando de esta manera un equilibrio o estabilidad dinámica. Por el contrario, cuando uno de los componentes se modifica, genera cambios en la estructura y función del geoecosistema, ocasionando un estado inestable y vulnerable (Cervantes, 1989).

Las cuencas hidrográficas constituyen la forma más objetiva para conceptualizar la operatividad de un geosistema. Esto es así porque forma un sistema discreto con umbrales bien definidos de entrada y salida de materia y energía, en el que el agua es el principal elemento funcional.

Una cuenca hidrográfica, vista con un enfoque sistémico, incluye estructuras de captación, conducción y control. Las estructuras de captación se definen por la forma de la divisoria de aguas y su orientación. Este límite separa la precipitación que cae entre cuencas contiguas, y dirige el flujo hacia uno y otro sistema.

Las estructuras de conducción están representadas por el conjunto de canales naturales por los que fluye el agua, y se identifican como cauces fluviales. Estas estructuras conducen y distribuyen el agua por todo el sistema. El conjunto de cauces naturales da lugar a una red que tiene forma, longitud, densidad y frecuencia variable (Urbina, 1974; Strahler, 1974). Las estructuras de control de la cuenca hidrográfica son el clima, cobertura vegetal, litología, suelo, pendiente, entre otras, ya que regulan el flujo de agua.

La cobertura vegetal amortigua la eficiencia energética de la precipitación. La protección que ejerce depende de su densidad y fisonomía. Todas las características de la vegetación participan en la regulación de la velocidad del flujo hídrico, logrando acelerarlo o retardarlo (Vargas, 1979).

El suelo es una capa superficial cuyo contenido de coloides, arena, limo y arcilla controla la cantidad de humedad, influyendo en una mayor o menor infiltración y, al mismo tiempo, regula el escurrimiento superficial (Buol *et al.*, 1981).

De los factores que intervienen en el funcionamiento y operación de las cuencas hidrográficas, se considera que el clima es el más importante, ya que de él depende el desarrollo de la mayoría de los procesos.

La estabilidad de la cuenca hidrográfica puede ser alterada por cambios climáticos, ya que éstos modifican el funcionamiento de varios componentes al promover cambios en la cantidad e intensidad del agua que entra al sistema (Manzo, 1994).

El objetivo de este trabajo es realizar en el marco metodológico de la ecología del paisaje, un análisis geoecosistémico de la cuenca del río Temascaltepec para conocer su estructura, funcionamiento y estabilidad ambiental.

Método

El análisis geoecosistémico incluye una etapa de diagnosis y otra de síntesis (Cervantes, 1989). La etapa de diagnosis consistió en compilar, revisar y procesar el material bibliográfico, cartográfico y estadístico existente. La base cartográfica se apoyó en la regionalización hidrológica establecida por la SARH (1971), y fue precisada en las cartas topográficas del INEGI (1978), escala 1:50 000, hojas Tuzantla, Valle de Bravo, Nevado de Toluca, Bejucos, Tejupilco e Ixtapan.

Se manejaron estadísticamente los registros meteorológicos de las estaciones Nevado de Toluca, La Comunidad, San Francisco, Oxtotilpan, Real de Arriba, Tequesquipan, Temascaltepec, Paso del Cobre, Acatitlán, Luvianos y Las Juntas, todas localizadas dentro de la región en estudio, y a cargo de la SARH.

El análisis de los factores climáticos se hizo siguiendo los criterios propuestos por Contreras (1939) y modificados por Meza (1976). También se construyeron y analizaron los climagramas de cada estación y se identificaron las características más relevantes de la dinámica atmosférica (García, 1988). Con la información procesada se diferenciaron y establecieron las unidades mesoclimáticas de la zona en estudio.

Se elaboraron mapas temáticos de geología, hidrografía, suelos y vegetación, empleando como referencia las cartas del INEGI, escalas 1:50 000 y 1:250 000. Dicha información se verificó en campo.

Las comunidades vegetales se identificaron siguiendo la clasificación de Miranda y Hernández (1963), con algunos ajustes necesarios. Cada tipo de vegetación se clasificó bajo una de las tres clases de cobertura vegetal (cerrada, semicerrada o abierta), tanto para el periodo lluvioso como el de la temporada seca. Esto se logró adoptando criterios de fisonomía y estructura de la vegetación como es la caducidad o permanencia del follaje y el número de estratos de cada tipo de vegetación.

Para determinar la estructura dinámica de la cuenca se efectuó un análisis morfométrico siguiendo el método de Strahler (1974), con ello se clasificó la red de drenaje superficial en orden jerárquico y se obtuvo, para cada subcuenca, la densidad y frecuencia de cauces fluviales de primer orden. La eficiencia energética de la precipitación se determinó

relacionando los datos de cobertura vegetal y los resultados morfométricos de densidad y frecuencia de cauces fluviales.

Como parte final de la etapa de diagnóstico se calculó el balance hídrico, considerando la fórmula general propuesta por Strahler (1974), tomando como referencia la ubicación y los registros estandarizados de las estaciones hidrométrica colectoras: A-12: La Comunidad, río Verde; A-11: Real de Arriba, Paso del Cobre, Paso del Guayabo y Paso del Rayán, a cargo de la SARH.

Tomando como referencia las superficies de captación de las estaciones, se establecieron seis subcuencas hidrográficas que permitieron efectuar el balance hídrico en forma parcial. Esto con la finalidad de conocer la trayectoria que sigue el agua, identificando el volumen que entra, el que se almacena o infiltra y el que escurre a lo largo de la cuenca.

Para el cálculo de la evapotranspiración real se tuvo en cuenta el método de isolinéas, considerando la fórmula de Turc, que utiliza la precipitación total anual y la temperatura media anual.

En la etapa de síntesis se interpretaron los resultados, obtenidos en la fase de diagnóstico, mediante un enfoque integral, para lo cual se construyó un perfil morfoclimático de la cuenca, en el cual se separaron e identificaron las estructuras operativas denominadas unidades geoeológicas.

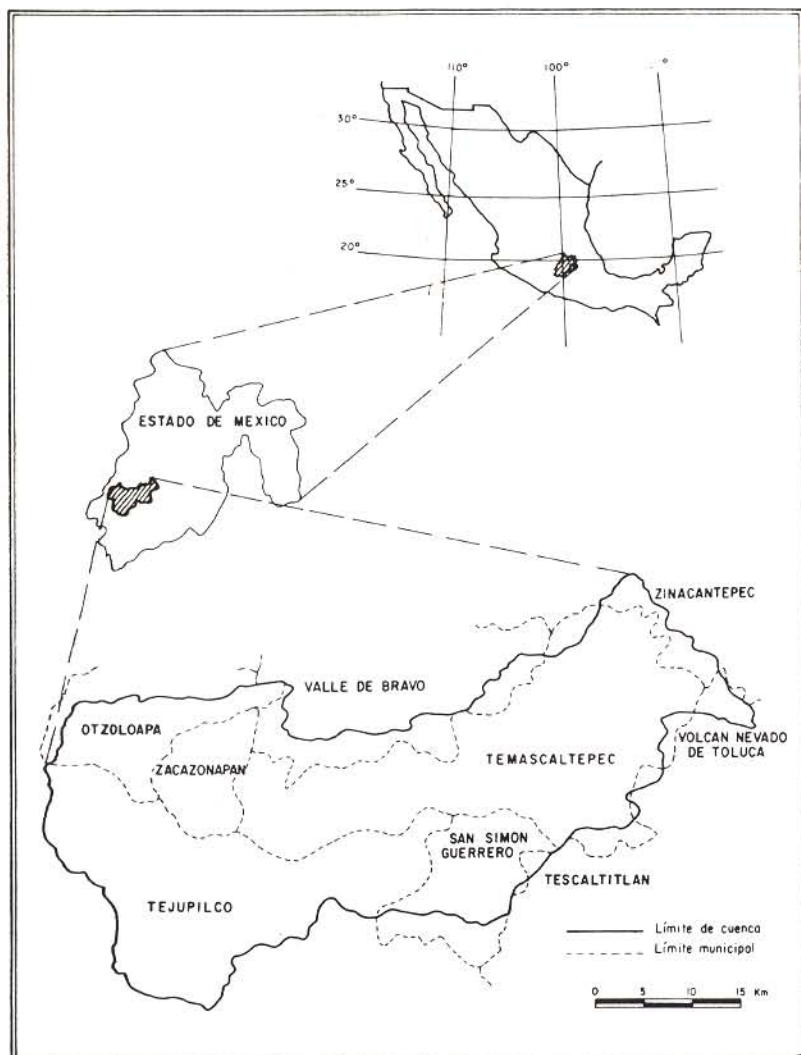
Descripción de la zona en estudio

Localización

La cuenca del río Temascaltepec se ubica en la región centro de la República Mexicana, al suroeste del Estado de México. Ocupa las jurisdicciones municipales de Ocotlán, San Simón de Guerrero, Tejupilco, Temascaltepec, Tescaltitlán, Valle de Bravo, Zacazonapan y Zinacantepec (véase **Mapa 1**). La zona tiene como coordenadas extremas 18° 52' 09" a 19° 14' 00" de latitud norte y 99° 46' 00" a 100° 24' 31" de longitud oeste.

La cuenca en estudio, según la SARH, corresponde a la región hidrológica No. 18, y cubre una superficie de 1 224.9 km². Presenta una forma alargada, estrechándose en la parte más alta; tiene una orientación suroeste-noreste. Se inicia en la cima del volcán Nevado de Toluca, en los picos más prominentes, el Fraile y el Águila, que alcanzan altitudes máximas de 5 545 y 4 495 msnm, respectivamente, y desciende hasta los 800 msnm, antes de la

Planta Hidroeléctrica de Tingambato, Mich., donde se une con el Tilostoc; este último, afluente del río Cutzamala, se incorpora al río Balsas, que es el colector general.



Mapa 1. Localización del área en estudio.

El río Temascaltepec, que representa la corriente principal de escurrimiento, recibe las aportaciones de 13 subcuencas principales, las cuales mantienen un volumen medio anual de 354.6 millones de metros cúbicos, con un flujo medio de 11.2 m³/seg. (SARH, 1971).

Geología y suelos

La zona se extiende entre dos unidades fisiográficas. En la región noreste de la cuenca y por arriba de los 2 000 msnm, se encuentra la provincia del Eje Neovolcánico Transversal caracterizada por un relieve formado por montañas altas, con pendientes abruptas (11-39°) y valles intermontanos, con pendientes ligeras y moderadas (3-11°); geológicamente está formado por rocas ígneas extrusivas del terciario y cuaternario; andesitas, basaltos, tobas y brechas. Estos materiales han dado origen a suelos residuales con desarrollo incipiente clasificados como andosoles, feozems y cambisoles.

En la región sureste, por abajo de los 2 000 msnm, se encuentra la provincia de la Sierra Madre del Sur, cuyo relieve está formado por montañas medias y bajas, con laderas fuertes (11-22°) y extensos valles con pendientes ligeras y moderadas (3-11°); geológicamente está formada por esquistos y rocas metavolcánicas del jurásico y cretácico, con algunos afloramientos riolíticos, graníticos y depósitos tobáceos. La diversidad de estos materiales ha permitido el desarrollo edáfico de los andosoles, cambisoles, feozems, luvisoles y acrisoles.

Las rocas más antiguas, del jurásico al cretácico, identificadas como metavolcánicas, se presentan en el extremo oeste, con características ácidas e intermedias, muy fracturadas, lo que hace suponer que son de origen granítico y andesítico en menor escala. El proceso de degradación al que han estado sometidos estos materiales, ha generado suelos delgados, resultado de la degradación de luvisoles y acrisoles y la formación de regosoles y litosoles.

Condicionantes climáticas

El clima de la zona en estudio está determinado por su posición geográfica y altitudinal en la zona intertropical, por lo que recibe influencia de masas de aire continental y de circulación superior, que se modifica por las características topográficas, originando la circulación local. En general, muestra un comportamiento típico de las regiones tropicales, en donde se presenta una circulación de verano y otra de invierno.

Con respecto a la circulación de verano, es durante esta época cuando se recibe casi la totalidad de las lluvias (93% de la precipitación total anual) provocadas principalmente por el desplazamiento de la Zona Intertropical de Convergencia de la Circulación General de la

Atmósfera, hacia el Norte, que permite la entrada de los vientos alisios, de fuerte intensidad y amplitud, que se introducen al país como masas húmedas.

Para el área en estudio, esta circulación se inicia en mayo. En esta época se alcanzan los máximos térmicos; sin embargo, este aumento de temperatura se ve amortiguado por la humedad ambiental producida por las lluvias, que llegan a su máximo hacia fines de verano y principios de otoño (septiembre - octubre).

Asociados a los vientos alisios están las ondas del Este, que refuerzan esta humedad, y los ciclones tropicales, presentes hacia fines del verano, que provocan las precipitaciones más abundantes del año.

Hacia fines de octubre las lluvias van decreciendo paulatinamente a medida que disminuye la influencia de la circulación de verano y empieza a actuar la circulación de invierno, presentándose las ondas frías extratropicales que provocan descensos térmicos, siendo más significativas en las partes altas de la cuenca donde, incluso, se producen nevadas en enero y febrero.

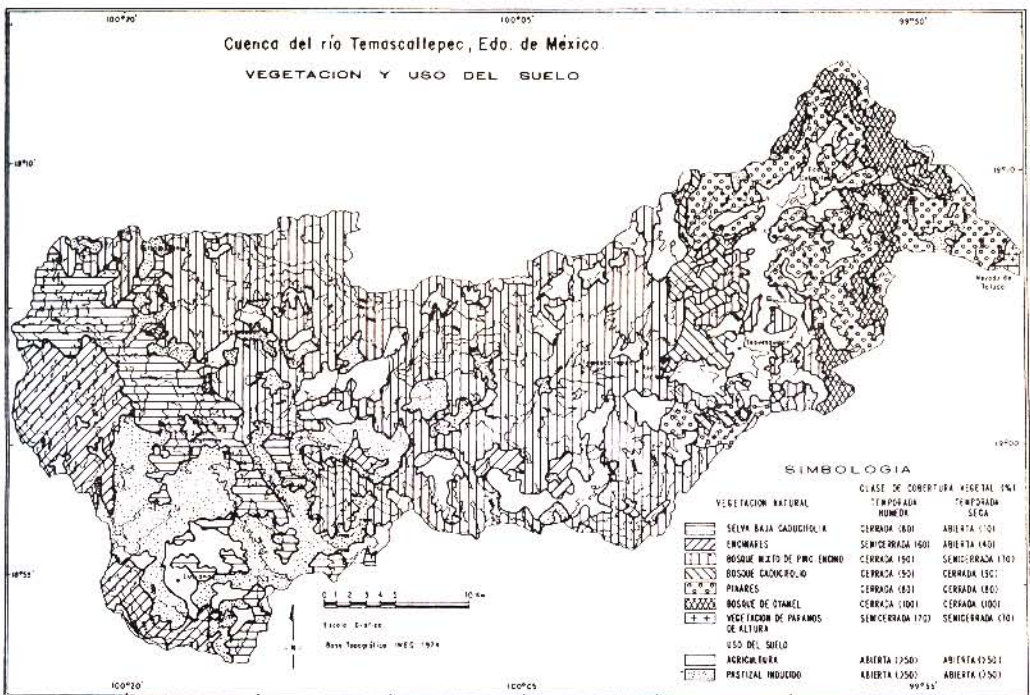
Con respecto a la circulación local, las elevaciones que conforman el parteaguas de la cuenca, situadas al Oeste (Sierra Nanchititla) y al Este (Nevado de Toluca), actúan como barreras al flujo del aire superficial.

En la zona los vientos reinantes son del Oeste y Suroeste, los cuales se ven forzados a ascender por las elevaciones que encuentran a su paso, hasta llegar a las mayores altitudes que conforman el parteaguas en la porción Este. Los vientos del Norte entran en la cuenca por la región noreste, atravesándola con dirección sureste, hasta encontrarse con los del Oeste, aproximadamente en la zona denominada la Olla de Temascaltepec, e incluyendo al poblado del mismo nombre. La circulación de los vientos trae como consecuencia la presencia de lluvias convectivas en la porción Oeste y de tipo orográfico, en las elevaciones del extremo Este de la cuenca.

La influencia climática zonal, la variación altitudinal del relieve, la exposición y la circulación de los vientos locales producen condiciones que permitieron separar cinco zonas mesoclimáticas: cálida subhúmeda, semicálida húmeda, templada húmeda, semifría húmeda y fría subhúmeda (véase **Tabla 1**).

Vegetación

La influencia climática zonal, la variación altitudinal del relieve, la exposición y la circulación de vientos locales, producen condiciones mesoclimáticas que influyen en la distribución, estructura y composición de los tipos de vegetación (véase Mapa 2), en donde la selva baja caducifolia y bosque de encino se desarrollan en condiciones cálidas subhúmedas, por lo que presentan una fisonomía estacional contrastante que varía en la temporada húmeda y seca; el bosque mixto pino-encino se establece en condiciones semicálidas o templadas húmedas, varía muy poco su estructura y fisonomía, a lo largo del año; el bosque templado se desarrolla en un ambiente templado húmedo; los pinares y el bosque de oyamel dominan en las condiciones semifrías, ya sea húmedas o subhúmedas, logrando mantener un aspecto siempre verde; el páramo de altura se limita exclusivamente al mesoclima frío subhúmedo.



Mapa 2. Vegetación y uso del suelo en la cuenca del río Temascaltepec.

Tabla 1. Zonificación mesoclimática de la cuenca del río Temascaltepec, Estado de México

TEMPE- RATURA ° C	ALTI- TUD (msnm)	PISO TÉRMI- CO	PRECIPI- TACIÓN (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)	PISO DE HUME- DAD	ZONA MESO- CLIMÁ- TICA
> 22	< 1200	cálido	900-1200	1100-1300	subhúmedo	cálida subhúmeda
18-22	1200- 1800	semicáli- do	1200-1400	800-1100	húmedo	semicálida húmeda
14-18	1800- 2500	templado	1200-1400	700- 800	húmedo	templada húmeda
9-14	2500- 3500	semifrio	1200-1400	600- 700	húmedo	semifría húmeda
< 9	> 3500	frio	1200-1400	< 600	subhúmedo	fría subhúmeda

Balance hídrico

Las condiciones mesoclimáticas influyen en los procesos de formación del suelo y establecimiento de la vegetación, los cuales al asociarse con la pendiente del terreno, participan en el control de la circulación del agua que entra y sale en una cuenca. De esta manera, y de acuerdo con el balance hídrico general, la cuenca del río Temascaltepec recibe anualmente 1 255.56 mm de precipitación, que corresponden a 1 537 935.4 m³, de los cuales un 16.2% se infiltra, 27.7 se escurre y otro 56.1% se evapotranspira (véase **Tabla 2**). Por tanto, se considera como una región húmeda que tiene la capacidad de retener el agua en la época de lluvia, lo que es suficiente para realizar los procesos de evapotranspiración y escurrimiento en la temporada seca. Sin embargo, las variaciones altitudinales, de la zona en estudio, determinan modificaciones en la evapotranspiración, ocasionando que la infiltración y el escurrimiento sean diferentes para cada subcuenca.

Tabla 2. Balance hídrico comparativo de las subcuencas del río Temascaltepec, Estado de México

SUBCUENCA	ÁREA km ²	PRECIPITA- CIÓN MEDIA ANUAL (mm)	INFILTRA- CIÓN MEDIA ANUAL (mm)	ESCURRI- MIENTO MEDIO ANUAL (mm)	EVAPOTRANSPI- RACIÓN REAL (mm)
Rio Verde	212.80	1321.03 100%	482.97 36.56%	269.49 20.40%	568.57 43.04%
Real de Arriba	112.60	1368.03 100%	122.85 8.98%	629.57 46.02%	615.54 45.00%
Paso del Cobre	321.20	1364.66 100%	170.99 12.53%	475.72 34.86%	717.94 52.61%
Paso del Rayán	287.20	1272.50 100%	342.07 26.88%	180.00 14.15%	750.39 58.97%
Paso del Guayabo	140.30	1140.91 100%	30.84 2.7%	371.67 32.58%	738.39 64.72%
Los Pinzanes	150.80	1066.24 100%	71.54 6.71%	157.80 14.80%	836.89 78.49%
PROMEDIO TOTAL	1224.9 0	1255.56 100%	203.54 16.21%	347.37 27.67%	704.62 56.12%

Unidades geoecológicas

Como resultado del análisis geoeosistémico se identificaron y relacionaron los procesos y fenómenos que caracterizan a las cinco unidades geoecológicas que componen la cuenca del río Temascaltepec; páramos de alta montaña, tierras altas frías, valles intermontanos, tierras intermedias templadas y tierras bajas y lomeríos cálidos. La ubicación de éstas se muestra en el perfil morfoclimático. A continuación se describen las características operativas de cada una de ellas (**Mapa 3**).

Unidad geoecológica. Páramos de alta montaña

Esta unidad se encuentra por arriba de los 4 000 msnm, en el flanco occidental del Nevado de Toluca. Cubre una superficie aproximada de 320 ha, que representan un 0.26 % de la superficie total de la cuenca en estudio (véase **Figura 1: Perfil Morfoclimático**). Por su posición altitudinal, esta unidad se encuentra constantemente sometida a condiciones de

nubosidad que le permiten interceptar humedad durante todo el año, registrando valores alrededor de 900 a 1 200 mm. En tales circunstancias, en los meses de diciembre, enero y febrero, en los que la temperatura desciende a 2° C, se induce la formación de nieve que se funde a principios de marzo.



Mapa 3. Unidades geoecológicas.

Las condiciones altitudinales de temperatura y de humedad limitan el desarrollo de la vegetación permitiendo, principalmente, el establecimiento de pastos amacollados que aportan grandes cantidades de materia orgánica que se humifica lentamente dando lugar a la formación de suelos arenosos de tipo regosol. La forma en que esta unidad capta humedad propicia que la cobertura herbácea y los suelos arenosos infiltren más de 30% del volumen de precipitación, lo cual influye para que exista un escurrimiento superficial bajo que no supere un 20% del total mencionado. Ambos procesos, al combinarse, dejan como resultado la presencia de tres cauces fluviales por kilómetro cuadrado, que representan una frecuencia baja.

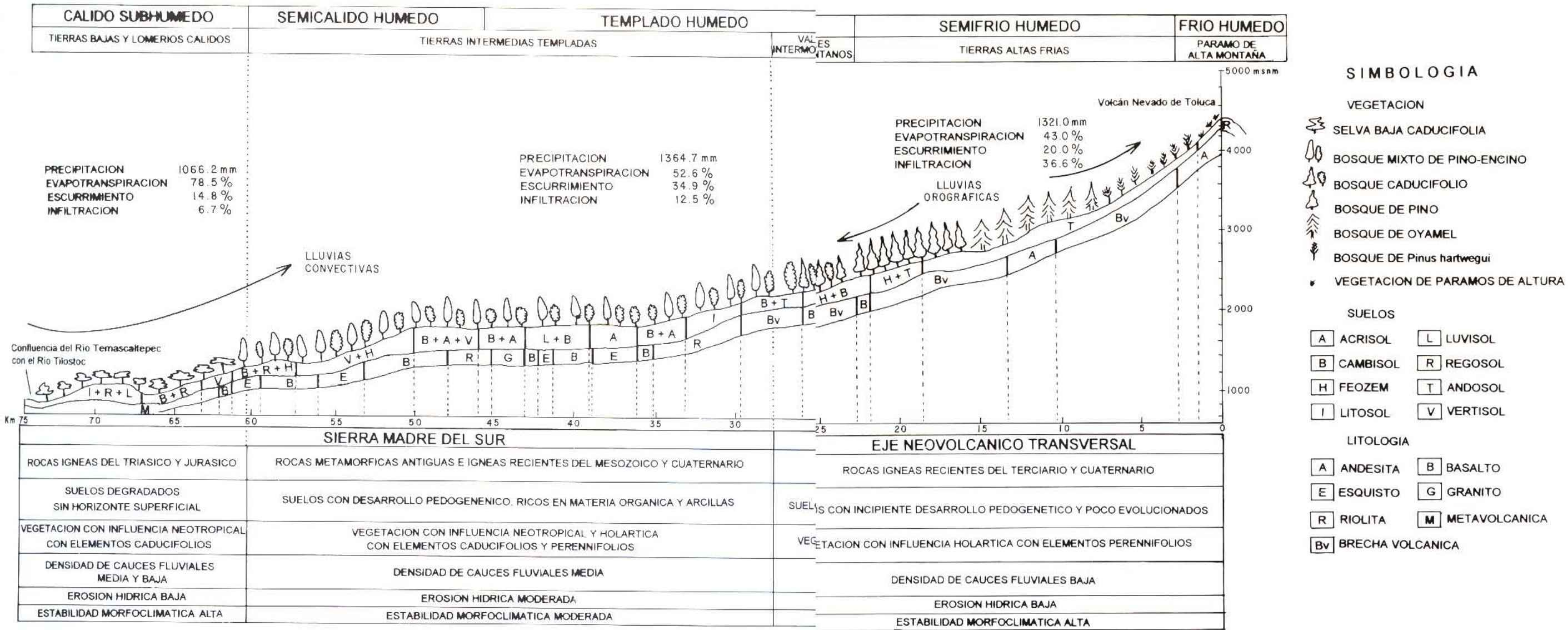


Figura 1. Perfil morfoclimático de la cuenca del río Temascaltepec, Estado de México.

El agua que se obtiene en marzo y abril, como producto del deshielo, se infiltra rápidamente a través del suelo, produciendo una recarga importante a nivel de los mantos acuíferos, lo que contribuye a mantener el escurrimiento del arroyo La Hortaliza con un promedio de 64 000 m³/año, y el afloramiento de diversos manantiales durante todo el año, incluso en los meses de mayor sequía.

Debido a que en esta unidad el proceso de infiltración es superior al de escurrimiento superficial, el nivel freático se beneficia constantemente, sin embargo, estas condiciones provocan una aridez fisiológica ya que el suelo no tiene propiedades para retener la humedad. La aridez fisiológica varía dependiendo de la altitud y la pendiente del terreno, observándose que es mayor en las partes altas con pendientes escarpadas, y menor, conforme disminuye la altura y se alcanzan pendientes moderadas.

Esta condición influye en el establecimiento y distribución de la vegetación, encontrándose por arriba de los 4 300 msnm, elementos tales como *Draba nivicola*, *Festuca livida* y *Umbilicaria* sp.; entre los 4 100 y 4 300 msnm, la asociación de *Calamagrostis tolucensis*, y alrededor de los 4 000 msnm, destaca *Pinus hartwegii* (González, 1987), que se establecen en contacto con la siguiente unidad geoecológica denominada bosque de pino.

Los suelos arenosos expuestos en pendientes fuertes determinan para esta unidad un alto potencial de erodabilidad, sin embargo, éste se encuentra fuertemente estabilizado por la baja eficiencia energética que provocan las condiciones de nubosidad y el agua de escurrimiento, que están bien controladas por una rápida infiltración que disminuye el escurrimiento superficial y, por tanto, genera una velocidad erosiva baja que mantiene al páramo de altura en una estabilidad alta.

La unidad geoecológica de páramo de altura capta la humedad y la infiltra durante todo el año, lo cual mantiene la recarga del nivel freático, cuyo surgimiento otorga beneficios a las unidades inferiores, ya sea mediante escurrimiento superficial o subterráneo, cuya humedad favorece al bosque de pino, especialmente en la época de sequía. Las alteraciones físicas que se presenten en esta unidad modificarán su función y podrán repercutir en la estructura del bosque de pino.

Unidad geoecológica. Tierras altas frías

Esta unidad se encuentra entre los 2 500 y 4 000 msnm, en la ladera oriental del Nevado de Toluca, por abajo del páramo de alta montaña. Cubre una superficie, aproximadamente, de 28 560 ha, que representan un 23.3% de la cuenca en estudio (véase Perfil Morfoclimático).

Por su altitud, esta unidad capta el agua mediante dos formas: una por las precipitaciones pluviales que se mantienen por un periodo de siete meses, desde mayo hasta noviembre, y que registran anualmente alrededor de los 1 300 mm; la otra, representada por los aportes subterráneos que provienen de la unidad de páramo de alta montaña que se capian durante todo el año, siendo más significativos los que se reciben en los meses más secos, que son

febrero y marzo. Ambos aportes permiten mantener un ambiente húmedo que crea condiciones ambientales higrofilicas.

Las condiciones altitudinales establecen un intervalo de temperatura promedio entre 9 y 14° C, con oscilación térmica menor de 5° C. Tales circunstancias, asociadas a un ambiente húmedo, determinan un aporte continuo de materia orgánica altamente celulósica, que se somete a una humificación lenta, dando lugar a suelos profundos, poco evolucionados de tipo andosol.

Las lluvias que se presentan en esta unidad son de tipo orográfico, por lo que, dadas las condiciones edáficas y de cobertura vegetal, la tercera parte de las precipitaciones pluviales es absorbida eficientemente por el suelo, y, por tanto, disminuye la formación de cauces superficiales. Ambos comportamientos dan lugar a una baja formación de cauces, registrándose menos de 6/km² (frecuencia baja). Tales condiciones representan un aporte importante al nivel freático que alimenta diversos arroyos que confluyen en el río La Comunidad, el cual mantiene un gasto anual entre 5 712 000 y 16 279 200 m³/año.

En esta unidad el factor altitudinal es causa de cambios notables en la variación de temperatura, lo que influye para que se establezcan tres comunidades de pinos: por arriba de los 3 500 msnm dominan *Pinus hartwegii* asociado con *Festuca tolucensis*, *Calamagrostis tolucensis*, *Muhlenbergia affinis*, *M. nigra* y *M. dubioides* (Sandoval, 1987); entre los 3 000 y 3 500 msnm se encuentra *Abies religiosa*, con un estrato arbustivo que incluye a *Senecio cinerarioides*, *Eupatorium petiolare* y *Cirsium* sp., y otro que puede presentar *Alchemilla hirsuta* y *Piqueria pilosa* y, finalmente, en el intervalo 2 500 a 3 000 msnm se presentan varias especies entre las que destacan *Pinus ayacahuite*, *P. rudis* y *P. montezumae*, acompañados de dos estratos, uno arbustivo en el que destacan *Lupinus montanus*, *Penstemon* sp., *Senecio anquilifolius* y *Senecio* sp. y otro estrato herbáceo en el que dominan las gramíneas amacolladas, tales como *Festuca tolucensis*, *Calamagrostis tolucensis*, *Muhlenbergia affinis* y *M. dubioides* (Sandoval, 1987).

El límite inferior de esta unidad está definido por cañadas de variada profundidad, en donde se recoge el agua excedente captada en esta unidad y en la de páramo de altura, dando lugar al trayecto final del río La Comunidad y los arroyos Palo Amarillo y Palo Ancho, en cuya confluencia tiene inicio el río Temascaltepec, que aporta anualmente alrededor de 57.3 millones de m³ equivalente a 269.5 mm.

Esta unidad registra un amplio intervalo de pendientes que generan dos procesos potenciales de erodabilidad, uno alto asociado a pendientes abruptas y otro moderado en pendientes ligeras; sin embargo, ambos casos se encuentran fuertemente estabilizados por la baja eficiencia energética que generan las lluvias orográficas, lo que, además, está bien controlado por una cobertura cerrada y por un suelo orgánico que absorbe rápidamente el agua, lo que contribuye a disminuir la erosión, logrando, finalmente, una estabilidad alta.

Las características geoecológicas de esta unidad la identifican como la cabecera hídrica de la cuenca, por lo que en menos de la cuarta parte de la superficie total es posible captar el agua que da lugar a la formación del río Temascaltepec, cuyo caudal se mantiene durante todo el año.

Unidad geoecológica: Valles intermontanos

Esta unidad se encuentra entre los 2 000 y los 2 500 msnm, en las cañadas que forman el río La Comunidad y los arroyos Palo Amarillo y Palo Ancho. Representa el límite inferior de la comunidad del bosque de pinos y de la ladera oriental del Nevado de Toluca. Cubre una superficie aproximada de 3 400 ha, que equivalen a 2.8% de la cuenca en estudio (*véase Perfil Morfoclimático*).

Las cañadas constituyen una "ruptura de pendiente" originada por un contacto lítico entre basaltos cuaternarios y andesitas del terciario. La diferencia de materiales volcánicos, expuesto en áreas estrechas, ha ocasionado la interrupción del flujo subterráneo y superficial que proviene de las unidades páramo de alta montaña y tierras altas frías, obligando a que el agua reconozca los cauces que forman el río La Comunidad y los arroyos Palo Amarillo y Palo Ancho Verde como punto final de su recorrido.

Los escurrimientos que llegan a las cañadas varían dependiendo de las condiciones de precipitación que se registran en las unidades superiores, observándose, por tanto, que el mayor aporte se efectúa de junio a septiembre, con un volumen mensual aproximado de 1 190 000 m³, que se reduce paulatinamente hasta mantenerse alrededor de los 510 000 m³, como promedio mensual.

Por la forma estrecha y deprimida de esta unidad, los vientos locales circulan, en el transcurso del día, hacia las partes altas, y por la tarde regresan a las partes bajas. Este desplazamiento permite que al ascender absorban humedad que se precipita en el periodo descendente. Este comportamiento es una contribución para que la humedad que prevalece se recicle "constantemente" en la misma unidad, lo cual mantiene un ambiente húmedo por más tiempo, registrándose un volumen anual entre 1 200 y 1 400 mm de precipitación.

Las cañadas también ofrecen protección a la insolación, manteniendo una temperatura promedio anual entre 14 y 16° C, con oscilaciones isotérmicas, lo que representa un factor más que contribuye a mantener la humedad ambiental, ya que las demandas de evapotranspiración se mantienen estables durante todo el año.

El relieve y la ruptura de pendiente influyen en forma determinante para que esta unidad reciba humedad y la conserve, hecho que conlleva a que el periodo húmedo se prolongue, cubriendo un lapso que va de junio a diciembre o enero, y la época de secas se reduzca a tan solo cuatro meses, entre febrero y mayo.

En un ambiente húmedo y templado se presentan las condiciones óptimas para el establecimiento de un bosque caducifolio en donde se desarrollan ampliamente musgos, entre los géneros más comunes cabe citar *Anomodon*, *Homalim* y *Papillaria*, junto con helechos, hongos y líquenes, y algunos elementos arbóreos de *Pinus* y *Quercus*, este último cambia su follaje en la época fría del año, ya que ésta coincide con la disminución del aporte de humedad.

El bosque caducifolio proporciona un aporte variado de materia orgánica al suelo, que se descompone y humifica lentamente dando lugar a la formación de andosoles húmicos que absorben y retienen el agua eficientemente y que también participan en el mantenimiento de la humedad ambiental y, por otra parte, disminuye el escurrimiento superficial, el cual registra menos de seis cauces por km².

Las pendientes moderadas y fuertes que identifican a esta unidad determinan un alto potencial de erodabilidad, sin embargo, éste se encuentra fuertemente estabilizado por la baja eficiencia energética de la precipitación, que está bien controlada por la cobertura cerrada del bosque caducifolio y por el suelo orgánico que absorbe rápidamente el agua; hechos que le confieren una alta estabilidad.

Las características geoecológicas de esta unidad constituyen el límite final de la trayectoria superficial y subterránea del agua que se capta en el bosque de pinos y el páramo de altura, la cual sigue su curso, en forma superficial, por el río Temascaltepec. Su estructura y función dependen de la humedad que recibe de las unidades superiores, y de la capacidad que tiene para retenerla y reciclarla. Por tanto, los desequilibrios hídricos que se registren en el bosque de pino o en el páramo provocarán la disminución del aporte de humedad, lo cual repercutirá en la modificación de su estabilidad.

Unidad geocológica: Tierras intermedias templadas

Esta unidad se extiende entre los 1 200 y 2 200 msnm, cubriendo toda la parte media y algunas elevaciones de la parte baja. Abarca una superficie aproximada de 65 500 ha, que representan un 53.5% de la cuenca en estudio (véase Perfil Morfoclimático).

En el extremo oriental limita con las cañadas del río La Comunidad y los arroyos Palo Amarillo y Palo Ancho, en donde se establece el bosque caducifolio, sin embargo, tales circunstancias representan una barrera que interrumpe la continuidad hidrodinámica entre la parte alta y la media de la cuenca, ocasionando que los aportes subterráneos que se captan en las cabeceras hídricas no se transmitan a otras unidades, lo que trae como consecuencia que el bosque mixto no reciba excedentes hídricos en la época de sequía.

En la porción norte de esta unidad se encuentra la Sierra de Temascaltepec, cuyas elevaciones alcanzan los 2 600 msnm; por otra parte, en el suroeste y sureste se encuentran estribaciones montañosas que rebasan los 1 800 msnm, y que forman parte de algunas elevaciones extendidas hacia el Sur, como la sierra de Nanchititla.

La orientación que guardan estas montañas ocasiona que los vientos locales se eleven dando lugar a la formación de precipitaciones convectivas y orográficas, lo que da como resultado tres áreas con diferente captación pluvial: una en la parte media, en donde anualmente se reciben más de 1 400 mm, otra en la porción occidental, en donde se captan menos de 1 000 mm, y el resto del área, cuya percepción fluctúa entre 1 300 y 1 400 mm. En estas circunstancias, las lluvias se concentran en un periodo que fluctúa de cinco a seis meses, entre mayo y octubre, lo que representa un 93% del agua que cae en esta unidad.

La distribución de la precipitación, asociada a temperaturas promedio que fluctúan entre los 14 y 22° C, con oscilación isotérmica, determinan la presencia del bosque mixto de pino-encino. Sin embargo, las diferencias altitudinales y del relieve originan variaciones morfoclimáticas que controlan el establecimiento y distribución de las comunidades vegetales.

Es así que por arriba de los 1 800 msnm se mantiene la condición templada que permite a los pinos dominar sobre los encinos; entre 1 200 y 1 800 msnm se registran condiciones semicálidas, lo que hace factible que los encinos, por su poder de adaptación a condiciones más secas, dominen sobre los pinos; algunos elementos representativos son *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *Quercus macrophylla*, *Q. uruapanensis*, *Q. castanea*, *Q. acutifolia* y *Cornus dasiflora*. En el estrato arbustivo se encuentran *Carpinus coralineana*, *Arbutus xalapensis*, *Crataegus* sp., *Acacia pennatula* y *Calliandra anomala*. El estrato herbáceo es rico en gramíneas y algunas otras anuales, entre ellas se

encuentra *Verbesina greenmani*, *Stevia* sp., *Aralia* sp., *Fuchsia thymifolia*, *Salvia* sp., *Pteridium* sp y *Polypodium* sp.

Un tercer caso está representado en las elevaciones que se encuentran alrededor de los 1 200 msnm, en donde se registra un aumento de la temperatura ($> 22^{\circ}\text{C}$) y una ligera reducción de las precipitaciones (900 a 1 200 mm), que crean una condición cálida subhúmeda, en donde se establecen exclusivamente los encinos, ya que pueden resistir periodos más prolongados de sequía. Como elementos arbóreos dominan: *Quercus macrophylla*, *Q. laurina* y *Q. glaucophylla* junto con *Arbutus xalapensis* y *Clethra mexicana*. En el estrato arbustivo destacan *Calliandra anomala*, *Erythrina* sp., *Ipomoea murucoides*, *Cordia* sp. y *Lonchocarpus* sp. En el estrato herbáceo se pueden encontrar *Calliandra anomala*, *Opuntia* sp., *Cassia* sp., *Bouteloua curtipendula*, *Salvia* sp., *Lupinus* sp., *Adiantum* sp., *Oxalis* sp. y *Polypodium* sp. (Rzedowsky, 1978). Por otra parte, también, y de manera importante, la distribución de los bosques de pino responde a actividades antrópicas, ya que éstos son más sensibles a la alteración por disturbio y, por tanto, dominan en áreas alteradas.

La mezcla de elementos del bosque mixto de pino-encino proporciona un aporte variado de materia orgánica que se descompone y humifica lentamente dando lugar a la formación de dos grupos de suelos: los que son ricos en materia orgánica, como los andosoles y feozems, que se desarrollan en pendientes de moderadas a fuertes, o como los litosoles y regosoles, que se encuentran en pendientes escarpadas, con menor contenido de materia orgánica. El segundo grupo está formado por suelos arcillosos tales como cambisoles, acrisoles y vertisoles, que se desarrollan en pendientes ligeras y moderadas.

Los dos grupos de suelos confieren a esta unidad características morfoclimáticas variables, permitiendo que los primeros absorban y retengan por más tiempo el agua y, por tanto, predomina la infiltración, en tanto que los arcillosos mantienen un límite de saturación en la época húmeda, que cambia o desaparece en la época seca, dando lugar al dominio de los escurrimientos superficiales y los procesos erosivos. Tales características contribuyen al establecimiento general de una red fluvial con frecuencia promedio que fluctúa entre 7 y 13 cauces por km^2 .

La estacionalidad del periodo pluvial y la ausencia de aportes de agua subterránea de otras unidades, son los responsables de que los arroyos Los Quelites, Las Anonas y La Laja, registren un escurrimiento escaso o nulo en la época de sequía. Al respecto, cabe aclarar que los ríos El Chilero y La Mina de Fierro, ubicados en la porción sur de la unidad, no siguen este proceso, por lo que se considera que reciben aportaciones subterráneas de las serranías que se extienden hacia el Sur.

El hecho de que esta unidad presente un mayor número de cauces influye para que un 34.86% del agua que cae, escurra, y otro 12.53% se infiltre (véase **Tabla 2**). La combinación de ambos procesos contribuye, por un lado, a que el río Temascaltepec aumente su volumen en la temporada lluviosa; sin embargo, por otra parte, restringe la posibilidad de enriquecimiento de los mantos acuíferos.

Las características edáficas e hídricas, al asociarse con pendientes que van de ligeras a escarpadas, imprimen a esta unidad un proceso de erodabilidad alto, generado por la gran eficiencia energética de las lluvias convectivas, que logra estabilizarse parcialmente debido a la presencia de la cobertura semicerrada o cerrada que forma el bosque de pino-encino, lo que permite disminuir parcialmente el efecto energético, otorgando una estabilidad moderada a este geosistema. Por tanto, si se redujera o eliminara la cobertura vegetal, se induciría un desequilibrio en la organización del escurrimiento y se desencadenarían problemas de erosión, ya que el suelo por sí solo no tiene la suficiente capacidad para amortiguar la fuerza energética de la precipitación.

Unidad geoecológica: Tierras bajas y lomeríos cálidos

Esta unidad se encuentra por abajo de los 1 200 msnm, es una superficie aproximada de 24 720 ha, que representa 20.2% de la cuenca en estudio. Se establece en continuidad con la unidad geoecológica tierras intermedias templadas (véase Perfil Morfoclimático).

Esta unidad constituye un valle ondulado, con pendientes ligeras y moderadas, rodeado por elevaciones que alcanzan los 1 600 msnm, que le permiten captar el agua de dos modos: uno es por las precipitaciones pluviales de tipo convectivo que se mantienen por un periodo de cinco meses, de junio a octubre, que registran anualmente menos de 1 200 mm, otro está representado por los aportes subterráneos que provienen de la unidad de bosque mixto de pino-encino, que también se reciben en la temporada lluviosa, lo que ocasiona que la temporada de sequía sea más marcada.

Las mismas características morfoclimáticas influyen para que se registren temperaturas promedio mayores a 22° C, con oscilaciones que rebasan los 5° C, que al asociarse con el periodo de lluvias determinan el establecimiento de la selva baja caducifolia, cuyos cambios fenológicos significan un proceso de adaptación a las condiciones climáticas.

En el estrato arbóreo de la selva baja caducifolia se encuentran *Bursera excelsa*, *B. fagaroides*, *Pseudosmodium perniciosum*, *Amphipterygium adstringens*, *Lysiloma* sp., *Haematoxylon brasiletto*, *Leucaena* sp., *Pithecellobium dulce*, *Ipomoea wolcottiana*, *Crescentia alata* y *Carica mexicana*. En el estrato arbustivo: *Rhus* sp., *Acacia cymbispina*, *A. pennatula*, *Bauhinia* sp., *Thevetia thevetioides* y *Byrsonima crassifolia*. En el estrato

herbáceo: *Salvia polystachya*, *Croton* sp., *Opuntia* sp., *Bouteloua filiformis*, *Aristida* sp., *Dalea* sp., *Asterohyptis* sp., *Paspalum notatum* y *Lantana camara* (Rzedowsky, 1998).

En este tipo de vegetación se han desarrollado dos tipos de suelos, por un lado los que tienen una capa orgánica superficial, como los regosoles, que se establecen en la porción norte y sureste, sobre pendientes fuertes, y los feozems, asociados a pendientes moderadas; el otro tipo de suelos son los cambisoles, que presentan moderados contenidos de arcilla, mismos que se establecen principalmente en la porción sur, sobre pendientes ligeras.

Asimismo, las propiedades físicas de los regosoles permiten mayor retención y almacenamiento de agua, favoreciendo que 26.88% de la precipitación se infiltre, lo que incrementa el volumen a los mantos acuíferos y repercute en un menor escurrimiento superficial que da origen a una densidad de drenaje que fluctúa entre 2.8 y 3.6 km/km². Al respecto, se observó que las elevaciones que se sitúan en la porción sureste, aunque presentan las mismas características edáficas, no siguen este mismo comportamiento hídrico, ya que la densidad de cauces se incrementa entre 3.6 y 4.4 km/km², considerándose que esto se debe a que las precipitaciones que se registran en esta área imponen mayor eficiencia energética que, a la larga, repercute en una mayor erosión hídrica.

Entre las propiedades de los cambisoles, por su carácter incipiente, originan escurrimientos superficiales en áreas con pendientes moderadas. Tales características dan lugar a una red de drenaje fluvial, semejante a la que presentan los regosoles, que fluctúa entre 2.8 y 3.6 cauces por km², considerándose que esto se debe a que en ambas partes la eficiencia energética de la precipitación es la misma. Sin embargo, para esta área el flujo hídrico es más rápido, ya que un 32.58% del agua que cae escurre, dando lugar al incremento del gasto temporal del arroyo Chiquito y el río de los Sabinos, los que proporcionan un promedio de 29 640 000 m³, en el mes de septiembre, que representa la tercera parte de su volumen anual, lo cual significa un buen aporte al río Temascaltepec en la temporada lluviosa.

En esta unidad debido a las precipitaciones de tipo convectivo, aunadas a la escasa cubierta forestal, se origina un alto potencial de erodabilidad, en tanto que, al presentarse en la época invernal o a principios de la temporada lluviosa, se generan escurrimientos superficiales y bajos procesos de erosión que, a la larga, condicionan una alta estabilidad.

La eliminación de cobertura vegetal deja al descubierto el suelo, que no tiene la suficiente capacidad para amortiguar la eficiencia energética de la precipitación. Por tanto, si se encuentra así en la temporada lluviosa, se acelerarán los procesos de erosión y la pérdida de suelo, contribuyendo también al desequilibrio.

Las características geoecológicas de esta unidad y su comportamiento hídrico la identifican como transitoria, ya que recibe pocos aportes de la unidad aledaña, no puede almacenar suficiente agua y sus aportes al nivel freático son medios o bajos.

Conclusiones

El análisis realizado en este trabajo permite relacionar todos los elementos ambientales de manera integral y sistémica, haciendo posible conocer la estructura, funcionamiento y estabilidad ambiental de un geosistema bien definido, como es la cuenca del río Temascaltepec.

Con este enfoque integral ningún elemento se analizó en forma aislada, sino dentro de un proceso continuo de causas y efectos, en el que cada uno se analiza en función de otros; asimismo, el comportamiento de un conjunto de elementos fue descrito en relación con la unidad geoecológica que los contiene, y, finalmente, el conjunto de unidades geoecológicas se definió como parte del sistema hidrográfico que constituye la cuenca del río Temascaltepec.

El resultado de un análisis geoecosistémico, por la visión global que logra, puede considerarse como base o complemento en diversos estudios de prospección, uso y manejo de recursos naturales.

Referencias

- Bertalanffy, V. L. (1989), *Teoría General de los Sistemas. Fundamentos, Desarrollo, Aplicaciones*, FCE, México, 155 pp.
- Buol, S.W., F. D. Hole y R. J. McCracken (1981), *Génesis y clasificación de suelos*, Trillas, México, p. 24.
- Cervantes B., J. (1989), "Modelo geoecosistémico para la prospección, uso y manejo del medio y los recursos naturales", *Boletín*, núm. 19, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 27-38.
- Contreras, A. A. (1939), "Clasificación de Climas", *Revista de Agricultura*, C.A. P. P., México, pp. 1-8.
- De Bolós, C. M. (1992), *Manual de la Ciencia del Paisaje. Teoría, Métodos y Aplicaciones*, Masson, Barcelona, España, pp. 3-11, 47-59 y 123-134.
- García, E. (1988), *Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, México, 245 pp.

- González, M. A. (1987), "Distribución de la vegetación alpina del Nevado de Toluca, México", *Memorias del X Congreso Mexicano de Botánica*, Guadalajara, Jal., México, del 27 de septiembre al 3 de octubre, p. 382.
- Manzo D., L. (1994), "Características morfoclimáticas y estabilidad de la vegetación de la cuenca del río Temascaltepec. Estado de México, tesis de Maestría en Ciencias (Biología), Facultad de Ciencias, UNAM, México, 163 pp.
- Meza S., M. (1976), "Interpretación de los elementos climáticos en la evolución morfológica de la cuenca baja del río Tepeji, Hgo.", tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 120 pp.
- Miranda, F. y X. Hernández (1963), "Los tipos de vegetación de México y su clasificación", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28:29-179.
- Naveh, Z. y A. S. Lieberman (1993), *Landscape Ecology (Theory and Application)*, Springer-Verlag, Nueva York, 360 pp.
- Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México, 433 pp.
- SARH (1971), *Boletín Hidrológico No. 49*, Región Hidrológica Núm. 18 (parcial). Cuenca del Medio y Bajo Balsas, tomo III Datos Hidrométricos de Corrientes de Materiales de Acarreo en Suspensión e Hidrométricos de Vasos, México.
- Sandoval, A. B. (1987), "Actualización y análisis cartográfico sobre usos de suelo y vegetación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México", tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 107 pp.
- Strahler, A. N. (1974), *Geografía Física*, Omega, Barcelona, España, pp. 255-266.
- Urbina, C. (1974), *Manejo de Cuencas Hidrográficas*, Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá, Colombia, 71 pp.
- Vargas, E. (1979), *Fotointerpretación en el manejo de cuencas hidrográficas*, Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá, Colombia, pp. 5-29.

Material Cartográfico:

Cartas: Topográfica, Geológica, Edafológica, Uso Actual del Suelo y Vegetación, y Aguas Superficiales, 1978, escala 1:50 000. INEGI, con clave: E-14-A 45 Tuzantla; E-14-A 46 Valle de Bravo; E-14-A 47 Nevado de Toluca; E-14-A 55 Bejucos; E-14-A 56 Tejupilco; E-14-A 57 Ixtapan.

Cartas: Topográfica, Efectos Climáticos, Geológica, Edafológica, Aguas Superficiales y Uso Actual del Suelo y Vegetación, 1983, escala 1:250 000, INEGI, con clave: E14-1; E14-2; E14-4 y E14-5.