



## **Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla.**

Francisco López-Galindo\*, Daniel Muñoz-Iniestra, Mayra Hernández-Moreno, Alfonso Soler-Aburto, María del Carmen Castillo-López e Ismael Hernández-Arzate

Laboratorio de Edafología, Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO),  
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. de los Barrios #1, Los Reyes Iztacala, 54090, Tlalnepantla, México.

\* lopezgf@servidor.unam.mx

### **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de los parámetros geomorfológicos, materiales parentales, suelos y atributos climáticos en el establecimiento de las comunidades vegetales y en la degradación del suelo a lo largo de una toposecuencia, en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, con la finalidad de aportar información básica para diseñar estrategias de conservación y rehabilitación de sistemas naturales deteriorados del área. La subcuenca tiene una superficie de 270 km<sup>2</sup>, en la que se delimitó un gradiente de 28 km de largo, que incluyó la máxima heterogeneidad de geoformas, litología, suelos y vegetación. Para la prospección preliminar se realizó una fotointerpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales TM de varias bandas. Se realizaron el levantamiento fisiográfico y edafológico, muestreo de suelos en 60 sitios, determinación de los tipos de vegetación, así como la evaluación de los tipos y niveles de degradación de suelos. Se obtuvo la valoración y clasificación taxonómica de suelos, la determinación e inventarios florísticos, elaborándose una base de datos para un análisis multivariado de similitud, y la cartografía de litología superficial, sistemas terrestres y degradación de suelos, a escala 1: 20,000, empleando sistemas de información geográfica. Los resultados muestran que la toposecuencia se compone de siete sistemas terrestres y 13 facetas. El gradiente muestra variaciones de temperatura de 15 a 25 °C y precipitación anual de 370 a 610 mm. Se formó una catena con seis unidades de suelos, pertenecientes a los Grupos Mayores Leptosol, Phaeozem, Regosol y Fluvisol; la mayor parte de ellos sin vocación agrícola. Se determinaron diez tipos de vegetación, que incluyen: Palmar, Matorral Rosulifolio, dos tipos de Izotales, Tetecheras, Mezquital, Matorral Esclerófilo Perennifolio, Selva Baja de Espinas Laterales, Selva Baja Caducifolia y Garambullal. El análisis de similitud mostró que existen tipos de vegetación cuya distribución depende de la altitud, el relieve y la pendiente; otros están influenciados en mayor grado por la precipitación, tipo de suelo y sustrato. De 270 km<sup>2</sup> evaluados, existen 86.52 km<sup>2</sup> afectados por erosión hídrica y eólica. La degradación física afecta a 17.80 km<sup>2</sup>, la química daña a 5.10 km<sup>2</sup>. Los grados extremos de deterioro afectan a 10.17 km<sup>2</sup> que ya son Tierras Malas (*Bad Lands*). Se concluye que la heterogeneidad geomorfológica, geológica y edáfica influyen en la formación de unidades ambientales particulares y en el establecimiento de formas biológicas específicas, que se disponen en forma de gradiente o formando unidades discretas. El análisis integral de toposecuencias aportó información básica acerca de las condiciones ambientales y bióticas de la zona.

Palabras clave: *toposecuencia, degradación, Zapotitlán, terrazas aluviales, Tierras Malas, vegetación.*

### **Abstract**

In the present work we evaluate the effect of parent material and of geomorphological, soil and climatic parameters on the establishment of plant communities and on soil degradation along a toposequence. The study was carried out in the

Zapotitlán Salinas subbasin in order to provide basic information for the design of strategies for the conservation and restoration of deteriorated natural systems in the area. Within the 270 km<sup>2</sup> of the subbasin, a 28 km long transect line was defined, which includes the highest heterogeneity of geoforms, lithology, soils, and vegetation. The preliminary prospection was done by aerial photographs and TM satellite images interpretation. On the field, physiographic and soil surveys were carried out, soil samples were collected in 60 sites, and vegetation types and degree of soil degradation were determined. Analysis and taxonomic classification of soils were carried out. The floristic inventories were complemented with literature reviews and the revision of the herbarium plant collection. A database was produced for a multivariate similarity analysis; and cartography of superficial lithology, land systems and soil degradation, scale 1:20,000, was edited with a Geographic Information System. The results demonstrate a toposequence with seven land systems and 13 land facets. The gradient shows temperature variations from 15 to 25 °C and annual precipitation from 370 to 610 mm. A catena was distinguished with Leptosols, Phaeozems, Regosols and Fluvisols. Their morphogenesis is determined by subsoil type, slope conditions and precipitation levels; most of these soils are not suited for agriculture. A total of ten plant associations were recognized: Palm Groves, Rosette Scrub Forest, two types of Izotal, two types of Thorn Scrub Forest (“*Tetechera*” and “*Garambullal*”), Mesquital forest, Thorn Dry Tropical Forest, Tropical Deciduous Forest, and Mediterranean type vegetation. The similarity analysis shows some vegetation types whose distribution depends on altitude, relief and slope; others depend on precipitation, soil type, and lithology. From 270 km<sup>2</sup> surveyed, 42.8% are stable lands with minimal degradation and little degraded natural vegetation; 86.52 km<sup>2</sup> are affected by hydric and eolic erosion at moderate to severe levels. Physical degradation is affecting 17.80 km<sup>2</sup>, chemical degradation affects 5.10 km<sup>2</sup>, and extreme degradation is found on 10.17 km<sup>2</sup>, corresponding with formation of Bad Lands. We conclude that the geomorphological, geological and pedologic heterogeneity influenced the formation of particular land facets and the establishment of specific biological forms. The integrated toposequence analysis provided basic information concerning the environmental and biotic conditions of the zone.

Key words: *toposequence, land degradation, Zapotitlan, alluvial terraces, Bad Lands, vegetation.*

## 1. Introducción

La conservación de la diversidad florística de los sistemas naturales y la restauración de zonas degradadas son elementos prioritarios para la continuidad de los procesos ecológicos y el aporte continuo de recursos para las sociedades (FAO, 1997). Sin embargo, previo a la determinación de las acciones a realizar, es necesario considerar que el manejo de especies por si solo no es suficiente para lograr su continuidad, ya que los patrones de establecimiento y distribución de la vegetación están determinados por varios procesos vinculados por una enorme red de relaciones complejas. La naturaleza, así como la importancia relativa de estos procesos, varía a través de los rasgos fisiográficos o heterogeneidad de los paisajes y el tiempo (de Blois *et al.*, 2001). En variados ecosistemas se ha observado que las formas de establecimiento y desarrollo de la vegetación reflejan intrincadas interacciones entre las características del sitio, el régimen de disturbio natural y la configuración del paisaje (Bergeron y Leduc, 1998; Flannigan *et al.*, 1998). En un sitio de alta heterogeneidad física, los factores ambientales determinan los patrones vegetacionales, así como la biodiversidad y riqueza específica (Mueller-Dombois y ElleMBERG, 1974) y la influencia de cada factor depende de la escala de observación.

La diversidad de especies y las comunidades vegetales

pueden exhibir considerable heterogeneidad debido a la influencia de las condiciones climáticas, las diferencias geomorfológicas, altitud y material parental del suelo (Milne *et al.*, 1999; Milne y Hartley, 2001). Adicionalmente, estos parámetros afectan su estabilidad, haciéndolas más sensitivas que otras en términos de resistencia y resiliencia (Mitchell *et al.*, 1999), por lo que, generalmente las comunidades en ambientes de estrés son más frágiles. Múltiples investigaciones han demostrado que las comunidades vegetales de las zonas áridas son altamente vulnerables y se encuentran en continuo riesgo de deterioro (Valiente-Banuet, 1991; Dávila-Aranda *et al.*, 1993; FAO, 1994).

Una forma rápida de caracterización y evaluación de los elementos ambientales y bióticos de una región es el análisis integral de toposecuencias, el cual aporta información confiable para determinar estructura, procesos e interrelaciones que determinan la dinámica y estado de los sistemas naturales (Gobin *et al.*, 1998); de igual forma puede aportar información acerca de la diversidad de suelos, procesos de degradación y tendencias en la evolución de los paisajes (Sommer y Schlichting, 1997; Huggett, 1998), así como del impacto que tienen las actividades humanas en la fragmentación de los ecosistemas y la biota en general (Bowers y Dooley, 1999).

En un principio, las toposecuencias fueron definidas como perfiles topográficos que identifican el relieve de una

zona a lo largo de una línea a través de un mapa (Strahler y Strahler, 1992) y que en la realidad corresponden a secciones espaciales de una región dispuestas en una secuencia o dirección determinada. Más recientemente, el concepto toposecuencia se ha empleado para entender las relaciones entre el suelo y la cobertura terrestre en una dimensión espacial. El estudio de éstas se ha seleccionado para ejemplificar variaciones de las condiciones ambientales a lo largo de una zona, pudiendo ser aplicado a diferentes niveles o escalas del terreno. Gobin *et al.* (2000) definen microtoposecuencias en el nivel geomorfológico de facetas, mesotoposecuencias a nivel geoforma y macrotoposecuencia a nivel geoforma compleja, que puede ser equivalente al Sistema Terrestre definido por Ortiz-Solorio y Cuanalo de la Cerda (1978) y por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1993). El empleo del análisis de las toposecuencias ha sido muy útil porque conjunta los rasgos ambientales sobresalientes característicos de una zona y ayuda a establecer las posibles interacciones entre los factores físicos y bióticos, por ejemplo la relación suelo-vegetación, además de las formas de uso de los recursos locales. El método de muestreo estratificado a lo largo de toposecuencias es factible para caracterizar áreas cuando existen pocos datos y provee una alternativa costo-efectividad para inventarios convencionales que requieren una alta densidad de observaciones (Ortiz-Pérez, 1990; McKenzie y Austin, 1993). Existen muchas disciplinas que emplean esta metodología para el análisis de gradiente a lo largo de un paisaje: para trazar rutas de muestreo y representar secciones geológicas transversales (Compton, 1985; Skinner y Porter, 1987, 2000); en la interpretación morfotectónica (Ortiz-Pérez, 1990); para establecer relaciones geomorfología-suelos-vegetación (Eyre, 1979); definir secuencias de tipos de suelos, conocidos como Catenas (Engel *et al.*, 1996; Sommer y Schlichting, 1997); en la morfoedafología, como una forma sencilla e integrativa de información geomorfológica, de génesis de suelos y otras relaciones ambientales (Geissert y Rossignol, 1987; Bockheim y Gennadiyev, 2000; Park *et al.*, 2001; Phillips, 2001; Applegarth y Dahms, 2001). En ecología vegetal tradicionalmente se ha aplicado a estudios de distribución en gradiente de formas de vida, formas de crecimiento (Raunkiaer, 1934; Richards, 1952), distribución de la vegetación (Danserau, 1951), esquematización de rasgos estructurales de comunidades vegetales y estudios sinicológicos (Cottan y Curtis, 1956; Whittaker, 1975; Braun-Blanquet, 1979), investigaciones geobotánicas (González-Quintero, 1968) y de series ecológicas (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974). Estos transectos son empleados para describir la vegetación y sus cambios a través de variaciones en el paisaje o límites entre comunidades (Kent y Coker, 1995), y para determinar la relación entre las formas del terreno y el gradiente altitudinal en la distribución de la vegetación (Valiente-Banuet *et al.*, 2000). Además, se ha empleado para explicar procesos de degradación de suelos (Gobin *et al.*, 2000), procesos de

manejo de tierras y ordenamiento ecológico comunitario (Curiel-Casares y Espinosa-Gasca, 1997) y en estudios de uso del territorio (Hernández, 1985).

Por otra parte, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, situado en el centro de México, es considerado como un centro de megadiversidad y endemismo a nivel mundial por la *International Union for the Conservation of Nature* (IUCN) (Dávila, 1997). Esta región, con una extensión de 10,000 km<sup>2</sup>, es reconocida como una de las zonas áridas con mayor diversidad de Norteamérica y con mayor cantidad de recursos vegetales del país (Casas *et al.*, 2001). La vegetación del área se ha denominado como matorral xerófilo con dominancia de cactáceas columnares (Rzedowski, 1978; Valiente-Banuet, 1991; Valiente-Banuet y Ezcurra, 1991; Dávila-Aranda *et al.*, 1993; Valiente-Banuet *et al.*, 1996a, 1996b). La flora de este lugar fluctúa entre 2,700 y 3,000 especies de plantas vasculares de las cuales 30% son endémicas de la región (Villaseñor *et al.*, 1990; Dávila-Aranda *et al.*, 1993). Dentro de este territorio se encuentra el Valle de Zapotitlán Salinas que, entre otras cosas, es un sitio que expone ejemplos vivos de la gran diversidad biótica de zonas secas, sus múltiples formas biológicas y variadas expresiones de estrategias de adaptación. En general, a sus asociaciones se les confiere un carácter de exclusividad y otorga una gran importancia biogeográfica, a tal grado de que existe gran cantidad de sus especies en *status* de endémicas (Valiente-Banuet *et al.*, 2001). De igual forma, cuenta con una amplia historia cultural, que desde tiempos prehistóricos hasta la actualidad ha caracterizado la zona. Sin embargo, presenta una problemática ambiental bien definida: baja productividad, desertificación, alteración de los sistemas naturales, desequilibrio en los procesos e interacciones ecológicas, disminución y pérdida de la biodiversidad y de los servicios ecológicos, aunado a altos niveles de pobreza y marginación de múltiples comunidades humanas (SEMARNAP, 1996).

El Valle de Zapotitlán Salinas ha sido estudiado desde hace muchos años y por diferentes disciplinas. Con relación a investigaciones geológicas y paleontológicas destacan por su importancia los trabajos de Félix y Lenk (1891) y Villada (1905) acerca de la geología de Tehuacán. Los estudios paleontológicos de esta región son numerosos, entre ellos se puede mencionar el trabajo sobre nerineidos de Félix y Lenk (1891); Aguilera (1906) publica una lista de invertebrados fósiles de la región de San Juan Raya; Müellieried (1934) registra las especies de nerineas descritas por Félix y Lenk en San Antonio Texcala y San Juan Raya; Alencáster de Cserna (1956) realizó el estudio de los pelecípodos y gasterópodos de San Juan Raya; Calderón-García (1956) detalla la estratigrafía y geología estructural de la zona, dando énfasis a las localidades fosilíferas de las Formaciones Zapotitlán y San Juan Raya; Buitrón (1970) y Buitrón y Barceló-Duarte (1980) describen la diversidad de equinoides y de nerineidos (Mollusca-Gastropoda) del Cretácico Inferior de la región de San Juan Raya, correspondientes a las Formaciones de Zapotitlán

(Barremiano), Agua del Cordero (Barremiano y Aptiano), Agua del Burro y San Juan Raya (Aptiano), reportándose 12 especies de nerineidos.

Barceló-Duarte (1978) describió la estratigrafía y petrografía detallada del área de Tehuacán y San Juan Raya. García-Oliva (1991) llevó a cabo un análisis de las unidades del paisaje en la cuenca del río Zapotitlán y su relación con la vegetación. Aguilera-Herrera (1970) describió los suelos de Tehuacán. Los trabajos más recientes sobre aspectos del medio físico en la zona son el realizado por Neri-Gómez (2000) que desarrolla una caracterización hidrológica de la cuenca baja del río Zapotitlán; Barrera-Cabrera (2001) que hace una regionalización fisiográfica; y García-Martínez (2002) que investigó los suelos de las terrazas aluviales de la cuenca.

Los estudios florísticos, fitogeográficos y de vegetación (Smith, 1965; Ledezma, 1979; Zavala-Hurtado, 1980; Goytia y Granados, 1981; García-Oliva, 1991; Villaseñor *et al.*, 1990; Dávila-Aranda *et al.*, 1993; Osorio-Betancourt, 1996, Dávila, 1997; Valiente-Banuet y Arizmendi, 1998; Valiente-Banuet *et al.*, 2001) reflejan la gran diversidad florística y cantidad de endemismos. Las condiciones ambientales presentes han hecho que muchas especies hayan encontrado en Tehuacán un gran centro de dispersión (Valiente-Banuet y Arias, 1997). La información disponible señala que el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, incluyendo Zapotitlán, está constituido por un mosaico de comunidades vegetales cuya presencia está íntimamente ligada a diferencias tanto de clima como en heterogeneidad de sustratos, así como a la distribución de geofomas asociadas a la evolución del paisaje (Osorio-Betancourt *et al.*, 1996; Pérez *et al.*, 1997). Finalmente, por la elevada diversidad de especies de la zona, es de gran importancia analizar la distribución de las principales asociaciones vegetales, así como la diversidad de especies entre las comunidades, como una forma de evaluar el papel de la heterogeneidad ambiental en la explicación de tal diversidad (Valiente-Banuet *et al.*, 2001). Así mismo, es necesario evaluar los elementos geográficos y los procesos de degradación ambiental con el propósito de aportar información que permita entender la dinámica de la interrelación del ambiente físico con la riqueza y distribución de la vegetación.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de los rasgos geomorfológicos, materiales parentales, tipos de suelos y parámetros climáticos en el establecimiento de las comunidades vegetales y en la degradación del suelo a lo largo de una toposecuencia, con la finalidad de contar con información confiable que sirva de base para diseñar estrategias de conservación y manejo adecuado de los recursos de la zona.

## 2. Descripción del área de trabajo

El Valle de Zapotitlán Salinas se encuentra enclavado en la porción occidental del Valle de Tehuacán-Cuicatlán,

al sureste del Estado de Puebla y zonas adyacentes al noroeste de Oaxaca. Limita al este con las Sierras de Atzingo y Miahuatpec, al norte con los cerros Chacateca y Pajarito, al oeste con los cerros Gordo y Oate, y al sur con los cerros Yistepec y Acatepec (Osorio-Betancourt, 1996). Tiene una superficie aproximada 270 km<sup>2</sup> y se ubica entre los 18° 12' y 18° 24' de latitud norte y entre los 97° 24' y 97° 36' de longitud oeste (Figura 1), con un rango altitudinal de 1,460 a 2,600 msnm (INEGI, 1984a, 1984b). Pertenecer a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca, dentro de la región de la Alta Mixteca (INEGI, 1981) y a la provincia florística del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Rzedowski, 1978). Desde el punto de vista edáfico, los suelos son someros y pedregosos en la mayor parte del área, con diferentes niveles de alcalinidad y salinidad producto de la influencia de los diferentes sustratos geológicos presentes en el sitio. Las principales unidades de suelos reportadas son: litosoles, cambisoles cálcicos y xerosoles cálcicos derivados de evaporitas del Cretácico Inferior y Medio (Dávila, 1997); García-Martínez (2002) determinó regosoles y fluvisoles calcáricos formados por materiales transportados derivados de sedimentos aluviales.

La clasificación del clima de acuerdo con el sistema de Köppen modificado por García (1973) es seco semicálido, con lluvias de verano (BSohw), con poca oscilación térmica que varía entre 5 y 7 °C, y la temperatura media fluctúa

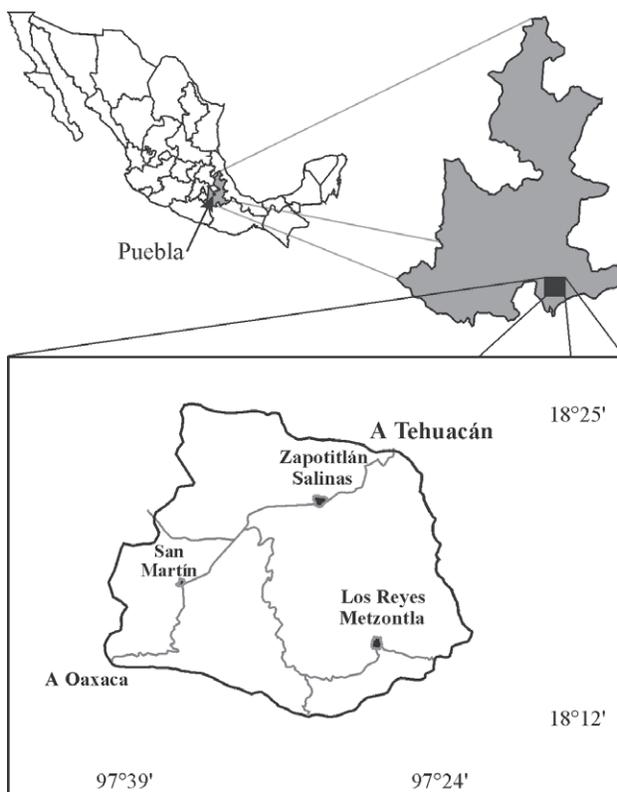


Figura 1. Ubicación del la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla.

entre 17.6 y 23.7 °C. El mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano, con régimen de lluvias de verano, presencia de una canícula a mitad del período de lluvias y con una precipitación media anual de 412.4 mm. La cuenca se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 28 y pertenece en su mayor parte a la Cuenca Alta del Río Papaloapan; al mismo tiempo está insertada en la Subcuena Fluvial del Río Salado, misma que pertenece al Río Tehuacán (INEGI, 1984b). Además la cuenca Zapotitlán está dividida naturalmente en dos subcuencas: Santa Ana y Zapotitlán (Neri-Gámez, 2000e).

Por último, la comunidad vegetal dominante en la zona es el matorral xerófilo, en el que predominan las tetecheras por la presencia de *Neobuxbaumia tetetzo* (tetecho), complementado con otros elementos florísticos importantes tales como: *Prosopis laevigata* (mezquite), *Fouquieria formosa* (ocotillo), *Cercidium praecox* (palo verde) y *Beaucarnea gracilis* (sotolín) (Valiente-Banuet y Arizmendi, 1998).

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Definición de estructuras geomorfológicas y selección de la toposecuencia

Para realizar el reconocimiento fisiográfico, geológico, geomorfológico e hidrológico, se emplearon las técnicas de análisis de antecedentes, revisión cartográfica, fotointerpretación de fotografías aéreas pancromáticas de escala 1:20,000 y clasificación de imágenes satelitales LANDSAT-TM de diversas bandas, procesados en los sistemas de información geográficos ILWIS versión 3.2 y Arc View versión 3.1.

La toposecuencia se seleccionó y trazó en función de la complejidad geomorfológica, ubicándola dentro del nivel de mesotoposecuencia de acuerdo con el criterio de Gobin *et al.* (2000), reuniendo los sitios con mayor heterogeneidad de estructuras geomórficas, diversidad litológica y edáfica, degradación de suelos, tipos de vegetación, uso del suelo y estado de conservación más sobresalientes de la zona de estudio.

#### 3.2. Levantamientos ambientales en campo

El trabajo incluyó una fase de prospección y levantamientos de campo, durante al cual se visitaron las unidades geomorfológicas específicas de estudio, previamente seleccionadas mediante el análisis cartográfico y de fotointerpretación. Cada sitio de muestreo se georreferenció y caracterizó individualmente en base a sus componentes geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, edáficos, tipo de vegetación con especies dominantes fisonómicas, uso del suelo y grado de deterioro ambiental.

Particularmente, la regionalización fisiográfica y la

delimitación de las unidades geomorfológicas se hicieron aplicando los criterios y técnicas propuestas por Ortiz-Solorio y Cuanalo de la Cerda (1978) y por SEDESOL-INE (1993). Para el estudio hidrológico, se empleó la metodología propuesta por Sheng (1992), que parte del análisis del patrón de escorrentía, delimitando las subcuencas y microcuencas de captación. La caracterización climática se realizó por medio del análisis de los datos climáticos obtenidos durante 30 años de registros de la estación meteorológica localizada en la población de Zapotitlán (Neri-Gámez, 2000). Además, se retomaron los datos de atributos climáticos determinados por Téllez-Valdés y Dávila-Aranda (2003), quienes emplearon el método de modelaje bioclimático aplicando el programa BIOCLIM, el cual determina superficies climáticas interpoladas matemática y estadísticamente estimadas de los datos de estaciones meteorológicas estándar. Las superficies climáticas o archivos digitales obtenidos fueron generados usando el método de suavizado del paquete ANUSPLIN; los archivos digitales resultantes incluyen valores de promedios mensuales de temperatura y precipitación de más de 6,500 estaciones. Con esta información se derivaron perfiles bioclimáticos basados en los límites de 19 parámetros que comprendieron, entre otros, temperatura promedio anual, oscilación diurna promedio, isothermalidad, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del periodo más cálido, precipitación anual, precipitación del cuarto mes más húmedo, etc., y se generó un archivo grid de 30 arc segundos (0.00083°, aproximadamente 1 km<sup>2</sup>) de resolución, plasmado en cartografía digital obtenida empleando el sistema de información geográfica Arc View versión 3.1.

Para obtener la información edafológica, se siguieron los métodos propuestos por Ortiz-Solorio y Cuanalo de la Cerda (1981), y se inició con una fotointerpretación hipotética de los grupos de suelo, a través del reconocimiento de las unidades edáficas presentes. Se eligieron los lugares más adecuados para la verificación de campo, la apertura de 60 calicatas y toma de muestras, haciendo énfasis en la selección de sitios ecológicamente conservados o parcialmente deteriorados y otros calificados como perturbados, pertenecientes a una misma unidad de paisaje. La identificación de los grupos mayores y unidades de suelo se realizó siguiendo el criterio de FAO-UNESCO (1998).

Los tipos de vegetación se determinaron aplicando los criterios de Miranda y Hernández (1963) y Valiente-Banuet *et al.* (2001), realizando un inventario de las especies fisonómicamente dominantes, tomando como unidades de muestreo sitios de 100 x 100 m en cada una de las unidades geomorfológicas identificadas. La información e inventarios florísticos se complementó a través de la consulta de los trabajos de Dávila-Aranda *et al.* (1993), Osorio-Betancourt *et al.* (1996), Valiente-Banuet *et al.* (1996a, 1996b, 2001), Oliveros-Galindo (2000) y Casas *et al.* (2001) y con corroboraciones directas mediante la revisión de ejemplares

botánicos de la colección de la flora de Tehuacán–Cuicatlán de la Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO) de la FES–Iztacala–UNAM.

Para definir los tipos y grados de deterioro se tomó el criterio del sistema “*Global Assessment of the Current Status of Human-Induced Soil Degradation (GLASOD)*” (Oldeman, 1988), complementado con la guía “*The Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD)*” (van Linden y Oldeman, 1997).

### 3.3. Análisis de información en laboratorio e integración de bases de datos

Una vez tomados los datos y muestras en el campo se procedió a efectuar una fase de análisis y procesamiento de muestras de suelos, evaluando las propiedades físicas y químicas acorde con las técnicas analíticas de laboratorio citadas en Muñoz *et al.* (2001). Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Edafología y la sistematización de datos en el Laboratorio de Recursos Naturales de la UBIPRO. La elaboración de los mapas temáticos a escala 1:20,000 y de las bases de datos se hicieron con el SIG ILWIS versión 3.2. Finalmente, se elaboró una matriz de datos con la información de parámetros ambientales e indicadores de degradación a la que se le aplicó un análisis multivariado de agrupación empleando el software NTSYS versión 2.0.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Análisis de la mesotoposecuencia y estructura geológica

La toposecuencia seleccionada se dispone a lo largo de un trayecto con longitud de 28 km, en dirección NO–SE, tal como se muestra en la Figura 2, y se encuentra constituida por 13 unidades ambientales o facetas que forman parte de siete Sistemas Terrestres, de un total de nueve identificados para toda la subcuenca, dispuestos a lo largo del gradiente, conforme al trazo realizado; estos sistemas son: Cipiapa, Agua del Burro, Zapotitlán, Valle Aluvial, Acatepec, Cerro Grande y Metzontla. La Figura 3 muestra la disposición espacial de los sistemas terrestres determinados en la zona.

#### 4.1.1. Clasificación y características de las unidades ambientales de la toposecuencia

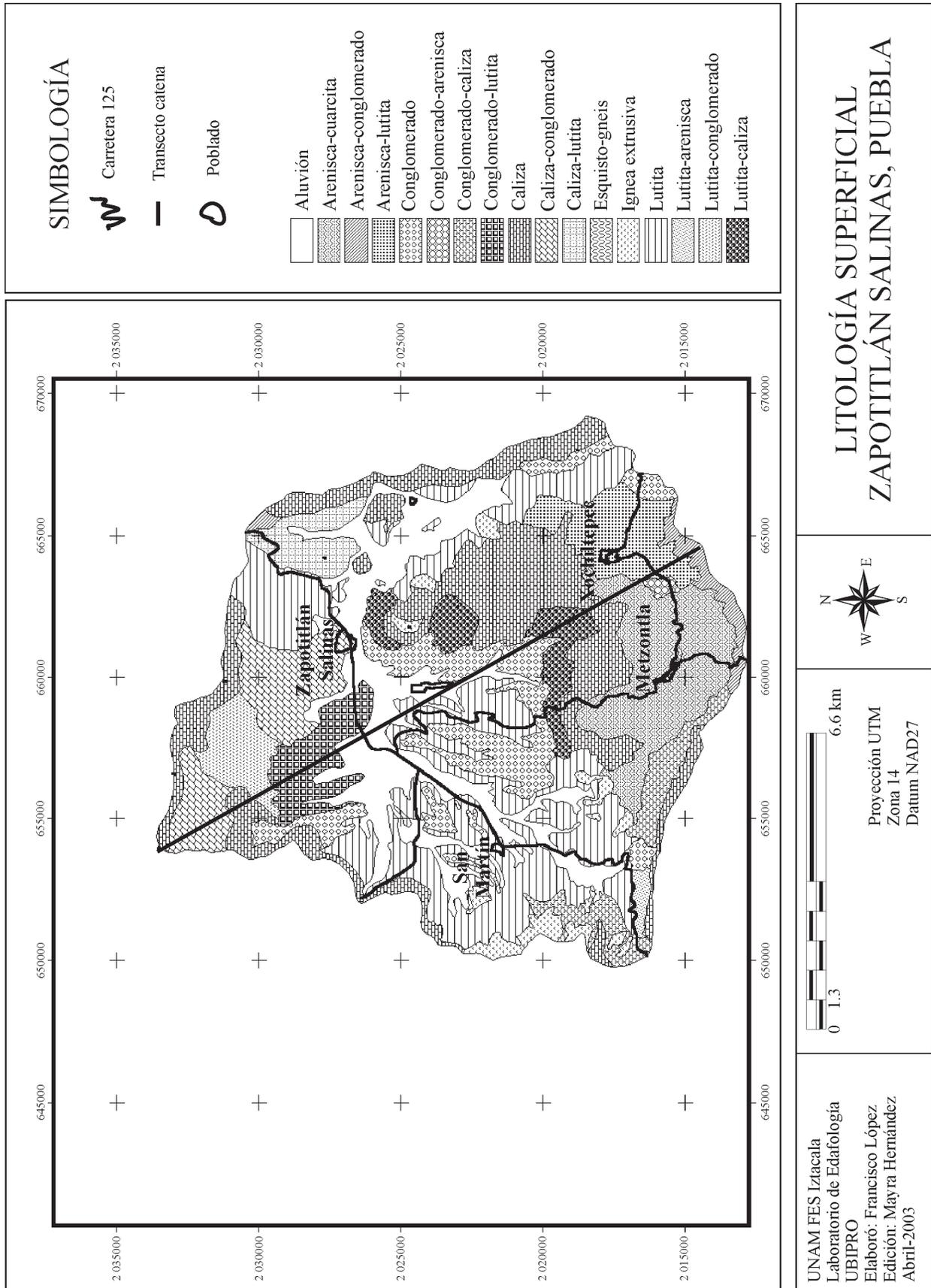
Las Figuras 4A y 4B muestran la toposecuencia y disposición de las unidades ambientales identificadas en la subcuenca, las características de sus elementos formadores, y sus rasgos físicos y bióticos sobresalientes. Se identificaron 13 unidades ambientales o facetas (F) con las características siguientes:

*Zona de Escarpe y Cantiles (F1).* Es el área localizada

en las partes más elevadas de la cuenca, en un rango de altitud de 2,400 a 2,600 msnm, perteneciente al sistema terrestre Cipiapa, con pendientes máximas de 80%. Está constituido por calizas plegadas de origen marino pertenecientes a la formación Cipiapa, que determinan el límite natural, o parteaguas, de la cuenca de Zapotitlán en su porción norte. Los suelos dominantes que se encuentran en el sitio son Feozem calcárico y Leptosol réndzico, de origen calcáreo, poco desarrollados, de color gris, textura arenosa, medianamente profundos, ricos en materia orgánica y de reacción básica, muy susceptibles a la erosión hídrica. La temperatura media anual es de 15.4 a 16.0 °C y la precipitación anual de 530 a 560 mm. El tipo de vegetación que se desarrolla en la unidad es Palmar de *Brahea nitida* con *Dasyllirion serratifolium* y *Nolina* sp., hacia la parte oriental se puede encontrar asociado con Matorral Esclerófilo Perennifolio medianamente conservado. La faceta presenta un estado de degradación muy elevado por los procesos de erosión hídrica en grado severo, que han deteriorado los suelos, disminuyendo sus horizontes e incluso desapareciéndolos. A pesar de ser lugares con pendientes pronunciadas es factible encontrar actividad pecuaria, con ganadería extensiva de caprinos.

*Cuestas (F2).* Están distribuidas en un rango de altitud de 2,200 a 2,400 msnm formando parte del sistema terrestre Agua de Burro. Están constituidas por calizas marinas fosilíferas, falladas y plegadas, con relieves rectos, pendientes pronunciadas mayores que 40%; son el límite natural de la Subcuenca Santa Ana Teloxtoc y la Subcuenca Zapotitlán. La temperatura media anual es de 16 a 16.7 °C, con precipitación anual de 490 a 530 mm. Los suelos presentes corresponden a Regosol calcárico, poco profundos, de color café grisáceo, franco arenosos, ricos en materia orgánica y reacción ligeramente alcalina. La vegetación que se desarrolla en la unidad es Matorral Rosulifolio de *Dasyllirion serratifolium* y *Nolina* sp., con *Yucca periculosa*. El estado de conservación indica bajo nivel de degradación. Las actividades productivas que se realizan en la unidad corresponden a la ganadería extensiva de caprinos y extracción de calizas.

*Laderas cóncavas (F3).* Presentan un rango de altitud de 2,000 a 2,200 msnm y forman parte del sistema terrestre Zapotitlán. La litología se compone de conglomerados y lutitas marinas de la formación Zapotitlán, altamente plegadas y falladas, indicando un alto grado de tectonismo regional, muy fragmentadas, formando bancos grandes de material regolítico; los relieves son cóncavos y presentan 60% de pendiente. La temperatura media es de 16.7 a 17.3 °C y la precipitación anual de 410 a 450 mm. Los suelos son de Regosol calcárico, someros, de color pardo, con textura franco arenosa, contenidos medios de materia orgánica y reacción básica. Sobre la unidad existe continuidad del Matorral Rosulifolio mencionado, altamente disperso, con áreas grandes desprovistas de cobertura vegetal, por lo que el estado de degradación es muy elevado y la erosión hídrica recurrente es muy severa. En estos sitios



se practica la agricultura de temporal y ganadería extensiva.

*Laderas rectas* (F4). Están distribuidas en un rango de altitud entre 1,700 y 1,900 msnm y forman parte del sistema Zapotitlán. Presentan relieves rectos y pendientes de 25%; con litología de conglomerados calcáreos, que al parecer formaron parte de un gran piedemonte. La temperatura media varía entre 17.3 y 17.9 °C y la precipitación media es de 450 a 490 mm. El tipo de suelo determinado fue Regosol calcárico, somero, de color café grisáceo, textura franca, contenidos medios de materia orgánica y reacción alcalina. El tipo de vegetación presente corresponde a un Izotal de *Yucca periculosa*, en asociación con matorrales espinosos de *Mimosa* sp. La poca inclinación del terreno favorece el establecimiento de agricultura de granos básicos, sin sistemas de conservación, por lo que son sitios con problemas de erosión hídrica, que ha provocado la formación de grandes cárcavas y deformación del relieve.

*Lomas residuales* (F5). Son unidades separadas establecidas entre 1,600 y 1,800 msnm, pertenecientes al sistema Zapotitlán. Se originaron por plegamiento y constituyen anticlinales expuestos de calizas y lutitas marinas, altamente erosionados, lo cual les confiere forma de domos, con pendientes del 25%. La temperatura media anual es de 18.6 a 19.2 °C y la precipitación anual de 410 a 450 mm. Los suelos identificados corresponden a Feozem calcárico de desarrollo incipiente, o con horizontes poco evolucionados, de colores claros y café pardo, de textura franco arenosa, con contenidos altos de materia orgánica, también ligeramente alcalinos y muy pedregosos. Sobre de éstos se desarrolla vegetación del tipo de las Tetecheras, con dominancia de *Neobuxbaumia tetetzo* y *N. mezcalaensis*. Esta unidad se encuentra en estado de degradación media.

*Loma con mesas* (F6). Ubicada en un rango de altitud de 1,600 a 1,700 msnm, conforma una faceta diferente del sistema Zapotitlán, con pendientes del 15%. Son el resultado del plegamiento de lutitas marinas, con intercalaciones de areniscas finas, altamente fragmentadas e intemperizadas. La temperatura media anual oscila entre 19.2 y 19.8 °C y la precipitación entre 410 y 450 mm anuales. La unidad de suelo representativa es el Feozem calcárico, poco profundo, de color pardo, textura franca, pedregoso, con contenidos medios y bajos de materia orgánica, y con pH ligeramente alcalino. La vegetación existente corresponde a un Izotal de *Beaucarnea gracilis*. La existencia de agroecosistemas de granos básicos temporales y la actividad pecuaria le otorgan la categoría de sitio degradado, con problemas de pérdida de nutrientes y erosión hídrica.

*Lomeríos* (F7). Distribuidos entre 1,500 y 1,600 msnm, constituyen también una variante geomorfológica del sistema Zapotitlán y, de igual forma, su estructura es consecuencia del plegamiento de lutitas marinas, presentando pendientes de 10%. La temperatura media fluctúa entre 19.8 y 25 °C y la precipitación entre 410 y 450 mm anuales. Los suelos que se presentan son jóvenes sin horizontes maduros y corresponden a Feozem calcárico,

poco profundos, de colores claros, textura franco arenosa, con contenidos bajos de materia orgánica y reacción alcalina. El uso del suelo es principalmente la agricultura de temporal de maíz y frijol; y son tierras con degradación química por pérdida de nutrientes. Sin embargo, en algunos sitios se presenta vegetación de Matorrales Espinosos de *Prosopis laevigata*, *Mimosa* sp. y *Cercidium praecox*.

*Terrazas Aluviales* (F8). Se localizan en la parte media de la cuenca, a una altitud promedio de 1,480 msnm, y constituyen parte del sistema terrestre Valle Aluvial, que es el más dinámico de la subcuenca. Están formadas por sedimentos recientes, de relieve ondulado y pendientes menores que 2%. Su naturaleza litológica es variada e incluye elementos clásticos derivados del intemperismo y erosión de calizas, lutitas y areniscas, así como de materiales ígneos basálticos y metamórficos del tipo de esquistos micaceos y gneises. Se determinaron temperaturas medias entre los 19.8 y 25 °C y una precipitación entre 370 y 410 mm anuales. Las unidades de suelos identificadas son Fluvisol y Regosol calcáricos, profundos, formados por transporte y depósito de sedimentos fluviales, los cuales presentan un horizonte A incipiente y una secuencia de horizontes C, de grosores y texturas variados, dominando las clases texturales franco arenosas, con contenidos medios de materia orgánica, con reacción neutra o ligeramente alcalina. La vegetación dominante corresponde a Mezquital y Selva Baja de *Prosopis laevigata* y *Cercidium praecox*. Los sistemas ecológicos presentan estados de conservación que varían entre los mínimamente deteriorados hasta los muy degradados.

*Mesas* (F9). Están distribuidas entre 1,500 y 1,600 msnm, con pendientes menores a 15%. Están formadas por conglomerados dispuestos en estratos horizontales, que forman parte del sistema terrestre Acatepec, encontrándose adyacentes al Valle Aluvial, muy cerca de la región centro-sur de la cuenca. La temperatura media oscila entre 19.8 y 25 °C y la precipitación anual entre 410 y 450 mm. Los suelos que se encuentran en estos sitios corresponden a Leptosol lítico, con un horizonte superficial muy delgado, de color pardo, textura franco arcillosa, con contenido alto de materia orgánica y de reacción alcalina. La vegetación que se encuentra en estas unidades corresponde a Tetecheras de *N. tetetzo* y *N. mezcalaensis*, mezclada con matorrales espinosos de *Prosopis* y *Mimosas* spp., con poco grado de deterioro. Las actividades productivas principales son la ganadería y la colecta de vegetales con propiedades energéticas, además de extracción de caliza.

*Laderas rectas* (F10). Se encuentran en un gradiente de altitud que va de 1,600 a 1,980 msnm, y pertenecen al sistema Zapotitlán. Se caracterizan por ser el resultado de plegamiento de calizas con lutitas, las cuales se encuentran sobreyaciendo discordantemente a las Formaciones Mapache y Matzitzí. La temperatura media determinada para esta unidad varía entre 17.3 y 17.9 °C y su precipitación es de 570 a 610 mm. Por su relieve y pendiente del 60%, los suelos que presentan son del tipo Leptosol réndzico y

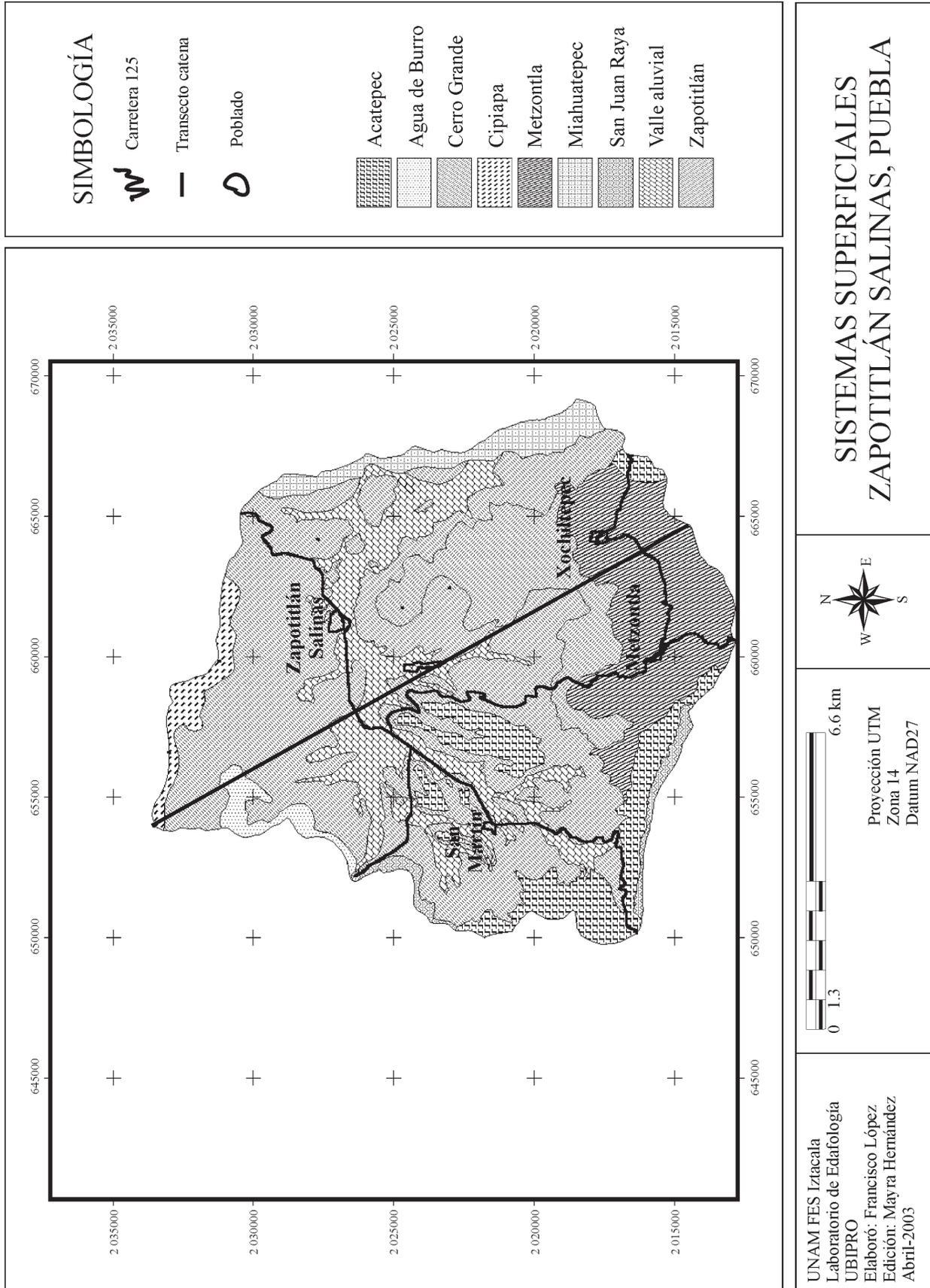


Figura 3. Delimitación de los sistemas terrestres presentes en la zona.

L. lítico, y corresponden a suelos someros, calcáreos, de color oscuro, textura franca, ricos en materia orgánica y nutrientes, con reacción alcalina. La vegetación que soporta la unidad es un mosaico de formas biológicas que incluyen Matorral Rosulifolio de *Dasyllirion* sp. y Tetecheras de *Neobuxbaumia macrocephala*. Los efectos de la actividad minera y pecuaria hacen que esta unidad se califique como degradada, con problemas severos de erosión hídrica y eólica.

*Escarpe recto* (F11). Se localiza entre 1,980 y 2,300 msnm y pertenece al sistema terrestre Cerro Grande. Se caracteriza por ser el producto de actividad tectónica que trajo como consecuencia el plegamiento de grandes estratos calcáreos, formando anticlinales y sinclinales, así como por el afloramiento de grandes cuerpos intrusivos. El terreno presenta pendientes muy pronunciadas que superan el 100%. La temperatura media es de 15.4 a 16 °C y la precipitación fluctúa entre 610 y 650 mm. Los suelos corresponden a Leptosol réndzico, de color oscuro, textura franco arenosa, ricos en materia orgánica y de reacción básica, con alta pedregosidad superficial. Hacia las partes más altas se encuentra vegetación de Matorral Esclerófilo perennifolio, donde destacan especies del género *Quercus*, Palmares de *Brahea nitida* y Matorral rosulifolio de *Dasyllirion* con *Nolina*. El grado de perturbación es bajo.

*Ladera recta* (F12). Se encuentra en un rango de altitud que varía entre 1,800 a 2,100 msnm y pertenece al sistema terrestre Metzontla. Presenta pendientes del 40%, y se caracteriza por reunir materiales litológicos muy diversos, que se pueden agrupar en: rocas metamórficas del tipo de cuarcitas, esquistos, y gneises del Complejo Basal Acatlán, que son los elementos de mayor antigüedad en el área; y lechos rojos que sobreyacen concordantemente a lutitas carbonosas y areniscas finas de la formación Matzitzí. La temperatura media determinada es de 16.0 a 16.7 °C y la precipitación de 490 a 530 mm. Los suelos son asociaciones de Regosol éútrico con Leptosol, de color pardo rojizo, con contenido bajo en materia orgánica y reacción neutra. Es notorio el cambio de clima, característico de los trópicos secos, lo cual explica la presencia de Selva Baja Caducifolia mezclada con Garambullales de *Myrtillocactus geometrizans*. La actividad minera y la agricultura de secano han hecho que esta zona sea calificada como degradada.

*Cantiles y Mesas* (F13). Se disponen entre 1,800 y 2,200 msnm, con pendientes superiores al 40%. De igual forma pertenecen al sistema Metzontla, y están formados por secuencias de arenisca con lutita carbonosa de la formación Matzitzí subyacentes a lechos rojos y conglomerados. La temperatura media anual es de 16.0 a 16.7 °C y la precipitación oscila entre 530 y 570 mm anuales. Los suelos identificados son del tipo Regosol éútrico, de color café rojizo, de textura franco arenosa, contenidos medios de materia orgánica y reacción neutra. La mayor parte de la unidad se emplea para la agricultura de temporal, alternada con ganadería extensiva que se realiza en sitios de pastizal inducido. El sitio es calificado como de degradación alta.

#### 4.2. Clasificación y características de los suelos representativos

En el área estudiada se identificaron seis unidades de suelo de acuerdo al sistema FAO-UNESCO (1998): Leptosol lítico, L. réndzicos, Feozem calcárico, Fluvisol calcárico, Regosol calcárico y R. éútrico, con las siguientes características:

*Leptosoles líticos*. Se reconocen por su escasa profundidad (<15 cm), por su composición mineralógica heredada del material parental, el cual consiste principalmente en conglomerados calcáreos y lutitas, y por su escaso desarrollo morfológico. Se caracterizan por ser poco profundos y por tener una coloración café (10YR 5/5) en el horizonte superficial. Muestran contenidos de materia orgánica que varían de bajos (menos que 2%) a altos (4.9%), debido a las diferentes formas de acumulación de la materia, favorecida por la pedregosidad y presentan reacción alcalina. La textura es franco arcillosa para el horizonte superficial y franco arcillo limosa para el horizonte subsuperficial. De estructura variable entre granular a poliédrica subangular moderadamente desarrollada, poliédrica angular y laminar desarrollada; de compactación ligera, con raíces de frecuentes a escasas. Conforme aumenta la profundidad se presentan intrusiones de roca de diferentes tamaños; la reacción a los carbonatos varía entre ligera y muy violenta. Estos suelos soportan una vegetación de Tetecheras, destacando las especies *Neobuxbaumia tetetzo* y *Cephalocereus columna-trajani* y en otros sitios sostienen vegetación de selva baja perennifolia con espinas laterales. Entre las principales limitantes que tienen estos suelos están la elevada pedregosidad superficial, el relieve accidentado, la alta susceptibilidad a la erosión, la formación de cárcavas, la falta de agua, la elevada inestabilidad con alto riesgo al colapsamiento y deslizamiento. En definitiva, estos suelos no tienen capacidad de uso agrícola, pecuario, forestal y urbano. Este tipo de suelos es característico en la unidad ambiental Mesas (F9) del sistema terrestre Acatepec, Laderas rectas (F10) sistema Zapotitlán y Escarpe recto (F11) del sistema Cerro Viejo.

*Leptosoles réndzicos*. Son someros (< 30 cm), con un horizonte A mólico de color pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en seco, y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo; de texturas franca a franca arenosa, consistencia friable, estructura poliédrica subangular y granular de ligera a moderadamente desarrollada; moderadamente alcalinos, de raíces abundantes finas y medianas con espacio poroso muy fino y continuo. Por debajo del horizonte superficial subyace un horizonte C muy rico en carbonato de calcio (>40%), de color parduzco claro, ligeramente compacto, con frecuentes raíces, textura franco arcillo arenosa o franco arcillosa, estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada entremezclada con abundantes fragmentos de rocas; el espacio poroso es abundante entre los agregados y moderado dentro de los agregados. En algunos casos se

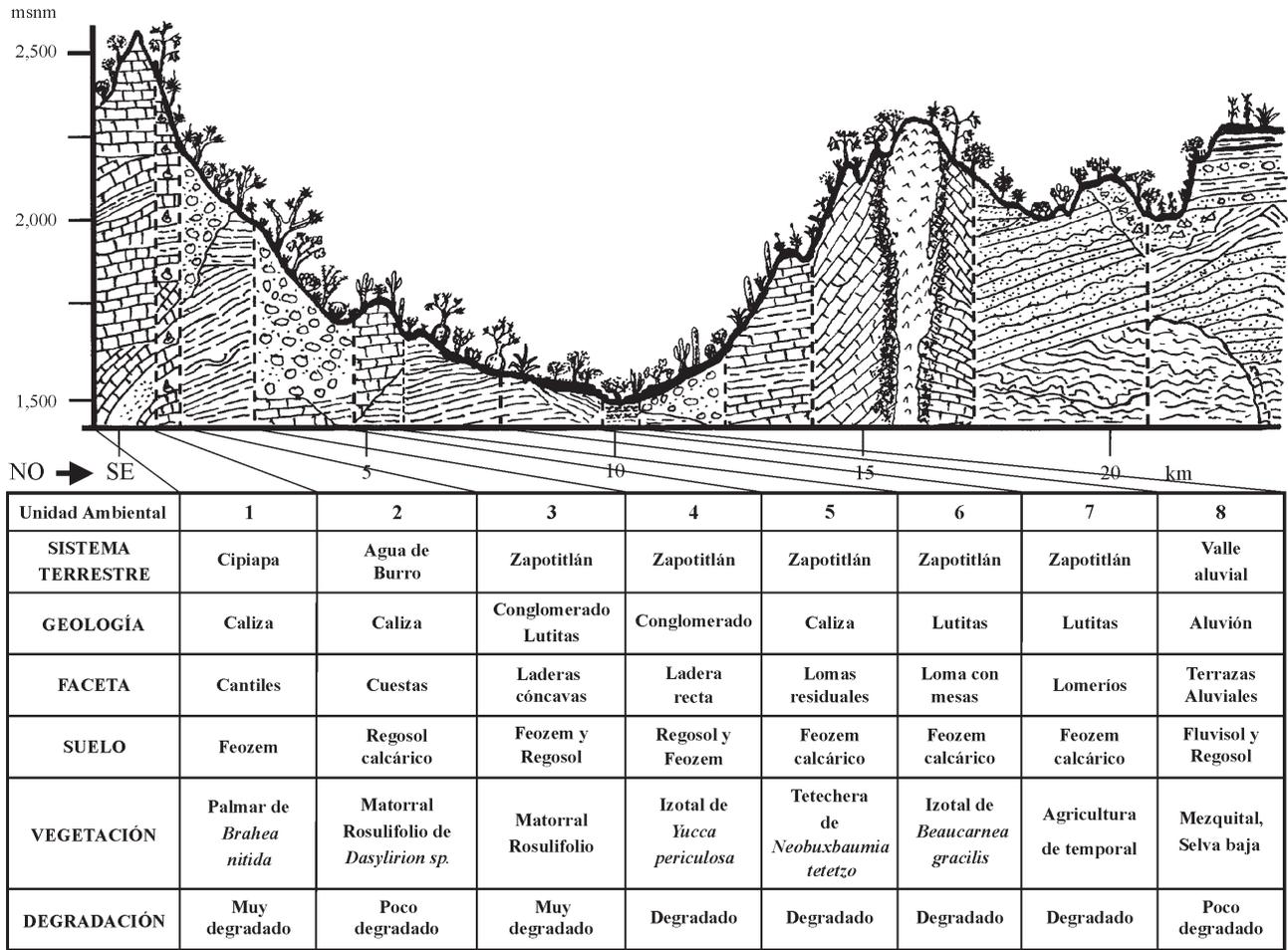


Figura 4A. Toposecuencia de las unidades ambientales de la Subcuenca Zapotitlán y sus principales características: Facetas 1-8.

encuentra un horizonte de calcreta con más del 40% de carbonato de calcio, con estructura laminar muy dura. Por debajo del horizonte C aparece el material geológico, que en mayor proporción corresponde a calizas y lutitas. Los factores limitantes para el desarrollo de esta unidad son el relieve de laderas y escarpes rectos con pendientes muy pronunciadas y la baja precipitación. Soportan una vegetación de Tetecheras de *N. tetetzo*, Tetecheras de *N. macrocephala*, Matorral Esclerófilo Perennifolio y Matorral Rosetófilo. El éxito del Matorral Esclerófilo Perennifolio se debe a la descalcificación de los suelos, ya que al ser lixiviados los carbonatos quedan arcillas, que junto con la materia orgánica, retienen y aportan los nutrientes requeridos por las especies. Es la unidad dominante en gran parte de la zona y es el suelo representativo de las facetas F10 y F11, que corresponden a los sistemas terrestres Zapotitlán y Cerro Grande, respectivamente. El relieve, la pendiente y la alta pedregosidad limitan las actividades productivas. La heterogeneidad de su distribución hace que el grado de deterioro se encuentre entre degradado y poco degradado.

*Feozems calcáricos.* Con respecto a la morfología presentan, como todos los de este grupo, un epipedón mólico cuyo espesor varía entre 17 y 38 cm; los materiales parentales que presentan pueden ser calizas y lutitas. Presentan colores pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) a pardo oscuro (10YR 3/3) en seco y pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, una estructura granular fina y poliédrica subangular moderadamente desarrollada, texturas franco o franco arcillo arenosa, con abundantes raíces de tamaño fino y medio, y consistencia friable a muy friable. Los contenidos de materia orgánica varían de bajos (<1.5%) a altos (>5%), la saturación de bases es mayor que 50%, y son alcalinos de reacción violenta y muy violenta al ácido clorhídrico. El horizonte subsuperficial tiene un espesor muy variable que fluctúa entre los 38 y 108 cm, normalmente esta subdividido en capas de grosores variables. Estos suelos son altamente susceptibles a la erosión, lo cual depende de la inclinación y de la cobertura vegetal que presentan. Soportan vegetación de Palmar de *Brahea nitida*, para el caso de la faceta 1 (Escarpes y cantiles), cuyas limitantes para el desarrollo son la pendiente y el exceso de

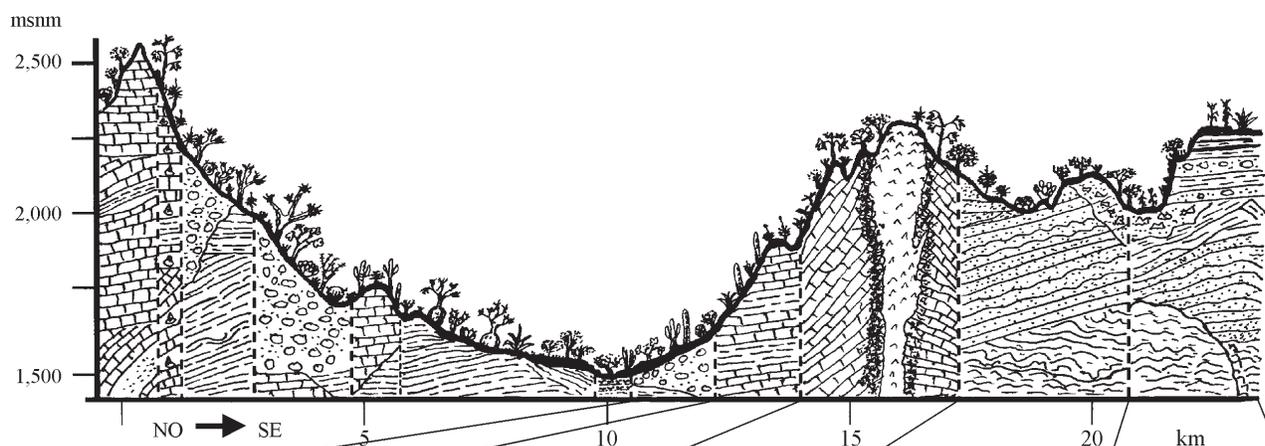
aflorescimientos rocosos; el uso que mayormente se aplica es la ganadería extensiva de caprinos. Estos suelos se presentan en las Lomas residuales (F5), Loma con mesas (F6) y Lomeríos (F7), distribuyéndose hacia las partes centrales de la subcuenca ocupando casi el 30% del área de estudio. En estos sitios los suelos son más profundos, favoreciendo la agricultura de temporal y el establecimiento de vegetación de Tetecheras de *N. tetetzo* e Izotal de *Beaucarnea gracilis*. Las actividades agrícolas, ganaderas y mineras son algunos de sus usos; los procesos de degradación que presentan son contaminación por desechos municipales y mineros.

*Fluvisoles calcáricos*. Se distinguen por presentar colores pardo rojizo o amarillentos y gris, texturas entre franco arenosa, franca y franco arcillosa, alto contenido de carbonatos, reacción alcalina con pH de 8.0 a 8.5, así como contenidos de materia orgánica bajos a moderados. En general, los fluvisoles son muy profundos con fuertes variaciones en sus propiedades. Los perfiles muestran discontinuidades en la fase granulométrica, así como fluctuaciones irregulares en el contenido de materia orgánica, producto de la continua acumulación de sedimentos frescos que reciben. Se les encuentra en las Terrazas aluviales (F8), por estar en la zona de valle aluvial, muestran pendientes bajas y relieves de ligeramente ondulados a rectos, y son los que están más expuestos al manejo productivo, agrícola de temporal, riego eventual y plantaciones de frutales. Sin embargo, existen sitios con vegetación de Mezquital y Selva Baja, donde domina el *Prosopis laevigata* y *Cercidium praecox*. Los grados de deterioro son variables, observándose desde los muy conservados hasta los muy degradados, a tal grado que pueden llegar a desaparecer y formar tierras malas (*bad lands*), tal como se muestra en la parte oriental del río Zapotitlán, constituyendo áreas difícilmente recuperables.

*Regosoles calcáricos*. Son suelos que provienen de materiales no consolidados excluyendo a materiales de texturas gruesas o que muestran propiedades flúvicas. Contrariamente a lo que reporta Aguilera-Herrera (1970) para la zona, y de acuerdo con las características de diagnóstico de los Vertisoles o Andosoles y de propiedades sálicas (FAO, 1998), no tienen otros horizontes de diagnóstico que un A ócrico o A úmbrico y carecen de propiedades gléycas dentro de los primeros 50 cm. Son suelos que presentan homogeneidad en todas sus características ya sean físicas, químicas o morfológicas. Estos suelos se encuentran sobre geoformas como planicies de inundación y antiguas terrazas aluviales, así como en laderas y lomeríos, especialmente en áreas de transición entre las terrazas y laderas. El rango de pendientes es de 2 a 10%, y en consecuencia los relieves fluctúan entre planos y ondulados. El basamento en el cual descansan está formado por sedimentos clásticos antiguos de diferente origen y por material regolítico derivado principalmente de lutitas y conglomerados calcáreos. La morfología de estos suelos es muy sencilla, pero sobre todo homogénea; en general se puede decir que son suelos de textura arenosa,

bien drenados, profundos, formados a partir de materiales no consolidados relativamente estables y, a diferencia de los fluvisoles, éstos ya no siguen recibiendo aportes significativos de sedimentos. Presentan propiedades muy uniformes a lo largo de todo el perfil, sin desarrollo de horizontes pedogenéticos, los minerales que dominan son principalmente heredados del material parental y con un grado de alteración muy bajo. No obstante haber sido formado por eventos de depositación, no muestran estratificación debido a que los horizontes empiezan a mezclarse y homogeneizarse por procesos de redistribución y translocación. En las terrazas aluviales soportan vegetación de Selva Baja de *Prosopis laevigata* y *Cercidium praecox*; se les ha empleado para agricultura temporalera, y su grado de degradación es variable dependiendo del tipo de cobertura vegetal que presenten. Por otra parte, los suelos en las facetas 2, 3 y 4 son más someros y arenosos, formados a partir de conglomerados, calizas y lutitas, y son muy susceptibles a la degradación por erosión hídrica al predominar las laderas cóncavas y rectas; soportan vegetación de Matorral Rosulifolio de *Dasyllirion* sp. e Izotal de *Yucca periculosa*. De hecho se encuentran en la zona con mayores problemas de erosión, por lo que no tienen vocación agrícola y requieren de labores de conservación inmediata.

*Regosoles éutricos*. Son suelos distribuidos sobre materiales originales no consolidados, derivados de rocas metamórficas, lechos rojos, areniscas y lutitas carbonosas. Presentan la mayor heterogeneidad en sus materiales parentales debido a los procesos geológicos de tectonismo regional que ha sufrido la zona de Metzontla y Xochiltepec. No tienen otros horizontes de diagnóstico que un A ócrico o un A úmbrico y se localizan principalmente sobre geoformas de laderas rectas, cantiles y mesas de pendientes pronunciadas que limitan su desarrollo. Morfológicamente poseen dos horizontes en cada perfil, los cuales se identificaron como A y C. Son suelos someros, con profundidades menores que 30 cm, de colores que varían de café rojizo a pardo amarillento, de textura arenosa, con estructura de poliédrica subangular a granular con un débil desarrollo, de consistencia firme, con muchas intrusiones y abundantes raíces finas y medias. Presentan contenidos bajos de materia orgánica (<2%), reacción ligeramente alcalina, y reacción a los carbonatos de nula a ligera. El uso de estos suelos está limitado a la agricultura de temporal, predominantemente maíz (*Zea mays*), maguey (*Agave* sp.) y nopales (*Opuntia* sp.). Formando parte de la vegetación natural se encuentran elementos de Selva Baja Caducifolia y Garambullales de *Myrtillocactus geometrizans*, asociados con mezquite (*Prosopis laevigata*) y pirul (*Schinus molle*). La importancia de estos suelos reside en que, a pesar de haberse desarrollado a partir de materiales parentales diversos, la pendiente y el cambio de clima limitan su evolución y madurez, aunado a que han estado sometidos a mucha presión de manejo y a que no se aplican medidas de conservación eficientes. Estos suelos se encuentran



| Unidad Ambiental  | 9                              | 10  | 11   | 12                                     | 13                      |
|-------------------|--------------------------------|---|--|--|-------------------------|
| SISTEMA TERRESTRE | Acatepec                       | Zapotitlán  | Cerro Grande   | Metzontla                              | Metzontla               |
| GEOLOGÍA          | Conglomerado                   | Lutitas Calizas   | Calizas  | Areniscas Lechos rojos                 | Areniscas Lutitas       |
| FACETA            | Mesetas                        | Laderas rectas  | Escarpe recto  | Ladera recta                           | Cantiles y mesas        |
| SUELO             | Leptosol lítico                | Leptosol réndzico   | Leptosol réndzico                                      | Regosol éútrico                        | Regosol éútrico         |
| VEGETACIÓN        | Tetechera de <i>N. tetetzo</i> | Matorral Rosulifolio de <i>Dasyllirion</i> sp. con tetecheras de <i>N. macrocephala</i> | Matorral Esclerófilo Perennifolio, Matorral rosetófilo | Garambullales y Selva baja Caducifolia | Agricultura de temporal |
| DEGRADACIÓN       | Poco Degradado                 | Degradado   | Poco Degradado   | Degradado                              | Muy Degradado           |

Figura 4B. Toposecuencia de las unidades ambientales de la Subcuenca Zapotitlán y sus principales características: Facetas 9–13.

formando parte de las facetas 12 y 13, y representan una zona con características ambientales muy diferentes a las señaladas para las otras unidades.

La Tabla 1 muestra las características morfológicas y las propiedades físicas y químicas de los suelos en perfiles representativos de cada unidad ambiental o faceta identificada.

#### 4.3. Tipos de vegetación

La toposecuencia analizada presentó diez tipos de vegetación natural, los cuales se describen a continuación:

*Palmar de Brahea nitida*. Denominado también como Palmar Bajo por Miranda y Hernández (1963), se localiza en la faceta 1, en escarpes y cantiles, y se desarrolla sobre sustratos calcáreos en las partes más altas de la Sierra de Cipiapa, con las mayores altitudes (2,400 a 2,600 msnm), menores temperaturas (15.4–16°C) y mayor precipitación (530–560 mm). Además de *B. nitida* se pueden encontrar manchones de *B. dulcis*; otras especies que forman parte

de la comunidad son: *Yucca periculosa*, *Eysenhardtia polystachya*, *Zexmenia lantanifolia*, *Dasyllirion serratifolium*, *D. acrotriche*, *Quercus glaucooides*, *Q. sp.*, *Sedum sp.*, *Rhus virens*, *Juniperus deppeana*, *Nolina longifolia*, *Hechtia podantha*, *Castela tortuosa*, *Arbutus xalapensis*, *Agave peacockii*, *A. sp.*, *Amelanchier denticulata* y *Opuntia pilifera*; también se desarrollan epífitas del género *Tillandsia* y plantas rupícolas como *Echeverría* sp. Hacia el Este de la zona, rumbo a Santa Ana Teloxtoc, se encuentra asociado con matorral esclerófilo perennifolio. La comunidad se encuentra muy dispersa debido a los problemas de pedregosidad y pendiente del sitio. Por otra parte, las condiciones microclimáticas hacen que la poca humedad ambiental sea suficiente para diluir, disolver y transportar los carbonatos y demás nutrientes, lo cual empobrece continuamente al sistema, lo cual se compensa con el aporte de materia orgánica que se almacena en las oquedades de las calizas, creando sitios ricos en nutrientes que favorecen la germinación. Esta comunidad es utilizada principalmente para ganadería extensiva de caprinos. Por su poca accesibilidad es posible encontrar

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos tipo de la toposecuencia investigada.

| Horizonte         | Profundidad (cm) | Color Seco               | Color Húmedo | Color | Areña (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | CT*  | DA** (kg/m <sup>3</sup> ) | DR** (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad (%) | pH (1:2.5) | MO** (%) | CIC** cmol/kg <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> cmol/kg <sup>-1</sup> | Mg <sup>2+</sup> cmol/kg <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> mol/kg <sup>-1</sup> |  |
|-------------------|------------------|--------------------------|--------------|-------|-----------|----------|-------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------|------------|----------|-----------------------------|--|--|-------------------------------------|--|
| <i>Perfil A34</i> |                  |                          |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
|                   | <i>Faceta 1</i>  | <i>Feozem calcárico</i>  |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A                 | 0-28             | 10 YR 5/1                | 10 YR 3/1    | 56    | 22        | 22       | FRA         | 0.86 | 2.23                      | 61.43                     | 8.57          | 4.27       | 27.93    | 17.90                       | 7.61                                   | 4.10                                   |                                     |  |
| C1                | 28-97            | 10 YR 4/1                | 10 YR 2/1    | 56    | 24        | 20       | FRA         | 0.85 | 2.02                      | 57.92                     | 8.45          | 3.55       | 29.60    | 14.10                       | 11.60                                  | 2.56                                   |                                     |  |
| C2                | 97-125           | 10 YR 6/1                | 10 YR 4/1    | 48    | 26        | 26       | FRA         | 0.89 | 1.93                      | 53.88                     | 8.54          | 1.27       | 24.48    | 13.90                       | 5.71                                   | 5.70                                   |                                     |  |
| R                 | >125             |                          |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| <i>Perfil A27</i> |                  |                          |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
|                   | <i>Faceta 2</i>  | <i>Regosol calcárico</i> |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A                 | 0-36             | 2.5 Y 5/2                | 2.5 Y 3/2    | 30    | 34        | 36       | FR          | 1.01 | 2.07                      | 51.20                     | 6.99          | 2.25       | 20.49    | 13.00                       | 4.05                                   | 2.82                                   |                                     |  |
| C1                | 36-53            | 5 Y 7/3                  | 5 Y 5/2      | 18    | 46        | 36       | FRL         | 1.02 | 2.22                      | 54.05                     | 6.77          | 1.72       | 20.13    | 13.00                       | 6.48                                   | 1.53                                   |                                     |  |
| C21               | 53-79            | 5 Y 7/2                  | 5 Y 5/3      | 24    | 36        | 40       | FR          | 1.11 | 2.24                      | 50.44                     | 6.57          | 0.24       | 16.43    | 9.39                        | 6.48                                   | 1.40                                   |                                     |  |
| C22               | 79-95            | 5 Y 6/2                  | 5 Y 5/2      | 22    | 34        | 44       | R           | 1.12 | 2.32                      | 51.72                     | 6.86          | 0.07       | 17.23    | 12.20                       | 5.18                                   | 1.79                                   |                                     |  |
| C23               | 95-110           | 5 Y 7/2                  | 5 Y 6/2      | 22    | 38        | 40       | FR          | 1.12 | 2.41                      | 53.52                     | 6.87          | 0.38       | 15.53    | 10.40                       | 5.50                                   | 1.53                                   |                                     |  |
| <i>Perfil A25</i> |                  |                          |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
|                   | <i>Faceta 3</i>  | <i>Feozem calcárico</i>  |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A                 | 0-14             | 10 YR 7/3                | 10 YR 5/3    | 58    | 30        | 12       | FA          | 1.00 | 2.25                      | 57.44                     | 7.14          | 1.27       | 20.91    | 13.10                       | 5.90                                   | 2.90                                   |                                     |  |
| AC                | 14-41            | 10 YR 8/2                | 10 YR 7/3    | 68    | 26        | 6        | FA          | 1.06 | 2.31                      | 54.11                     | 7.19          | 1.12       | 19.05    | 12.3                        | 5.67                                   | 2.17                                   |                                     |  |
| C1                | 41-47            | 10 YR 8/3                | 10 YR 8/4    | 68    | 26        | 6        | FA          | 1.30 | 2.44                      | 41.96                     | 7.14          | 1.07       | 15.15    | 9.54                        | 4.01                                   | 0.89                                   |                                     |  |
| C2                | 47-63            | 5 Y 8/2                  | 5 Y 7/6      | 70    | 18        | 12       | FA          | 1.30 | 2.20                      | 40.90                     | 7.43          | 0.17       | 16.60    | 10.70                       | 5.80                                   | 2.30                                   |                                     |  |
| C3                | 63-84            | 5 Y 7/2                  | 5 Y 7/4      | 80    | 10        | 10       | FA          | 1.40 | 2.55                      | 45.09                     | 7.82          | 0.40       | 13.61    | 5.34                        | 3.80                                   | 2.05                                   |                                     |  |
| <i>Perfil A24</i> |                  |                          |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
|                   | <i>Faceta 4</i>  | <i>Feozem calcárico</i>  |              |       |           |          |             |      |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A                 | 0-22             | 10 YR 6/2                | 10 YR 5/2    | 52    | 28        | 20       | FRA         | 1.15 | 2.10                      | 45.23                     | 8.26          | 2.24       | 25.80    | 17.9                        | 5.14                                   | 2.30                                   |                                     |  |
| B                 | 22-83            | 10 YR 7/1                | 10 YR 6/2    | 46    | 22        | 32       | FRA         | 1.02 | 2.30                      | 55.65                     | 8.37          | 1.72       | 23.24    | 15.2                        | 7.61                                   | 1.79                                   |                                     |  |
| 2C                | 83-120           | 10 YR 8/2                | 10 YR 6/3    | 80    | 14        | 6        | AF          | 0.89 | 2.20                      | 59.54                     | 8.7           | 0.55       | 19.05    | 11.4                        | 8.76                                   | 1.41                                   |                                     |  |

Tabla 1. Continuación.

| Horizonte                                   | Profundidad (cm) | Color Seco | Color Húmedo | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | CT* | DA** (kg/m <sup>3</sup> ) | DR** (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad (%) | pH (1:2.5) | MO** (%) | C/C** cmol/kg <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> cmol/kg <sup>-1</sup> | Mg <sup>2+</sup> cmol/kg <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> mol/kg <sup>-1</sup> |  |
|---|------------------|------------|--------------|-----------|----------|-------------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------|------------|----------|-----------------------------|--|--|-------------------------------------|--|
| <i>Perfil A28 Faceta 5 Feozem calcárico</i> |                  |            |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A   | 0-26             | 10 YR 5/2  | 10 YR 4/2    | 36        | 28       | 36          | FR  | 0.96                      | 2.20                      | 56.36         | 8.39       | 4.07     | 27.93                       | 21.50                                  | 3.42                                   | 1.79                                |  |
| C1  | 26-61            | 10 YR 7/2  | 10 YR 5/3    | 32        | 34       | 34          | FR  | 1.01                      | 2.30                      | 56.08         | 8.53       | 1.42     | 27.43                       | 17.30                                  | 6.28                                   | 1.41                                |  |
| C2  | 61-103           | 10 YR 8/2  | 10 YR 6/3    | 34        | 30       | 36          | FR  | 1.18                      | 2.50                      | 52.80         | 8.53       | 0.69     | 22.58                       | 15.60                                  | 6.66                                   | 1.28                                |  |
| <i>Perfil Z16 Faceta 6 Feozem calcárico</i> |                  |            |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A   | 0-15             | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 86        | 6        | 8           | AF  | 1.4                       | 2.67                      | 48.36         | 8.28       | 1.24     | 16.54                       | 12.20                                  | 4.40                                   | 1.20                                |  |
| AC  | 15-47            | 10 YR 5/2  | 10 YR 4/2    | 84        | 6        | 10          | AF  | 1.4                       | 2.58                      | 46.65         | 8.36       | 0.79     | 14.93                       | 10.46                                  | 0.81                                   | 1.34                                |  |
| C1  | 47-56            | 10 YR 6/3  | 10 YR 4/2    | 80        | 10       | 10          | FA  | 1.5                       | 2.25                      | 34.28         | 8.25       | 0.59     | 12.38                       | 10.36                                  | 1.75                                   | 2.95                                |  |
| C21   | 56-64            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/1    | 90        | 4        | 6           | A   | 1.4                       | 2.64                      | 48.89         | 8.28       | 0.53     | 12.81                       | 14.14                                  | 3.84                                   | 3.60                                |  |
| C22   | 64-80            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 90        | 4        | 6           | A   | 1.4                       | 2.63                      | 46.67         | 8.32       | 0.59     | 12.46                       | 13.94                                  | 3.03                                   | 3.20                                |  |
| C23   | 80-82            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 92        | 6        | 2           | A   | 1.5                       | 2.51                      | 41.03         | 8.02       | 0.26     | 11.72                       | 10.92                                  | 1.94                                   | 1.24                                |  |
| C3  | 82-86            | 10 YR 5/2  | 10 YR 4/2    | 90        | 6        | 4           | A   | 1.5                       | 2.39                      | 38.61         | 8.13       | 0.65     | 12.58                       | 8.89                                   | 1.64                                   | 2.70                                |  |
| C4  | 86-135           | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 94        | 2        | 4           | A   | 1.5                       | 2.62                      | 43.20         | 8.29       | 0.98     | 10.01                       | 10.25                                  | 3.20                                   | 2.60                                |  |
| <i>Perfil Z16 Faceta 7 Feozem calcárico</i> |                  |            |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |  |
| A   | 0-15             | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 86        | 6        | 8           | AF  | 1.4                       | 2.67                      | 48.36         | 8.28       | 1.24     | 16.54                       | 12.20                                  | 4.40                                   | 1.20                                |  |
| AC  | 15-47            | 10 YR 5/2  | 10 YR 4/2    | 84        | 6        | 10          | AF  | 1.4                       | 2.58                      | 46.65         | 8.36       | 0.79     | 14.93                       | 10.46                                  | 0.81                                   | 1.34                                |  |
| C1  | 47-56            | 10 YR 6/3  | 10 YR 4/2    | 80        | 10       | 10          | FA  | 1.5                       | 2.25                      | 34.28         | 8.25       | 0.59     | 12.38                       | 10.36                                  | 1.75                                   | 2.95                                |  |
| C21   | 56-64            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/1    | 90        | 4        | 6           | A   | 1.4                       | 2.64                      | 48.89         | 8.28       | 0.53     | 12.81                       | 14.14                                  | 3.84                                   | 3.60                                |  |
| C22   | 64-80            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 90        | 4        | 6           | A   | 1.4                       | 2.63                      | 46.67         | 8.32       | 0.59     | 12.46                       | 13.94                                  | 3.03                                   | 3.20                                |  |
| C23   | 80-82            | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 92        | 6        | 2           | A   | 1.5                       | 2.51                      | 41.03         | 8.02       | 0.26     | 11.72                       | 10.92                                  | 1.94                                   | 1.24                                |  |
| C3  | 82-86            | 10 YR 5/2  | 10 YR 4/2    | 90        | 6        | 4           | A   | 1.5                       | 2.39                      | 38.61         | 8.13       | 0.65     | 12.58                       | 8.89                                   | 1.64                                   | 2.70                                |  |
| C4  | 86-135           | 10 YR 6/2  | 10 YR 4/2    | 94        | 2        | 4           | A   | 1.5                       | 2.62                      | 43.20         | 8.29       | 0.98     | 10.01                       | 10.25                                  | 3.20                                   | 2.60                                |  |

Tabla 1. Continuación.

| Horizonte         | Profundidad (cm)      | Color Seco               | Color Húmedo | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | CT* | DA** (kg/m <sup>3</sup> ) | DR** (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad (%) | pH (1:2.5) | MO** (%) | CIC** cmol.kg <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> cmol.kg <sup>-1</sup> | Mg <sup>2+</sup> cmol.kg <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> mol.kg <sup>-1</sup> |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|-----------|----------|-------------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------|------------|----------|-----------------------------|--|--|-------------------------------------|
| <i>Perfil Z11</i> | <i>Faceta 8</i>       | <i>Regosol calcárico</i> |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| A                 | 0-37                  | 10 YR 5/2                | 10 YR 3/2    | 74        | 12       | 14          | FA  | 1.30                      | 2.21                      | 42.12         | 7.70       | 1.80     | 21.20                       | 12.97                                  | 2.40                                   | 3.60                                |
| 2C1               | 37-76                 | 10 YR 5/3                | 10 YR 3/3    | 52        | 26       | 22          | FRA | 1.30                      | 2.50                      | 50.00         | 7.58       | 0.96     | 26.18                       | 20.20                                  | 4.44                                   | 3.83                                |
| 3C2               | 76-110                | 10 YR 6/3                | 10 YR 4/3    | 34        | 48       | 18          | F   | 1.1                       | 2.39                      | 52.72         | 7.66       | 0.13     | 24.85                       | 15.28                                  | 4.485                                  | 3.20                                |
| <i>Perfil M3</i>  | <i>Faceta 9</i>       | <i>Leptosol lítico</i>   |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| A                 | 0-30                  | 10 YR 5/3                | 10 YR 3/2    | 13.20     | 48       | 28.8        | FLR | 0.986                     | 2.22                      | 55.58         | 7.69       | 4.93     | 29.70                       | 30.80                                  | 2.38                                   | 2.54                                |
| R                 | >30                   |                          |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| <i>Perfil V10</i> | <i>Faceta 10</i>      | <i>Leptosol réndzico</i> |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| A                 | 0-10                  | 2.5 Y 5/3                | 2.5 Y 3/3    | 42        | 28       | 30          | FR  | 1.00                      | 2.22                      | 55.14         | 8.19       | 4.65     | 24.77                       | 12.04                                  | 7.31                                   | ND**                                |
| R                 | >10                   |                          |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| <i>Perfil V22</i> | <i>Faceta 11</i>      | <i>Leptosol réndzico</i> |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| A                 | 0-17                  | 10 YR 4/3                | 10 YR 3/2    | 72        | 22       | 6           | FA  | 0.86                      | 1.91                      | 54.97         | 8.03       | 8.62     | 25.11                       | 17.20                                  | 3.87                                   | ND**                                |
| C/R               | 17-48                 | 10 YR 7/2                | 10 YR 5/3    | 62        | 30       | 8           | FA  | 0.90                      | 2.32                      | 61.21         | 8.26       | 3.81     | 16.47                       | 12.04                                  | 3.23                                   | ND**                                |
| R                 | >48                   |                          |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| <i>Perfil M4</i>  | <i>Faceta 12 y 13</i> | <i>Regosol éútrico</i>   |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |
| A1                | 0-10                  | 10 YR 5/3                | 10 YR 4/3    | 69.20     | 19.6     | 11.2        | FA  | 1.154                     | 2.65                      | 56.45         | 7.73       | 3.87     | 26.10                       | 22.46                                  | 3.02                                   | 3.01                                |
| A2                | 10-30                 | 10 YR 5/3                | 10 YR 4/3    | 69.20     | 13.6     | 17.2        | FR  | 1.205                     | 2.60                      | 53.65         | 7.77       | 3.92     | 26.20                       | 24.62                                  | 0.82                                   | 2.58                                |
| R                 | >30                   |                          |              |           |          |             |     |                           |                           |               |            |          |                             |  |  |                                     |

\* Clase Textural. FRA: franco arcillo-arenoso, FR: franco arcilloso, FRL: franco arcillo-limoso, R: arcilla, FA: franco arenoso, AF: arena franca, FLR: franco limo-arcilloso, A: arena, F: franco.  
 \*\* DA: densidad aparente, DR: densidad real, MO: materia orgánica, CIC : capacidad de intercambio catiónico, ND : no determinado.

comunidades conservadas.

*Matorral Rosulifolio de Dasylirion.* Como su nombre lo indica es una asociación vegetal donde predominan las plantas con hojas arrosietadas con o sin tallos evidentes (Valiente-Banuet *et al.*, 2001), donde predominan *D. serratifolium*, *D. acrotriche*, *Nolina longifolia*, *Agave peacockii*, *A. marmorata*, *Hechtia podantha*, *Gochnatia hypoleuca*, *Echinocactus platyacanthus*, *Yucca periculosa*, *Neobuxbaumia macrocephala*, *Opuntia rosea* y *O. pilifera*. Esta comunidad se desarrolla en las facetas 2, 3 y parte de la 11 en sustratos de calizas, conglomerados y lutitas, en el rango de altitud de 1,900 a 2,400 msnm, en un intervalo de temperatura de 15.4 a 17.3 °C y precipitación de 490 a 650 mm anuales. Se puede afirmar que su rango de distribución es más amplio y pueden soportar variaciones climáticas de forma más eficiente. Ecológicamente son importantes porque soportan condiciones extremas de pendientes y pedregosidad. Sin embargo, la presión del pastoreo ha hecho que en algunos sitios la comunidad se encuentre muy dispersa y que su cobertura sea menor que 50%, lo que favorece la erosión hídrica y en consecuencia la formación de cárcavas. Una característica sobresaliente es su tendencia a establecerse en sustratos calcáreos, llegando incluso a convertirse en un indicador de cambios litológicos en la zona de Cerro de la Cruz, Cerro de la Nopalera (F11) y San Francisco Xochiltepec, donde se encuentra formando una comunidad relativamente conservada.

*Izotal de Yucca periculosa.* Es una comunidad donde domina la yuca o izote, que es una planta ramificada cuyas ramas rematan en hojas parecidas a las de los magueyes, con alturas mayores a 4 m (Valiente-Banuet *et al.*, 2001). Se le encontró en la faceta 4, sobre laderas rectas y sustratos de conglomerados calcáreos; en un rango altitudinal de 1,700 a 1,900 msnm, con temperaturas de 17.3 a 17.9 °C y precipitación de 450 a 490 mm anuales. Esta comunidad además de la *Yucca periculosa*, presenta *Fouquieria formosa*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Beaucarnea gracilis*, *Opuntia pilifera*, *Agave marmorata*, *A. karwinskii*, *Euphorbia antisiphilitica*, *Pseudosmodingium multifolium*, *Mimosa lacerata*, *M. luisana*, *Prosopis laevigata*, *Cercidium praecox*, *Ipomoea arborescens*, *Celtis pallida*, *Lippia graveolens*, *Pedilanthus cymbiferus* y *Echinocactus platyacanthus*. Esta comunidad se encuentra hacia las partes bajas de la subcuena, se emplea para la ganadería extensiva de caprinos, además de emplear la fibra del izote para la fabricación de tapetes. El exceso de extracción ha provocado la disminución de grandes poblaciones, de tal forma que la comunidad está muy degradada.

*Izotal de Beaucarnea.* Es una comunidad formada principalmente por el “Sotolín”, nombre común de *Beaucarnea gracilis* (Valiente-Banuet *et al.*, 1996a, 2001), ubicada sobre sustratos de calizas y lutitas en un rango de altitud de 1,500 a 1,700 msnm, donde las temperaturas varían entre 19.2 y 25 °C, con precipitación de 410 a 450 mm anuales. Las especies que conforman la comunidad son: *Prosopis laevigata*, *Cercidium praecox*, *Celtis pallida*,

*Yucca periculosa*, *Opuntia pilifera*, *Karwinskia mollis*, *Koeberlinia spinosa*, *Ipomoea arborescens*, *Lippia graveolens*, *Pedilanthus cymbiferus*, *Echinocactus platyacanthus*, *Neobuxbaumia tetetzo*, *N. macrocephala*, *Euphorbia antisiphilitica*, *Ferocactus recurvus*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Bursera* sp., *Pachycereus hollianus*, *P. marginatus*, *Jatropha neopauciflora*, *Senecio salignus*, *Croton* sp., *Fouquieria formosa*, *Escontria chiotilla* y *Cephalocereus columna-trajani*. Esta vegetación se encuentra en las facetas 6 y 7, se le emplea para la extracción de plantas con usos alimenticios, forrajeros y para construcción y en algunos sitios se ha desmontado para la incorporación de agricultura de temporal; una forma de conservación de suelos es la construcción de terrazas con barreras biológicas de mezquite. Existen sitios ligeramente degradados y otros muy alterados con aporte de basura y desechos de los talleres de onix.

*Tetechera de Neobuxbaumia tetetzo.* Localmente llamada tetecho, es la especie que domina en este tipo de vegetación (Oliveros-Galindo, 2000). Se le encontró sobre sustratos de calizas y lutitas en un rango de altitud de 1,600 a 1,800 msnm, con temperatura media de 18.6 a 19.2 °C, precipitación de 410 a 450 mm anuales. Las especies que conforman la comunidad son: *Prosopis laevigata*, *Cercidium praecox*, *Beaucarnea gracilis*, *Pachycereus hollianus*, *Cephalocereus columna-trajani*, *Schoepfia angulata*, *Ziziphus amole*, *Mimosa luisana*, *Opuntia pilifera*, *O. depressa*, *Agave marmorata*, *Caesalpinia melanadenia*, *Ferocactus robustus*, *Pachycereus hollianus*, *P. marginatus*, *Ferocactus latispinus*, *Ipomoea arborescens*, *I. conzatii*, *Sanvitalia fruticosa*, *Yucca periculosa*, *Karwinskia mollis*, *Koeberlinia spinosa*, *Lippia graveolens* y *Pedilanthus cymbiferus*. Esta comunidad está establecida en la faceta 5, se le emplea para diversos usos destacando los energéticos, alimenticios y forrajeros, y en algunos sitios ha sido desplazada para la agricultura; sin embargo es posible encontrar sitios con mínimo deterioro. Cabe mencionar que esta comunidad es una de las más representativas del área ocupando cerca de la tercera parte de la subcuena.

*Mezquital.* Esta la comunidad, dominada por *Prosopis laevigata*, se localiza en las terrazas aluviales (F8) en el fondo de la subcuena a altitudes de 1,480 msnm. Son los sitios con las temperaturas más altas de la zona (19.5–25°C) y menor precipitación (370 a 410 mm anuales) y presentan sustratos de materiales no consolidados de diferentes orígenes. La flora incluye a *Cercidium praecox*, *Beaucarnea gracilis*, *Pachycereus hollianus*, *P. marginatus*, *Schoepfia angulata*, *Ziziphus amole*, *Mimosa luisana*, *Opuntia pilifera*, *O. depressa*, *Agave marmorata*, *A. karwinskii*, *Caesalpinia melanadenia*, *Ferocactus robustus*, *F. recurvus*, *Ipomoea arborescens*, *I. conzatii*, *Sanvitalia fruticosa*, *Yucca periculosa*, *Karwinskia mollis*, *Koeberlinia spinosa*, *Lippia graveolens*, *Pedilanthus cymbiferus*, *Escontria chiotilla*, *Croton hypoleucus*, *Hechtia podantha*, *H. Glomerata*, *Sedum* sp. y *Tillandsia* sp. Es una de las

comunidades mejor conservadas de toda la subcuenca y se caracteriza por ser uno de los sistemas bióticos más frágiles del área. Son de los sitios más diversos y por sus características intrínsecas son las tierras con mejor vocación productiva. En esta comunidad se encuentra la mayor cantidad de especies con usos alimenticios, forrajeros, energéticos y medicinales, entre otros. Además es uno de los sistemas que poseen mayor endemismo en el sitio (Oliveros-Galindo, 2000; Valiente-Banuet et al., 2001).

*Selva Baja con espinas laterales.* De acuerdo con Oliveros-Galindo (2000), en ésta se reúne una comunidad dominada por *Prosopis laevigata* asociada a cactáceas columnares. Su ámbito de desarrollo se comparte en las terrazas aluviales descritas anteriormente y en partes de la faceta 9; donde podemos encontrar otras especies como: *Celtis pallida*, *Cercidium praecox*, *Opuntia pilifera*, *O. pubescens*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Pachycereus hollianus*, *P. marginatus*, *Stenocereus stellatus*, *Castela tortuosa*, *Coryphantha pallida*, *Ferocactus robustus*, *Stevia salicifolia*, *Viguiera dentata* y *Zanthoxylum liebmannianum*. Por estar asociadas a los mezquites, los usos que se les da a estas especies son los mismos.

*Matorral Esclerófilo Perennifolio.* Denominado también como Mexical por Valiente-Banuet et al. (2001), está constituido por arbustos perennifolios de hojas esclerófilas. Se le encontró sobre calizas en un rango de altitud de 1,980 a 2,300 msnm, en la faceta 11 del sistema Cerro Grande, en escarpes rectos y crestas, donde la temperatura es de 15.4 a 16.0 °C y la precipitación de 610 a 650 mm anuales, siendo la porción más húmeda de la zona. Las especies dominantes son: *Quercus sebifera*, *Rhus virens*, *R. standleyi*, *Cercocarpus fothergilloides*, *Vauquelinia australis*, *Comarostaphylis polifolia*, *Xerospirea hartwegiana*, *Amelanchier denticulata*, *Brahea nitida*, *B. dulcis*, *Agave stricta*, *Bursera fagaroides*, *Croton hypoleucus* y *Gochnatia hypoleuca*. Esta comunidad está definida por el gradiente de altitud y el sustrato calcáreo, la precipitación en la cima hacen que los pocos nutrientes del suelo se laven y pierdan fácilmente, de ahí la importancia de los reservorios de materia orgánica acumulada entre los intersticios rocosos. Por su lejanía de los centros urbanos y el difícil acceso, la comunidad se encuentra relativamente conservada.

*Garambullal.* Es una comunidad muy dispersa dominada por *Myrtillocactus geometrizans*, con elementos de selva baja caducifolia. Se encuentra entre 1,800 y 2,100 msnm, en laderas rectas y lomeríos, sobre sustratos de areniscas y lechos rojos, y suelos del tipo regosol éutrico. Esta comunidad es representativa de la zona de Metzontla, faceta 12. Además se pueden encontrar otras especies como *Opuntia pilifera*, *Buddleja cordata* y *Stenocereus griseus*. Esta comunidad se encuentra muy alterada por la actividad agrícola y pecuaria del sitio, y en algunos sitios se le encuentra asociada a pastizales inducidos.

*Selva Baja Caducifolia.* Este tipo de vegetación se caracteriza por el predominio de leguminosas espinosas bajas de 4–8 m de altura y preponderantemente de hojas

caedizas, tallos tortuosos con presencia de exudados, asociadas a cactáceas arborescentes (Miranda y Hernández, 1963). Se presenta en las facetas 12 y 13, en el sistema terrestre Metzontla, sobre litología variable de areniscas, lutitas carbonosas y esquistos en un rango de altitud de 1,800 a 2,200 msnm, con temperaturas de 16.0 a 16.7 °C, y precipitación de 490 a 530 mm. Las especies representativas son *Leucaena esculenta*, *L. leucocephala*, *L. confertiflora*, *Mimosa luisana*, *M. polyantha*, *M. sp.*, *Lysiloma divaricata*, *Bursera fagaroides*, *B. schlechtendalii*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Stenocereus griseus*, *S. Marginatus*, *Acacia coulteri*, *Ceiba parvifolia*, *Eysenhardtia polystachya*, *Ipomoea arborescens*, *Eupatorium spinosarum*, *Gymnosperma glutinosum*, *Croton sp.* y *Tillandsia recurvata*. Esta comunidad enmarca el cambio en las condiciones de sustrato y clima. En las zonas con mayor pendiente se encuentra en mejor estado de conservación, sin embargo, se utiliza intensamente para actividades pecuarias.

#### 4.4. Estado actual de la degradación del suelo

La evaluación de la degradación de la subcuenca revela la incidencia significativa tanto de procesos de erosión hídrica y eólica, deterioro químico, físico y biológico, como de áreas con limitantes severas, que se manifiestan en diversos grados afectando seriamente la zona. En contraste, se delimitaron zonas donde existen tasas nulas de degradación, presentando buenos niveles de conservación natural. La Figura 5 muestra el mapa de degradación de tierras elaborado para la zona.

*Erosión hídrica.* La zona de trabajo presenta 79.57 km<sup>2</sup> (29.42% del total) afectados por erosión hídrica de moderada a severa (W). Este proceso se manifiesta en dos modalidades: la primera es una pérdida uniforme de la capa superficial de suelo por erosión laminar y la segunda implica procesos de erosión concentrada y remontante con la modificación evidente del terreno y formación de cárcavas, localizándose al norte del pueblo de Zapotitlán y al sur de la subcuenca, afectando de manera sobresaliente las facetas 1, 3, 4, 5, 10 y 11.

*Erosión eólica.* La pérdida de suelo va de ligera a moderada, principalmente por el proceso de deflacción (E), y se manifiesta en 7.94 km<sup>2</sup> (2.94%); el área más afectada es la zona de Metzontla, dañando a las facetas 11 y 12.

*Degradación química.* Existen 5.10 km<sup>2</sup> (1.89%) caracterizados por la pérdida de moderada a severa de nutrientes (Cn), que reduce significativamente la productividad; contaminación severa (Cp) por aporte de residuos sólidos municipales, basura y escombros de los talleres de onix. Este deterioro se manifiesta en la zona urbana de Zapotitlán y en las facetas 6, 7 y 8.

*Degradación física.* Una superficie de 17.80 km<sup>2</sup> (6.58%) presenta procesos de encostramiento y sellamiento de la capa superficial del suelo (Pk) y compactación (Pc)

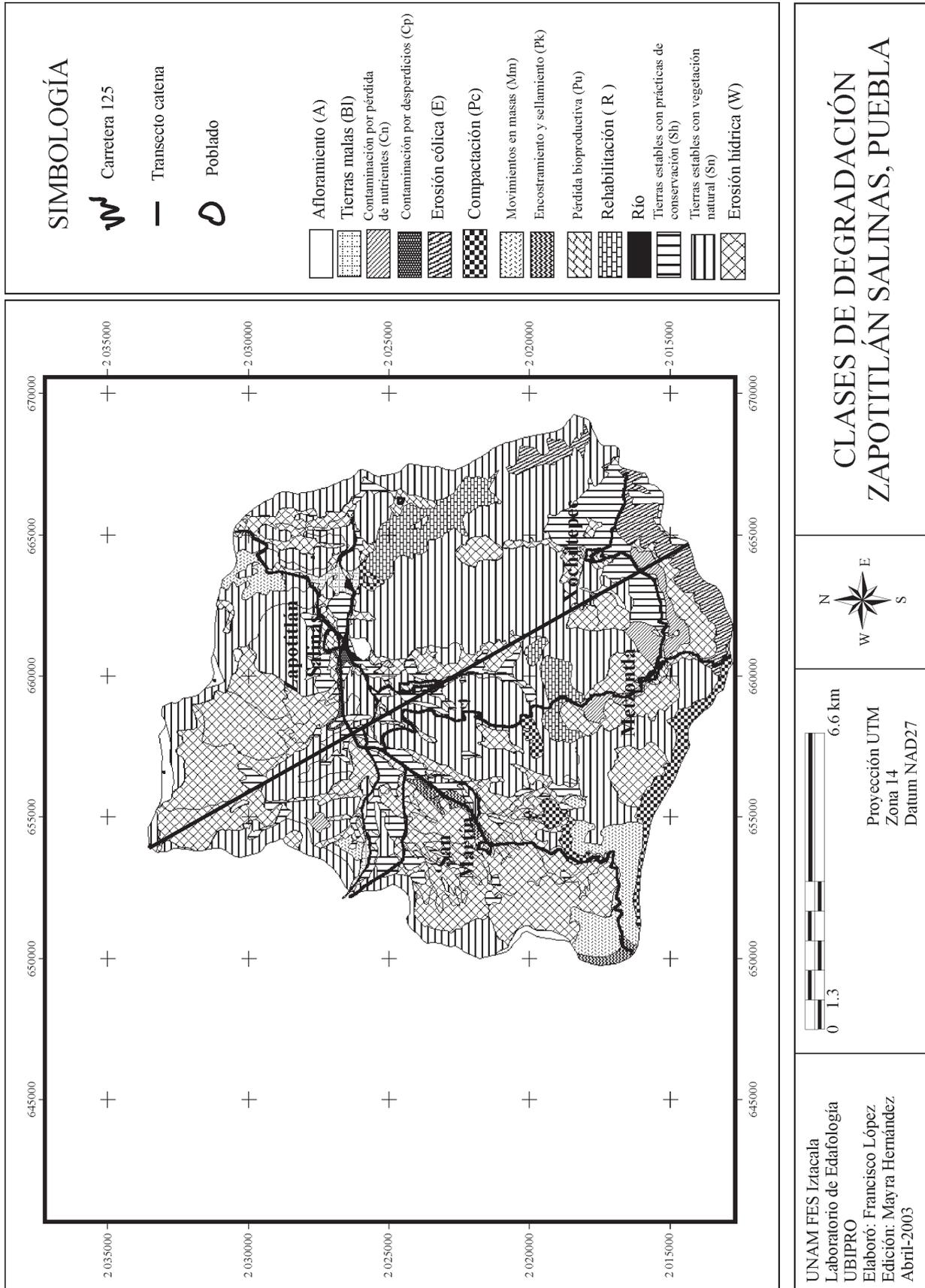


Figura 5. Mapa del estado de degradación actual de los suelos de Zapotitlán

con efectos moderados a severos. Esta problemática se observa en la mayor parte de las parcelas localizadas en las Terrazas aluviales de la parte suroeste de la zona.

*Tierras con limitantes severas.* En este rubro se incluyeron los afloramientos rocosos (A) como los observados en las facetas 2, 3, 10 y 11, las Tierras Malas (Bl) y los lugares donde el suelo ha perdido totalmente su potencial bioproductivo (Pu), los cuales abarcan una superficie de 10.17 km<sup>2</sup> (3.76%). Estos terrenos, que muestran el mayor nivel de deterioro y son prácticamente irrecuperables, se encuentran en las Terrazas aluviales (F9) y en las sierras escarpadas.

*Degradación y factores causantes.* Los principales factores y procesos que favorecen la degradación del sitio son: deforestación, desmontes, extracción y quema de la cobertura vegetal; cambio de uso del suelo, sobrepastoreo, incorporación de nuevas áreas al cultivo; actividad minera, que incluye la extracción de mármol y talco en minas a cielo abierto y la producción de sal; contaminación por aporte de residuos municipales y por emisión de polvo a la atmósfera y depósito de éstos en áreas de cultivo y/o vegetación natural.

*Tierras con tasas de degradación nula.* Existen 115.75 km<sup>2</sup> (42.79%) de terrenos estables con cobertura vegetal natural permanente (Sn) como se presentó en la faceta 2 y terrenos con cobertura vegetal natural vulnerable, facetas 5, 8 y 9, donde los factores de degradación no han afectado de forma significativa los sistemas naturales. Estos lugares se califican como sitios naturales donde los ecosistemas presentan mayor nivel de conservación.

*Evaluación de tierras estables con sistemas de conservación.* Aquí se incluyen 24.62 km<sup>2</sup> (9.10%) de terrenos estabilizados por intervención humana con prácticas de conservación (Sh), como terraceo de las zonas aluviales con barreras físicas estabilizadoras combinadas con cercas vivas de mezquite, agave y cactáceas columnares; terrenos estables con eliminación parcial de la vegetación natural e introducción de cultivos anuales y perennes, solares, plantaciones, sistemas agroforestales y con prácticas de reforestación (facetas 6, 7, 8 y 12).

*Regeneración Natural (R).* Se identificaron 9.53 km<sup>2</sup> (3.52%) de tierras que fueron modificadas para diversos fines y posteriormente abandonadas. Actualmente presentan un proceso natural de sucesión secundaria, formándose un matorral espinoso secundario de *Prosopis* con *Cercidium*. Lo relevante del sitio es la regeneración del suelo y la tendencia a recuperar el sistema natural, como sucede en algunos puntos de la faceta 9.

#### 4.5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis multivariado de agrupación para determinar la influencia de los principales factores ambientales en la distribución de la vegetación y la correlación entre las diferentes unidades ambientales

identificadas a lo largo de la toposecuencia. Como parámetros de referencia se consideraron: altitud, temperatura media anual, precipitación anual, grado de pendiente, forma del relieve, litología, unidad de suelo, vegetación y estabilidad del suelo. En la Figura 6, que muestra el análisis de similitud por distancia euclidiana obtenido para las diferentes unidades ambientales estudiadas, se puede observar la presencia de tres grupos: Grupo 1 formado por las facetas 1, 2, 3, 4 y 10 que se correlacionan por la presencia de calizas, conglomerados calcáreos, pendientes fuertes, relieves rectos y cóncavos, además de mostrar suelos calcáreos. Grupo 2 conformado por las facetas 11, 12 y 13, cuya agrupación se atribuye a que representan la zona de contacto litológico entre la Formación Zapotitlán, el complejo basal y la Formación Matzitzi, además de que es una zona fisiográficamente diferente con microclima que presenta características de trópico seco. El Grupo 3 está constituido por las facetas 5, 6, 9 y 7, las cuales son agrupadas por presentar sustratos de calizas y lutitas, unidades geomorfológicas de lomas, suelos de Feozem calcárico, así como las temperaturas más altas y la menor precipitación. Por último, se asocia la faceta 8, que corresponde a las Terrazas aluviales, la cual, por su origen, tipos de sustratos, formación de suelos, temperatura más alta, precipitación más baja de todas las facetas, y cobertura vegetal presentes se separa del Grupo 3 y se clasifica como una unidad completamente diferente que contrasta con los demás sitios.

La Figura 7 muestra el análisis de agrupación de los parámetros ambientales evaluados, y esquematiza la formación de un grupo que está constituido por el grado de pendiente, la forma del relieve y la altitud. La distribución y establecimiento del Palmar, el Matorral Esclerófilo Perennifolio y el Matorral Rosulifolio se correlaciona con este tipo de agrupación de parámetros. Otro grupo formado por la precipitación, tipo de suelo y litología, explica la disposición de las facetas 5, 6 y 7 en la zona de Zapotitlán;

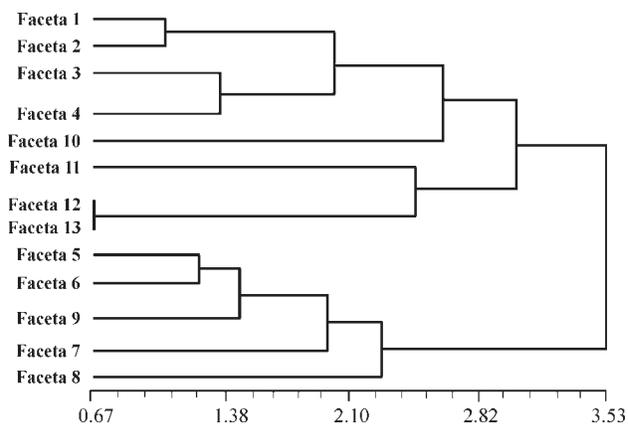


Figura 6. Gráfica del análisis de similitud de las unidades ambientales identificadas (coeficiente de similitud por distancia euclidiana).

y de igual forma la agrupación de las facetas 11, 12 y 13 en Los Reyes Metzontla y San Francisco Xochiltepec. Los tipos de agrupamientos formados explican dos tendencias: una distribución de las comunidades vegetales en forma de gradiente y la formación de unidades discretas con límites espaciales muy definidos, que dependen de la forma de combinación de los parámetros evaluados.

Finalmente, la información obtenida indica que se requiere planear estrategias de conservación biótica en las facetas 1, 2, 9, 10 y 11; de restauración en las facetas 3, 4, 5, y 6; y de conservación y mejoramiento de suelos en las facetas 7, 8, 12 y 13.

## 5. Conclusiones

La toposecuencia presentó una diversidad de 13 unidades ambientales, consecuencia de la diversidad de geoformas, litología y suelos, producto de procesos geológicos como plegamientos y tectonismo regional, de la sucesión de medios ambiente en el pasado y de una morfogénesis edáfica característica de suelos de origen calcáreo.

La toposecuencia estudiada mostró la presencia de diez tipos de vegetación, cuya distribución sigue dos tendencias: la existencia de gradientes ambientales, como lo demuestra el Palmar, el Matorral Esclerófilo Perennifolio y el Matorral Rosetófilo, y la formación de unidades discretas como se presentó en el Mezquital y la Selva Baja Caducifolia, dependiendo de la manera como se combinan los parámetros ambientales evaluados.

El Valle Aluvial manifiesta un comportamiento muy diferente a las otras unidades ambientales determinadas y es uno de los sistemas más dinámicos, cambiando frecuentemente de acuerdo con los procesos de maduración y evolución de la subcuena.

Las actividades mineras, pecuarias y la agricultura que

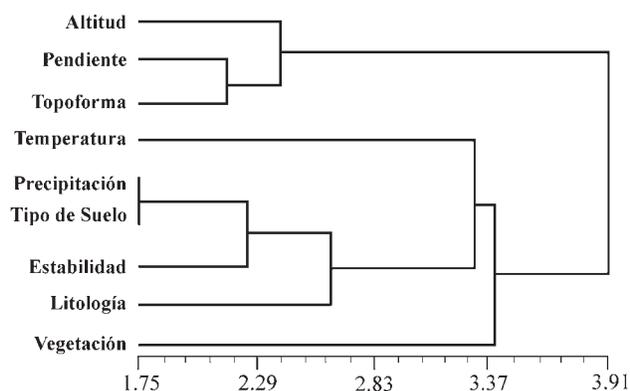


Figura 7. Gráfica del análisis de agrupación de los parámetros ambientales evaluados (coeficiente de similitud por distancia euclidiana).

se desarrollan en suelos de poca vocación agrícola son los principales factores que provocan la degradación de la cuenca.

Finalmente, la aplicación del análisis integral de las toposecuencias aporta de una manera rápida información geográfica, biótica y de manejo de las zonas que permiten de forma sencilla hacer una evaluación de los elementos, componentes y procesos específicos que suceden dentro de la zona.

## Agradecimientos

Agradecemos la participación del Dr. Oswaldo Téllez, del Laboratorio de Recursos Naturales de la UBIPRO-FES Iztacala, por su aporte de información climática de la zona y por su colaboración en la revisión del manuscrito. Al Dr. Gilberto Hernández Silva, del Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, por sus aportes en la corrección del documento.

## Referencias bibliográficas

- Aguilera, J.G., 1906, Excursion de Tehuacán a Zapotitlán et San Juan Raya, en X Congreso Geológico Internacional, Libro-Guía: México, International Geological Congress, 7, 27 p., 1 mapa.
- Aguilera-Herrera, N., 1970, Suelos de las zonas áridas de Tehuacán, Puebla y sus relaciones con las Cactáceas: Cactáceas y Suculentas Mexicanas, Boletín de la Sociedad Cactológica de México, 15(3), 51-63.
- Alencáster de Cserna, G., 1956, Pelecípodos y Gasterópodos del Cretácico Inferior de la región de San Juan Raya, Zapotitlán, Edo. de Puebla: Paleontología Mexicana, 2, 47 p.
- Applegarth, M.T., Dahms, D.E., 2001, Soil catenas of calcareous tills, Whiskey Basin, Wyoming, USA: Catena, 42(1), 17-38.
- Barceló-Duarte, J., 1978, Estratigrafía y Petrografía Detallada del Área de Tehuacán-San Juan Raya, Edo. de Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 143 p.
- Barrera-Cabrera, C., 2001, Descripción y regionalización fisiográfica del Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, tesis profesional, iv, 93 p.
- Bergeron, Y., Leduc, A., 1998, Relations between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreak in the Southeastern Canadian forest: Journal of Vegetation Science, 9, 493-500.
- Bockheim, J., Gennadiyev, A., 2000, The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base: Geoderma, 95(1-2), 53-72.
- Bowers, M., Dooley, J., 1999, A controlled, hierarchical study of habitat fragmentation: response at the individual, patch, and landscape scale: Landscape Ecology, 14(4), 381-389.
- Braun-Blanquet, J., 1979, Fitosociología: Bases para el Estudio de las Comunidades Vegetales: Madrid, Blume, 820 p.
- Buitrón, B.E., 1970, Equinoides del Cretácico inferior de la región de San Juan Raya-Zapotitlán, Estado de Puebla: Paleontología Mexicana, 30, 46 p.
- Buitrón, B.E., Barceló-Duarte, J., 1980, Nerineidos (Mollusca-Gastropoda) del Cretácico Inferior de la región de San Juan Raya, Puebla: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 4(1), 46-55.
- Calderón-García, A., 1956, Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Pue., en XX Congreso Geológico Internacional, Excursión

- A-11: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 9-27.
- Casas, A., Valiente-Banuet, A., Viveros, J.L., Caballero, J., Cortés, L., Lira, R., Rodríguez, I., 2001, Plant resources of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, México: *Economic Botany*, 55(1), 129-166.
- Compton, R., 1985, *Geology in the field*: New York, John Wiley & Sons, 398 p.
- Cottan, G., Curtis, J.T., 1956, The use of distance measures in phytosociological sampling: *Ecology*, 37, 451-460.
- Curiel-Casares, J.L., Espinosa-Gasca, E., 1997, Planeación, manejo de recursos naturales y desarrollo sustentable. La guía del instructor: México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 84 p.
- Danserau, P., 1951, Description and recording of vegetation upon a structural basis: *Ecology*, 32, 172-229.
- Dávila, P., 1997, Tehuacán-Cuicatlán Region, México, in Davis, S.D. (ed.), *Centres of Plant Diversity*: Cambridge, The World Wide Fund for Nature (WWF), The World Conservation Union (IUCN), 139-143.
- Dávila-Aranda, P., Villaseñor-Ríos, J.L., Medina-Lemos, R., Ramírez-Roa, A., Salinas-Tovar, A., Sánchez-Ken, J., Tenorio-Lezama, P., 1993, Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, *Listado Florístico de México*, 10, 195 p.
- de Blois, S., Domon, G., Bouchard, A., 2001, Environmental, historical, and contextual determinants of vegetation cover; a landscape perspective: *Landscape Ecology*, 16(5), 421-436.
- Engel, S., Gardner, T., Ciolkosz, E., 1996, Quaternary soil chronosequences on terraces of the Susquehanna Rive, Pennsylvania: *Geomorphology*, 17(4), 273-294.
- Eyre, S.R., 1979, *Vegetation and Soils: a World Picture*: Gran Bretaña, Edward Arnold Publishers Ltd., 328 p.
- Félix J., Lenk, H., 1891, Uebersicht über die geologischen Verhältnisse des mexicanischen Staates Puebla: *Palaeontographica*, 37, 117-139.
- Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Engelmark, O., Wotton, B.M., 1998, Future wildfire in circumboreal forest in relation to global warming: *Journal of Vegetation Science*, 9(4), 469-476.
- Food Agriculture Organization (FAO), 1997, *Informes de avance: Programa 21, capítulo 10: Planificación y ordenación integradas de los recursos naturales*: <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO.ood>
- Food Agriculture Organization (FAO), 1997, *Informes de avance: Programa 21, capítulo 10: Planificación y ordenación integradas de los recursos naturales*: <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO>.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations, Educational, Scientific and Cultural Organizations (FAO-UNESCO), 1994, *World Reference Base for Soil Resources*: Roma, International Soil Reference and Information Centre, 161 p.
- Food and Agricultural Organizations of the United Nations, Educational, Scientific and Cultural Organizations (FAO-UNESCO), 1998, *The World Reference Base for Soil Resources*: Roma, International Society of Soil Science, International Soil Reference and Information Centre, *World Soil Resources Report* 84, 163 p.
- García, E., 1973, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana: México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2ª ed., 246 p.
- García-Martínez, M.G., 2002, Mapeo y caracterización de los suelos de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores Iztacala, tesis profesional, 78 p.
- García-Oliva, F., 1991, Influencia de la dinámica del paisaje en la distribución de las comunidades vegetales en la cuenca del río Zapotitlán, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, *Investigaciones Geográficas*, 23, 53-70.
- Geissert, D., Rossignol, J.P., (coord.) 1987, *La Morfoedafología en la Ordenación de los Paisajes Rurales; conceptos y primeras aplicaciones en México*: Xalapa, Veracruz, México, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos INIREB-ORSTOM, Institut Francais de Recherche Scientifique por le Developpement en Cooperation, 83 p.
- Gobin, A., Campling, P., Deckers, J., Feyen, J., 1998, Integrated toposequence analysis at the confluence zone of the River Ebonyi headwater catchment (south eastern Nigeria): *Catena*, 32(3-4), 173-192.
- Gobin, A., Campling, P., Deckers, J., Feyen, J., 2000, Integrated toposequence analyses to combine local and scientific knowledge systems: *Geoderma*, 97(1-2), 103-123.
- González-Quintero, L., 1968, *Tipos de vegetación del Valle del Mezquital*, Hgo.: México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Departamento de Prehistoria, 49 p.
- Goytia, M.A., Granados, D., 1981, Estudio florístico-sinecológico del Valle de Tehuacán, Puebla (resumen), en VIII Congreso Mexicano de Botánica: Morelia, Michoacán, Sociedad Botánica de México, 67.
- Hernández, B.A., 1985, Cartografía geomorfológica detallada aplicada al reordenamiento espacial de las actividades turísticas. El caso de las grutas de Tolantongo, estado de Hidalgo: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, p. 15-20.
- Huggett, R., 1998, Soil chronosequences, soil development, and soil evolution; a critical review: *Catena*, 32(3-4), 155-172.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1981, *Carta Fisiográfica, Hoja México, escala 1:1000,000*: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1984a, *Carta topográfica Atzumba, E14 B75, escala 1:50,000*: México, Instituto de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1984b, *Carta topográfica Tehuacán, E14 B75, escala 1:50,000*: México, Instituto de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Kent, M., Coker, P., 1995, *Vegetation description and analysis; a practical approach*: New York, John Wiley & Sons, 363 p.
- Ledezma, A.R., 1979, *Tipos de vegetación y algunas características ecológicas en que se desarrolla, en los municipios de Caltepec y Zapotitlán Salinas, Puebla*: Monterrey, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis profesional.
- McKenzie, N.J., Austin, M.P., 1993, A quantitative australian approach to medium and small - scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation: *Geoderma*, 57(4), 329-355.
- Milne, J.A., Birch, C.P.D., Hester, A.J., Armtrong, H.M., Robertson, A., 1998, The impact of vertebrate herbivores on the natural heritage of the Scottish uplands. A review: *Scott Natural Heritage Review*, 95, 127 p.
- Miranda, F., Hernández, X.E., 1963, Los tipos de vegetación de México y su clasificación: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28, 29-179.
- Mitchell, R.J., Marrs, R.H., Le Ducc, M.G., Auld, M.H.D., 1999, A study of the restoration of headland on sucesional sites; changes in vegetation and soil properties: *Journal of Applied Ecology*, 36(5), 770-783.
- Mueller-Dombois, D., Ellenberg, H., 1974, *Aims and methods of vegetation ecology*: New York, Wiley, 547 p.
- Müllerried, F.K., 1934, *Estudios paleontológicos y estratigráficos en la región de Tehuacán, Puebla*: Universidad Nacional Autónoma de México, *Anales del Instituto de Biología*, 5, 55-88.
- Muñoz, I.D., Mendoza C.A., López G.F., Hernández M.M., Soler A.A., 2001, *Manual de análisis de suelos*: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, 82p.
- Neri-Gámez, D.M., 2000, *Caracterización hidrológica de la Subcuenca Baja del Río Zapotitlán, Puebla*: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, tesis profesional, 85 p.
- Oldeman, L.R., 1988, *Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation*: Germany, International Soil Reference and Information Centre, 38 p.
- Oliveros-Galindo, O., 2000, *Descripción estructural de las comunidades vegetales en las terrazas fluviales del río Salado en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México*: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios

- Profesionales Iztacala, tesis profesional, 81 p.
- Ortiz-Pérez, M.A., 1990, Perfiles Geomorfológicos Complejos; significado y aplicación en la interpretación morfotectónica: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Serie Varia, 1(12), 46 p.
- Ortiz-Solorio, C.A., Cuanalo de la Cerda, H.E., 1978, Metodología del levantamiento fisiográfico; un sistema de clasificación de tierra: Chapingo, Colegio de Posgraduados, 85 p.
- Ortiz-Solorio, C.A., Cuanalo de la Cerda, H.E., 1981, Introducción a los levantamientos de suelos: Chapingo, Colegio de Posgraduados, 80 p.
- Osorio-Betancourt, O., 1996, Descripción de la vegetación en los alrededores del cerro Cutac, en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis profesional, 48 p.
- Osorio-Betancourt, O., Valiente-Banuet, A., Dávila, P., Medina, R., Valiente-Banuet, P. Dávila, R. Medina, 1996, Tipos de vegetación y diversidad en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México: Boletín de la Sociedad Botánica de México, 59, 35-58.
- Park, S., Mc Sweeney, K., Lowery, B., 2001, Identification of the spatial distribution of soils using a precess-based terrain characterization: Geoderma, 103(3-4), 249-272.
- Pérez, C.M., Castillo, O.A., Ríos, M.O., Rosenweig, A.R., 1997, La vegetación del Valle de Tehuacán y su aprovechamiento por las comunidades locales, en De la Lama, E (ed.), Simposium Internacional Simposium Internacional del Valle de Tehuacán-Cuicatlán y su entorno— balance y perspectivas: México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 449-456.
- Phillips, J., 2001, Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability: Catena, 43(2), 101-113.
- Raunkiaer, C., 1934, The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography: Oxford, Clarendon, 237 p.
- Richards, P.W., 1952, The Tropical Rain Forest; an Ecological Study: Cambridge, Cambridge University Press, 450 p.
- Rzedowski, J., 1978, Vegetación de México: México, Limusa, 432 p.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 1993, Ordenamiento ecológico general del territorio nacional; memoria técnica y metodología: México, Secretaría de Desarrollo Social, 54 p.
- Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología (SEDESOL-INE), 1993, Ordenamiento ecológico general del territorio nacional: México, Secretaría de Desarrollo Social, 202 p.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), 1996, Ordenamiento ecológico; Términos de referencia generales: [http://www.ine.gob.mx/ord\\_ecol/introdu.html](http://www.ine.gob.mx/ord_ecol/introdu.html).
- Sheng, T.C., 1992, Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrológicas; estudio y planificación de cuencas hidrográficas: Rome, Food and Agricultural Organization, Guía FAO-UNESCO Conservación, 13(6), 185 p.
- Skinner, J.B., Porter, S.C., 1987, Physical Geology: Chichester, John Wiley & Sons, 750 p.
- Skinner, J.B., Porter, S.C., 2000, The Dynamic Earth; an Introduction to Physical Geology: New York, John Wiley & Sons, 575 p.
- Smith, C.E., 1965, Flora of Tehuacán Valley: Fieldiana Botany, 31, 101-110.
- Sommer, M., Schlichting, E., 1997, Archetypes of catenas in respect to matter-a concept for structuring and grouping catenas: Geoderma, 76(1-2), 1-33.
- Strahler, A.H., Strahler, A.N., 1992, Modern physical geography: New York, John Wiley & Sons, 4<sup>th</sup> ed., 638 p.
- Téllez-Valdés, O., Dávila-Aranda, P., 2003, Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán–Cuicatlán Biosphere Reserve, México: Conservation Biology, 17(3), 846-853.
- Valiente-Banuet, A., 1991, Dinámica del establecimiento de cactáceas: patrones generales y consecuencias de los procesos de facilitación por plantas nodrizas en desiertos: México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, p. varia.
- Valiente-Banuet, A., Arias, S., 1997, Guía de excursión botánica al Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en I Congreso Nacional sobre las Cactáceas: México, Sociedad Mexicana de Cactología, 2-3.
- Valiente-Banuet, A., Arizmendi, M.C., 1998, El escenario ambiental del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en Tehuacán, horizonte del tiempo: Club Rotario Tehuacán-Manantiales, Patrimonio Histórico de Tehuacán, A.C., 10-14.
- Valiente-Banuet, A., Ezcurra, E., 1991, Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetetzo* and the nurse shrub *Mimosa luisan*: Journal of Ecology, 2, 11-14.
- Valiente-Banuet, A., Arizmendi, M.C., Rojas-Martínez, A., 1996a, Nectar-feeding bats in columnar cacti forests of central Mexico: Bats, 14(2), 12-15.
- Valiente-Banuet, A., Arizmendi, M.C., Rojas-Martínez, A., Domínguez-Canseco, L., 1996b, Ecological relationships between columnar cacti and nectar feeding bats in Mexico: Journal of Tropical Ecology, 11, 1-17.
- Valiente-Banuet, A., Casas, A., Alcántara, A., Dávila, P., Flores-Hernández, N., Coro-Arizmendi, M., Villaseñor, J.L., Ortega-Ramírez, J., 2001, La vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: Boletín de la Sociedad Botánica de México, 67, 24-74.
- van Linden G.W.J., Oldeman, L.R., 1997, The Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD): Wageningen, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 41p.
- Villada, M.M., 1905, Una exploración a la cuenca fosilífera de San Juan Raya, estado de Puebla, en Conferencia en el Museo Nacional, Sección de Historia Natural: México, Museo Nacional, 44 p, láms. A-K., láms. A-K.
- Villaseñor, J.L., Dávila, P., Chiang, F., 1990, Fitogeografía del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: Boletín de la Sociedad Botánica de México, 50, 135-149.
- Whittaker, R.H., 1975, Communities and Ecosystems: New York, Mac Millan, 158 p.
- Zavala-Hurtado, J.A., 1980, Estudios Ecológicos en el Valle Semiárido de Zapotitlán de las Salinas, Puebla; Clasificación de la Vegetación: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis profesional, 159 p.

Manuscrito recibido: Octubre 14, 2002

Manuscrito corregido recibido: Mayo 25, 2003

Manuscrito aceptado: Junio 16, 2003