

CARACTERIZACIÓN DE LAS REGIONES TECTÓNICAS DEL ESTADO DE MÉXICO A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE GEOTECNOLOGÍAS

*Delfino Madrigal Uribe, Roberto Franco Plata, Luis Miguel Espinosa Rodríguez, María Arcelia González Trápaga y Armando Reyes Enríquez**

Resumen

El estudio muestra los resultados de una investigación sobre la regionalización tectónica del Estado de México utilizando una metodología que combina métodos convencionales de gabinete y de campo, con geotecnologías como la iluminación de modelos digitales del terreno, la clasificación de imágenes de satélite y la confrontación con otras investigaciones geológicas y geomorfológicas, cuyo resultado define la compleja cuadrícula tectónica que compone la superficie del Estado de México, aún con estructuras no identificadas anteriormente.

Palabras Clave: México, Regiones Tectónicas, Geotecnologías, Modelos Iluminados

Abstract

The study shows the results of a tectonic regional investigation of the State of Mexico, using a methodology which combines conventional office and field methods with geotechnologies like DEM illumination models and satellite image classification in combination with other geological and geomorphologic studies. The results of this work have defined the complex tectonic grid characteristic of the surface of the State of Mexico, including previously unknown structures.

Key Words: Mexico, Tectonic Regions, Geotechnologies, Illumination models

*Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec, s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México. C.P. 50110. Tel. 01722-2150255 ext. 141, fax 01722-2143182.
Email: dmadrigalu@uaemex.mx, agonzalez@uaemex.mx.

Fecha recepción: 15 de enero del 2010

Fecha aprobación: 3 de junio del 2010

1. Introducción

El uso de geotecnologías para la caracterización de rasgos geológicos y metalogenéticos es cada vez más significativo, a juzgar por la cantidad de artículos y referencias bibliográficas en las que se registra la aplicación de herramientas automatizadas como las imágenes de radar, la clasificación de imágenes multiespectrales con procedimientos especiales, y más recientemente, con la interpretación de rasgos morfotectónicos a través de modelos digitales del terreno (citas). En Geomorfología, esta caracterización también se hace por métodos automatizados de base raster que implican el cálculo y la caracterización del relieve mediante cuadrículas donde se resaltan las pendientes, la energía del relieve, la densidad del drenaje, la profundidad de la disección y otros parámetros más, todos ellos derivados en mayor parte de la topografía y de los modelos digitales del terreno, los cuales constituyen aplicaciones o extensiones de plataformas de SIG.

En conjunto, estas geotecnologías resaltan diferentes maneras de asociar el relieve del terreno con otros parámetros aerofotográficos como la textura, el tono, las formas de los objetos y los patrones del drenaje; como elementos que delatan la presencia de fallas y fracturas u otras formas asociadas a la litología y la presencia de yacimientos minerales. Sin embargo, a pesar de la novedad de estas tecnologías no pueden sustituir a otros métodos ya tradicionales para la caracterización de los mismos elementos, como las cartas geológicas, la ubicación de focos sísmicos, las oscilaciones gravimétricas, la datación tefracronológica de materiales y la caracterización de parámetros físicos y químicos del agua y de los sedimentos asociados, además del trabajo de campo, las mediciones y el muestreo in situ, que siguen siendo imprescindibles en todos los estudios geológicos y geomorfológicos.

La finalidad última es la de producir reportes más reales y una cartografía más compleja, que combinan tanto las técnicas tradicionales como las técnicas automatizadas, a la manera de dos conjuntos de hipótesis básicas, para la comprobación del mismo resultado.

Este estudio pretendió combinar estos dos conjuntos de técnicas para realizar la caracterización de las regiones tectónicas del Estado de México y completar los estudios geomorfológicos generales realizados en otras áreas de investigación de la facultad de Geografía de la UAEM.

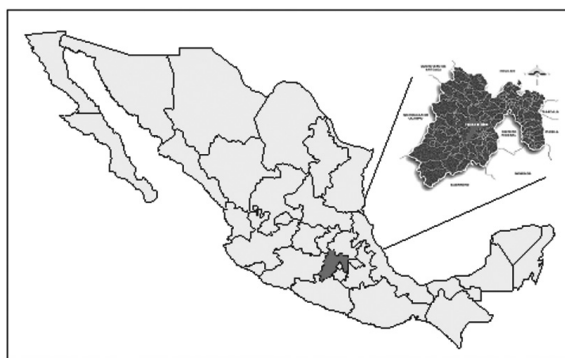
2. Área de Estudio

El área de estudio se circunscribe al Estado de México, en la porción central de México, la cual comprende una superficie de aproximadamente 22,499.95 km², que envuelve casi por completo al Distrito Federal, capital del país. Se ubica geográficamente entre los 98° 35' y los 100° 36' de longitud Oeste y los 18° 21' y los 20° 17' de latitud Norte, limitando con los estados vecinos de Hidalgo y Querétaro al norte, Puebla y Tlaxcala hacia el este, Michoacán al oeste y Morelos y Guerrero hacia el sur.

El relieve del Estado de México está representado por grandes valles lacustres y pequeños valles intermontanos, rodeados por grandes sierras y volcanes aislados que propician la diversidad de altitudes (400 a 4500 m.s.n.m.), tipos de rocas, yacimientos minerales, suelos, climas, tipos de vegetación, fauna, actividades económicas, grupos étnicos y manifestaciones culturales, permitiendo clasificar su territorio como un mosaico multivariado de paisajes naturales y culturales.

Geológica y geomorfológicamente pertenece al Sistema Volcánico Transversal o Transmexicano, caracterizado por rodear a la placa continental de Cocos, a partir de la cual se desarrollan grandes sistemas de fallas y fracturas, asociadas a procesos volcánicos, activos e inactivos, al igual que a una dinámica actividad sísmica.

Figura 1. Ubicación del Estado de México



A la vez que ocurren fenómenos considerados de alto riesgo geológico y geomorfológico, se ha concentrado una gran cantidad de población y de actividades económicas alrededor de los principales centros urbanos, como la Ciudad de México y su área conurbada dentro del Estado de México, a la que se suman los nuevos centros de conurbación en el Valle de Toluca y el Valle de Atlacomulco.

3. Características Generales

En el caso de la configuración tectónica regional se han realizado diversos trabajos que pretenden ubicar y describir las estructuras presentes, inclusive mediante teorías que abarcan regiones mayores a las que comprende el Estado de México. Estas teorías por sí mismas no explican de manera suficiente las diferentes orientaciones de los rasgos tectónicos ni el origen de estas, por lo que deben combinarse para poder complementar las explicaciones de la dinámica y la configuración morfotectónica.

Por otra parte se encuentra la teoría propuesta por de Cserna *et al.* (1987) sobre la existencia de grandes fallamientos conocidos como sizallamientos, cuyo origen y estructura se encuentra estrechamente ligado con la tectónica de placas, en particular con la trinchera mesoamericana y la placa de Cocos, desde donde cruzan la república con una orientación SW-NE. El Estado de México se encuentra surcado de lado a lado por cuatro de estos grandes sizallamientos, a los que se asoció en gran parte el sismo de 1985.

Por otro lado se encuentra la teoría de los grandes arcos tectónicos, propuesta por Mooser *et al.* (1996), donde se manejan grandes conjuntos de fallas y fracturas de orientación básica W-E a manera de arcos que abarcan grandes secciones del Sistema Volcánico Transversal o Eje Volcánico Transmexicano (Demant, 1978). De estos conjuntos, el Estado de México se encuentra cruzado por el Arco Tarasco en toda su parte norte y por el arco Chichinauhtzin en toda su parte sur, abarcando sobre todo las sierras de la Goleta, Tenango y Chichinauhtzin.

No obstante, estas dos teorías no explican ni describen muchas de las estructuras tectónicas de orientación N-S o SE-NW, que cortan o cruzan los sizallamientos y los arcos tectónicos, por lo que la teoría del basculamiento, compuesta por las aportaciones de muchos estudiosos como Alanís *et al.* (2002), Solleiro *et al.*, García-Palomo *et al.* (2002), Capra *et*

al. (2003), Martínez *et al.* (2003) o aquellas derivadas de tesis de licenciatura sobre Geomorfología (Mendiola, 1999; Guadarrama, 2001; Martínez, 2003; Silva y Medina, 2003; Escalona *et al.*, 2005; Miranda, 2006 y Hernández, 2007, entre otras), en las que se muestran diferentes morfoestructuras identificadas mediante análisis morfométricos y la confrontación bibliográfica, parece explicar con mayor claridad estos alineamientos.

También existen estudios que han representado la Geología del Estado de México (UNAM-GEM, 2000) y que registran muchos de las fallas y fracturas de la entidad, aunque no rescatan todas las aportaciones de otros autores, al igual que los sondeos y reportes particulares de las compañías mineras que actualmente explotan yacimientos dentro de la entidad y que detallan los accidentes locales, relacionados con éstas.

Si bien muchas de estas estructuras han sido extensamente estudiadas, como la Falla Chapala-Acambay, la Falla de Perales o los sistemas de fallas que se encuentran asociados a los yacimientos metalogenéticos, como la Falla Taxco-San Miguel, lo cierto es que muchas otras han sido descritas más recientemente (como la triple caldera de Villa de Allende) o bien no han sido caracterizadas, debido a que se encuentran enmascaradas por capas de sedimentos, asentamientos humanos o coberturas de vegetación, que dificultan su identificación en fotografías aéreas o a través del trabajo de campo.

4. Marco Teórico-conceptual

En este trabajo se combinaron las tres teorías que se han presentado para explicar la presencia de rasgos tectónicos en la entidad, tanto la teoría de los grandes sizallamientos regionales, sobre todo los que atraviezan el Estado de SW a NE, desde la costa o la depresión del Río Balsas, como también la teoría de los arcos tectónicos de orientación E-W, y la teoría de los basculamientos, ésta última propia de la escuela de geomorfología rusa (Kostenko, 1987). Estas teorías están más relacionadas con el origen y dinámica regional de las grandes estructuras tectónicas, como grandes conjuntos.

En la práctica, estas teorías fueron validadas por otras más relacionadas directamente con la morfometría y la morfología del relieve (Lugo Hubp, 1988; Ortiz), de modo que los rasgos tectónicos son identificados a través de parámetros como la energía del relieve, la profundidad de disección, la densidad del drenaje, la pendiente, la exposición de

las laderas y otros parámetros relacionados con el reconocimiento de las geoformas. Estas teorías en conjunto pretendieron reconocer la configuración externa de las morfoestructuras tectónicas. Complementariamente, se encuentran las teorías que se relacionan con el reconocimiento de las grandes rupturas de la corteza profunda, las cuales solamente pueden ser reconocidas por estudios gravimétricos, geomagnéticos y sísmicos, de los cuales se aprovecharon los existentes en los centros de investigación altamente especializados del país (Urrutia y Flores, 1996; Mendiola, 1999). El propósito de registrar cartográficamente estos estudios es hacer coincidir las zonas críticas de la ruptura de la corteza terrestre, relacionadas con la tectónica de placas, con las evidencias externas de tipo geomorfológico.

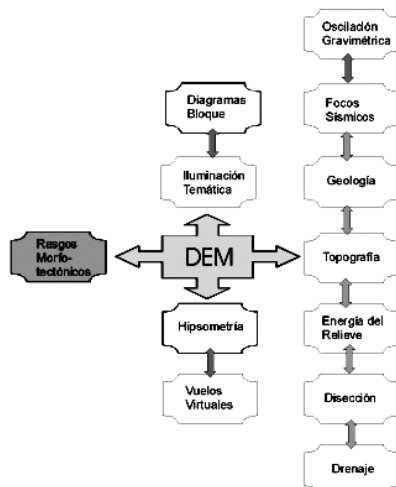
Finalmente, el estudio relacionó todo lo anterior con las características litológicas, sobre todo en las zonas de discontinuidad o de contacto geológico, con las secuencias estratigráficas, las discontinuidades, los rumbos, echados, rosas de fracturas, grados de metamorfismo y otros parámetros que se derivan del trabajo de campo, de los cuales existen más de 200 estudios. El propósito final era combinar todas estas teorías y métodos como un grupo completo de hipótesis o de evidencias, cuyo conjunto estableciera un mayor margen de certeza para el reconocimiento final de las morfoestructuras, así como de su estado y peligrosidad.

5. Marco Metodológico

En la metodología se combinaron diversos métodos de gabinete y de campo, con procedimientos geotecnológicos como la clasificación de imágenes de satélite, el manejo de DEM, la elaboración de proyecciones ortográficas, vuelos virtuales y modelos iluminados del terreno.

Para la caracterización de los rasgos morfotectónicos el enfoque teórico metodológico se centró en el uso de los modelos digitales del terreno (DEM) como elemento base a partir del cual se podía contrastar el relieve con los resultados de otros estudios tradicionales y automatizados, generalmente sobreponiendo las temáticas cartográficas sobre el DEM, a través de un método conocido como modelos iluminados. En éstos, el tema se transparenta conservando el color de los cartogramas o unidades sobre el relieve sombreado del modelo, pudiendo soportar también la sobreposición de mapas con puntos y líneas como los trazos de las fallas y las fracturas, además de focos sísmicos, carreteras y localidades.

De esa manera el modelo cumple con los requisitos de un mapa complejo y permite contrastar la ruptura de la pendiente con la geología o los contactos litológicos y hacer inferencias sobre los procesos tectónicos y su grado de actividad sísmica o gravimétrica. Lo mismo puede decirse de los parámetros geomorfológicos como la energía del relieve, la pendiente o la densidad del drenaje, que al contrastarse con la visualización del relieve, permiten hacer de nuevo inferencias sobre estas geoformas.



La visualización de los rasgos tectónicos en los modelos iluminados varía sensiblemente según la escala manejada, por lo que para la escala regional se manejó una escala 1:250 000 y para la escala local una escala 1:50 000, armando mosaicos a partir de la escala 1:100 000 cuando lo ameritaba la confirmación de un conjunto de rasgos tectónicos. En todos los casos se manipularon los DEM producidos por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), después de un proceso de estandarización y depuración de los datos. También se manejó directamente el mapa topográfico del INEGI a las mismas escalas, con la finalidad de producir mapas hipsográficos o utilizar los datos sobre hidrología superficial, también después de pasar por una limpieza topológica, utilizando principalmente AUTOCAD MAP 2000.

Los cálculos de las pendientes, la energía del relieve y la profundidad de disecación, típicos de los análisis geomorfológicos se obtuvieron directamente a través del cálculo y la manipulación de los DEM señalados, mediante aplicaciones raster en IDRISI ANDES o en ARC-GIS 9.2.

Aparte fueron utilizados los datos de la Carta Geológica, escala 1:250 000, que fue elaborada por el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Dirección de Promoción Minera e Industrial del Gobierno del Estado de México, para el año 2000, la cual fue digitalizada en modo vectorial en AUTOCAD MAP 2000 en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Facultad de Geografía. Dicho mapa fue procesado posteriormente tanto en ARC-GIS versión 9.0 (vector) como en IDRISI ANDES (raster) para la iluminación de los modelos. Del mismo modo se capturaron los datos sobre sismicidad para la entidad, así como los registros gravimétricos disponibles sobre solamente algunas zonas de mayor importancia para la entidad, a través de datos y reportes de los Institutos de Geología y de Geofísica de la UNAM.

Aunque la literatura actual maneja el uso de imágenes de radar para una caracterización mayor de los rasgos tectónicos, no se han podido obtener imágenes para la entidad, lo que confirmaría tanto la litología como el contraste del relieve. En su lugar se clasificaron imágenes multiespectrales LANDSAT ETM del año 2000 para toda la entidad, utilizando el método de discriminación progresiva de firmas espectrales para las bandas 1 y 2, así como las bandas térmicas y campos de entrenamiento basados en registros y muestreos de rocas en campo, con la finalidad de aislar los componentes litológicos, discriminar la interferencia de la vegetación y clasificar la geología.

Los resultados de esta clasificación fueron montados nuevamente como temáticas complementarias en los modelos iluminados, con la finalidad de desahogar la mayor parte de las aplicaciones geotecnológicas disponibles para la caracterización de rasgos morfotectónicos. De la misma manera se desarrollaron montajes en proyecciones ortográficas en bloque y en vuelos virtuales de compuestos de color de las imágenes de satélite, que complementaron los análisis de los accidentes tectónicos (IDRISI ANDES).

Antes y después del proceso de iluminación de los modelos con los mapas geológicos, de las imágenes clasificadas, los mapas sísmicos y los gravimétricos se realizaron recorridos de campo para la verificación in situ de las evidencias tectónicas como el desplazamiento de contactos geológicos, rumbos y echados de las fallas o bien el muestreo de rocas, sobre todo en los lugares menos estudiados como el este y sureste de la entidad. Los registros obtenidos fueron contrastados con la base de datos de la Dirección de Minas e industria del Gobierno del Estado de México.

Como complemento final de la metodología, se usó como referencia para la confirmación de rasgos, los resultados de otros estudios geológicos y geofísicos reportados en la bibliografía, en las que se reportan fallas y fracturas estudiadas con mayor detalle.

6. Resultados

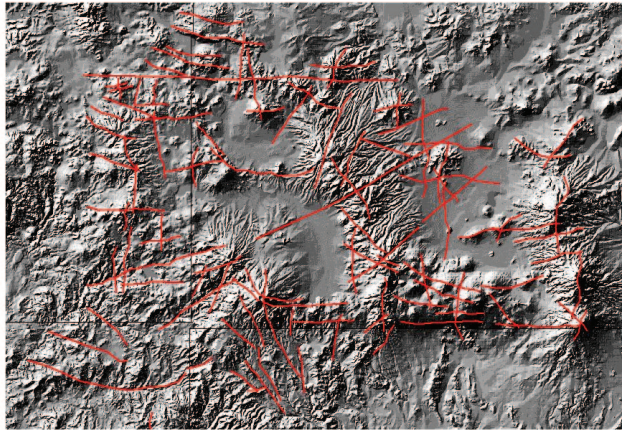
Los resultados obtenidos se presentan en dos ambientes distintos o escalas. Por un lado se encuentran los rasgos de tipo regional, que permiten dimensionar grandes accidentes tectónicos que abarcan varias entidades, pero que cruzan o se encuentran cercanos al territorio del Estado de México. Por el otro, se describen los accidentes que son más evidentes a nivel local y que asocian más claramente los contactos litológicos con la ruptura de la pendiente, la energía del relieve y la presencia de eventos volcánicos relacionados. En ambos casos se siguió la misma metodología, aunque para el caso regional fue más útil la asociación del modelo digital con la iluminación del mapa geológico general 1:250 000 y la incidencia de focos sísmicos, mientras que para el caso de los accidentes locales fue más válida la asociación con la hipsografía, la pendiente y la energía del relieve, a la vez que con la geología y la sismicidad. De esa manera se obtuvieron 10 mapas iluminados para la escala 1:250 000 y 140 mapas iluminados complejos a la escala 1:50 000, de los cuales se presentan tan sólo en esta publicación dos de los mapas regionales complejos y tres de los mapas locales complejos, correspondientes a la zona de valle de Bravo, así como un diagrama ortográfico de bloque de la misma zona. En todo caso, se hace un mayor énfasis en la descripción regional.

Dentro de la configuración tectónica regional se ubicaron y caracterizaron las grandes morfoestructuras: las que parecen ser confirmadas por los grandes cizallamientos regionales que se reportan en las investigaciones del Instituto de Geología (De Czerna, *et al*, 1987), tanto en la dirección SW-NE como en la dirección SE-NW, siendo las más importantes las que atraviesan el Valle de Toluca y el Valle de México (SW-NE), como también las que parecen explicar la existencia de grandes arcos tectónicos, como el Arco Tarasco y el Arco Mezcala, de alineación predominante E-W (Mooser *et al.*, 2000), al igual que los rasgos tectónicos producidos por

basculamientos tectónicos locales y que han sido descritos por una gran cantidad de autores.

El método combinado confirma la presencia de muchos de los rasgos reportados para accidentes tectónicos conocidos como la Falla Chapala-Acambay (E-W), la Falla de Perales (SE-NW), el Sistema Taxco-San Miguel de Allende (N-S), el Sistema Chichinahutzin (E-W) o el Sistema tectónico de la Sierra Nevada (N-S), así como también los derivados de estudios más recientes, como el sistema tectónico de la triple Caldera de Zitácuaro (N-S), los campos monogenéticos de Ocoyoacan-Calpulhuac (N-S), la Sierra de Tenango (E-W) o la Falla Tenancingo-Zumpahuacán (SE-NW). De igual manera, se confirman estudios de tipo metalogenético como los de las zonas mineras de Zacualpan, Sultepec, Temascaltepec y Zacazonapan, donde se reportan fallas locales y otras asociadas con la Falla Taxco-San Miguel. (Véase figura 2)

Figura 2. Modelo Digital asociado a la detección de Fallas



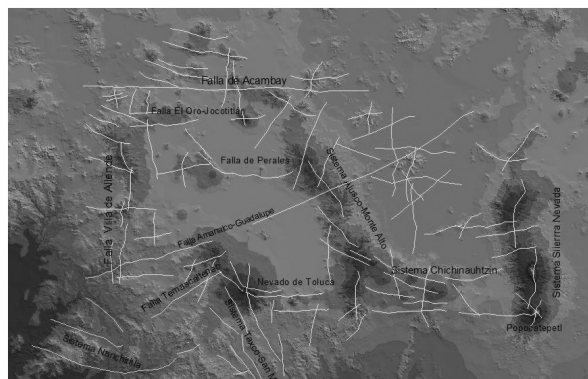
Fuente: DEM escala 1:250 000 del INEGI (2001). Procesamiento para la detección de morfoestructuras tectónicas (rojo), mediante asociación de rasgos del relieve (procesamiento primario)

El procedimiento delata, con la coincidencia entre el modelo digital del terreno con la incidencia de focos sísmicos, la presencia de contactos litológicos y cambios en la pendiente o la oscilación gravimétrica, la presencia de otras fallas no registradas anteriormente o registradas parcialmente.

Ese es el caso de fallas como la de Villa de Allende (N-S), que da origen a la triple caldera que se encuentra entre esta localidad y la de Bosencheve (Capra *et al.*, 2004), continuándose hacia el norte en la Sierra del Campanario y que también es delatada por la aparición de escalones en las rocas calizas de la zona de Ixtapan del Oro y las rocas metamórficas de la zona norte de la Presa de Valle de Bravo. Este escalonamiento también se manifiesta en otras fallas secundarias, como las que cruzan de norte a sur entre Amanalco de Becerra y Donato Guerra, correspondientes a coladas de basalto y conos cineríticos cuaternarios recientes.

Otra falla importante es el sizallamiento que cruza desde la localidad de Palma Chica en Michoacán (tierra caliente) y que en forma de arco cruza las localidades de Zacazonapan y Santo Tomás de los Plátanos, para finalmente pasar junto a Amanalco y seguir encubierta hasta la ciudad de Toluca y la Sierra de Guadalupe, en el Valle de México, atravesando también la Sierra de Monte Alto. Esta morfoestructura es delatada por los cambios constantes en la litología (sobre todo en el cruce con otras fallas como la de Villa de Allende), la presencia de cañadas profundas y bien diseccionadas como la de Santo Tomás de los Plátanos, así como la aparición constante de rocas metamórficas en las charnelas. Sin embargo, lo que confirma su existencia es la alineación de las anomalías geomagnéticas y gravimétricas en un rumbo predominante este-oeste (Flores, 1998), al igual que los sismos (Mendiola, 1999). (Véase figura 3)

Figura 3: Hipsográfico conteniendo los Rasgos Morfotectónicos Regionales



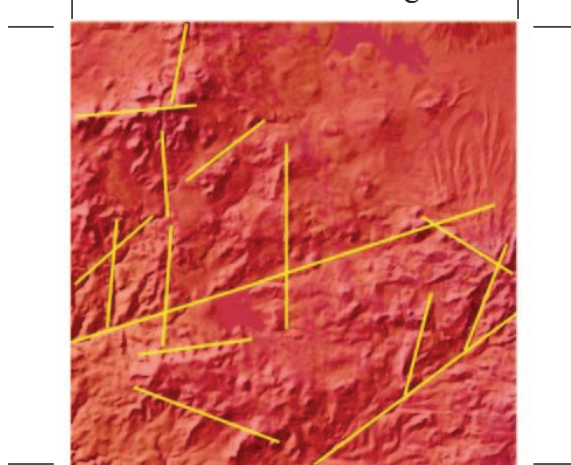
Fuente: Procesamiento del DEM 1:250 000 del INEGI (2000), en ARC-VIEW 3.3

Otra falla, cubierta por entero con materiales de lahares y sedimentos fluvio-glaciales, corresponde a un sizallamiento de orientación SW-NE, que se genera desde Temascaltepec, cruza la sierra del Nevado de Toluca a la mitad y sigue encubierta por los sedimentos lacustres del Valle de Toluca, hasta la Sierra de Monte Bajo; la cual también cruza hasta llegar a la Sierra de Guadalupe y a la zona de Texcoco y luego topa con la esquina noreste de la cuenca del Valle de México, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, en el estado de Puebla. Además de la clara evidencia que tiene en los modelos digitales del terreno 1:250 000, el alineamiento de focos sísmicos y la concentración de las anomalías gravimétricas y geomagnéticas, delatan un rompimiento cortical profundo según estudios recientes (Urrutia y Flores, 1996).

Un sistema de fallas de orientación SE-NW se desarrolló en lo que constituye la Sierra de Nanchititla, al SW de la entidad, el cual se encuentra escasamente estudiado, al ser de los pocos sistemas volcánicos que emerge entre los estratos sedimentarios de calizas, lutitas y margas, muchas veces asociados a cuerpos intrusivos o domos, a veces de composición riolítica o granítica, que parecen condicionar el drenaje de la zona de manera anular. Algunos autores asocian estos cuerpos circulares a arcos volcánicos insulares en la parte final del mesozoico (De Elias, 1992; De Cserna, 1982), como producto de fallas tectónicas profundas a partir del movimiento de placas, lo que implica que en esta zona se desarrolló una antigua línea de costa. (Véase figura 4)

Un sistema de fallas similar se encuentra en la continuidad de varias sierras que limitan el valle de Toluca con el valle de México y cuya estructura tectónica está muy diversificada en cuanto a orientaciones, aunque predominan las fallas de orientación SE-NW. Por un lado, se localiza la sierra del Ajusco, que se incrusta en el Sistema de Fallas de la Sierra de Chichinautzin, y que es producto también de un sizallamiento que lo cruza de SW a NE, que pasa por el centro del Valle de México y termina en la zona de Texcoco (De Cserna *et al.*, 1987); por otro, se encuentra la Sierra de las Cruces, donde a la dirección predominante de un sistema de fallas paralelas SE-NW (todas ellas activas), se sobreponen muchas fallas pequeñas E-W y el gran sizallamiento Amanalco-Sierra de Guadalupe, que inclusive lo separa claramente de la Sierra de Monte Alto.

Figura 4: Modelo iluminado con imagen de banda térmica

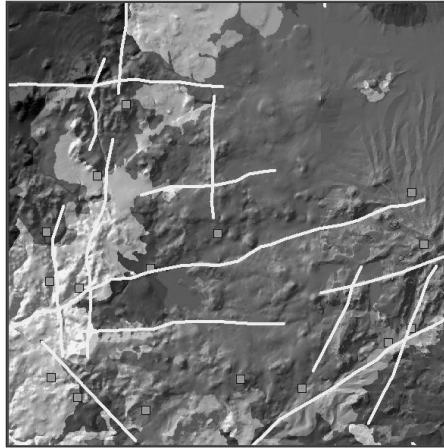


Fuente: Modelo iluminado a partir del DEM 1:50 000 con los resultados del tratamiento de la banda térmica de Landsat ETM 2000. Zona de Valle de Bravo, Estado de México

Finalmente, se encuentra las Sierras de Monte Alto y Monte Bajo, que flanquean el Valle de Ixtlahuaca y la parte NW del Valle de México, donde existe una retícula muy acentuada entre fallas de orientación SE-NW con fallas profundas de orientación SW-NE, muchas de ellas identificadas recientemente (Miranda, 2006). Esta situación se debe a la confluencia de estos sistemas con fallas de naturaleza regional como el pilar el Oro-Jocotitlán y la Falla Chapala-Acambay, lo que provoca una zona de gran compresión regional. (Véase figura 5)

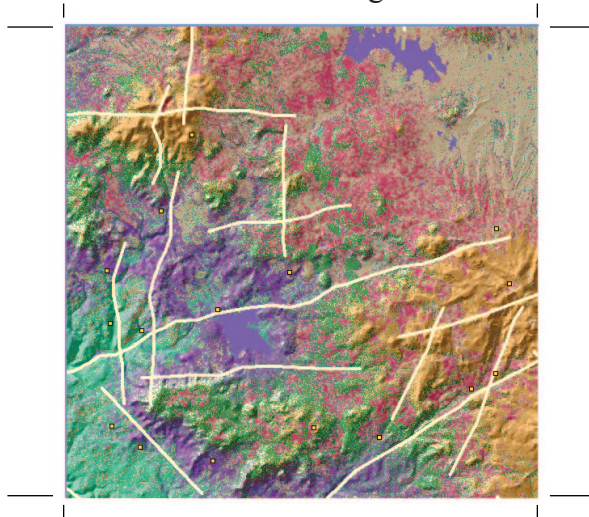
El Nevado de Toluca se convierte en un vértice tectónico en donde coinciden tres sistemas de fallas norte-sur, este-oeste y sureste-noroeste, casi al igual que sucede con el volcán Popocatepetl. La primera coincide por completo con la falla o sistema de fallas Taxco-San Miguel (Alanís, et al., 2002), que es delatada por el sistema de barrancas, la sismicidad y el alineamiento de otros edificios volcánicos. La segunda semeja un sistema de fallas paralelas de orientación este-oeste, que coincide de manera casi exacta con los límites norte y sur de la Sierra de Tenango y con todos los edificios volcánicos que se encuentran en ambos alineamientos. Finalmente se encuentra otro pequeño sistema de fallas paralelas que parece ser la resultante de los otros dos anteriores y que determina la forma de toda la

Figura 5: Modelo iluminado con la geología y los focos sísmicos
Fuente: DEM iluminado, escala 1:50 000 con el mapa geológico y los focos sísmicos de la zona de Valle de Bravo. Estado de México



sierra del Nevado de Toluca en conjunto con la de Santa María del Monte, en una orientación sureste-noroeste (García y Macías, 2002). (Véase figura 6)

Figura 6: Modelo iluminado con imagen de satélite clasificada

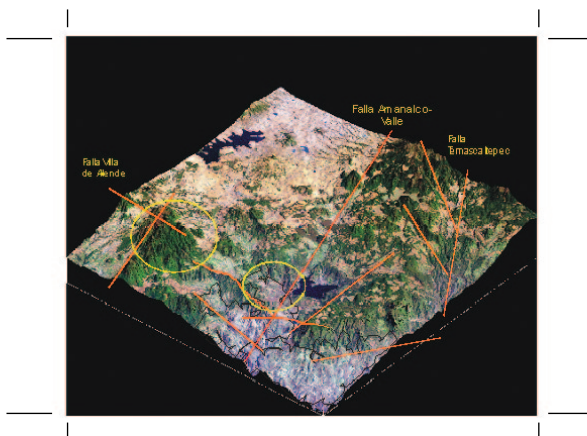


Fuente: DEM 1:50 000 iluminado con imagen ETM 2000, clasificada mediante discriminación progresiva de firmas espectrales para aislar componentes geológicos

Estos alineamientos paralelos de fallas entre el Nevado de Toluca y la Sierra de Tenango se denotan claramente en los mapas hipsométricos, los mapas morfométricos, en los modelos digitales 1:50 000 y en la superposición de los mapas sísmicos y gravimétricos, de manera que se continúan hacia el este en la Sierra de Chichinautzin y topan con el volcán Popocatepetl, esto define un sistema de fallas que parece corresponder con el patrón de arco o Arco Mezcala que reporta Mosser (2000).

El caso de la Sierra Nevada y en particular del Volcán Popocatepetl, ha sido profusamente estudiado tanto con imágenes satelitales como en estudios sísmicos de detalle y estudios gravimétricos y geomagnéticos profundos, de tal modo que se confirma, junto con los producidos por esta investigación, que en este volcán existe también un vértice tectónico que coincide con fallas en sentido norte-sur, las fallas paralelas este-oeste que vienen desde el Volcán Nevado de Toluca, continuándose en la Sierra de Tenango y la Sierra Chichinautzin y un sizallamiento profundo de orientación suroeste-noreste (Urrutia y Flores, 1996), que proviene desde el norte de Guerrero y cruza todo el Estado de Morelos. (Véase figura 7)

Figura 7. Diagrama ortográfico de la zona de Valle de Bravo, México



Fuente: Proyección ortográfica a partir del DEM 1:50 000, con la superposición del compuesto de color de la imagen ETM 2000 de la zona de Valle de Bravo, México

Otras fallas secundarias están asociadas como complementos de fallas ya registradas como en el caso de la Falla Chapala Acambay, al sur de la cual se levanta un pilar seccionado en varias secciones, al que se ha

denominado como Pilar El Oro-Jocotitlán, el cual corresponde a las antiguas zonas mineras como esos municipios o al límite de pequeñas elevaciones como las de San Felipe del Progreso y Atlacomulco, caracterizadas por conos cineríticos recientes (Fries *et al.*, 1960).

Un caso especial recientemente estudiado por investigadores de la UNAM como de la UAEM, es el de las condiciones geológicas y tectónicas del Volcán Jocotitlán, actualmente considerado muy activo (Escalona *et al.*), por su sismicidad local, por sus manifestaciones hidrogeológicas y geotérmicas. Tanto en este estudio como en el que ahora se presenta, se registran un sistema de intersección de varias fallas, de orientación nortesur, de suroeste-noroeste y de sureste a noroeste. Esta elevación denota la parte complementaria de la depresión tectónica o falla de Perales, de orientación sureste-noroeste y este-oeste, que ha sido bastante estudiada en los últimos 10 años, junto con la falla Chapala Acambay, con la que también se encuentra asociado el edificio. Juntas limitan en casi todas direcciones el Valle de Ixtlahuaca.

Muchos de los alineamientos tectónicos tanto al norte como al sur de la entidad, coinciden con los que reporta Mooser *et al.* (1996), como parte de arcos tectónicos como el Tarasco y el Mezcala, la mayoría de los cuales tienen orientaciones este-oeste, aunque para explicar otros en direcciones suroeste-noreste la teoría de los sizallamientos propuesta por De Cserna *et al.* (1987) parece tener más sentido para los grandes alineamientos con esas direcciones, que cruzan toda la entidad, inclusive desde otros estados como Guerrero y Michoacán. Sin embargo, los alineamientos con orientaciones sureste-noroeste no responden a estas teorías, por lo que se piensa que la teoría de los balances tectónicos o escalonamientos tectónicos que proponen las teorías seguidas por Lugo (1988) y Ortiz (1990), se ajustan mejor a la explicación de la dinámica tectónica de muchas de las fallas SE-NW o N-S, como la de la falla de Perales, la de la Sierra del Campanario, la del eje de la Sierra Nevada, la de Villa de Allende o la Taxco-San Miguel.

En suma, es altamente probable que la explicación global de la tectónica tan compleja e intrincada del Estado de México se encuentre en la combinación de las tres teorías mencionadas, lo que solamente puede ser confirmado a través de los estudios locales de tipo gravimétrico o geomagnético y las verificaciones de campo más detalladas.

7. Discusión y conclusiones

En este artículo se hace un mayor énfasis en la descripción de las grandes morfoestructuras del Estado de México, principalmente a nivel regional (escala 1:250 000), ya que la escala local (1: 50 000) evidencia muchas más fallas pequeñas y sistemas de fracturas, muchos de los cuales se encuentran asociados a yacimientos minerales, principalmente de sulfuros metálicos en un 40% de la superficie del estado.

Las fallas más antiguas están asociadas a los grandes sizallamientos de orientación SW-NE y algunos de orientación SE-NW, que según muchos autores se encuentran estrechamente relacionadas a los movimientos de la corteza profunda durante el Cretácico Superior, pero que siguen activas según los estudios recientes, de modo que a dos de ellas se les asocia con el sismo de 1985 en la ciudad de México. A pesar de estar enmascaradas con materiales aluviales y fluvio-glaciales de origen volcánico, su substrato más profundo se compone de materiales metamórficos y graníticos que demuestran, junto con las oscilaciones geomagnéticas y gravimétricas que existen estas grandes morfoestructuras. Encima de los estratos sedimentarios marinos, los domos y las formaciones volcánicas terciarias como las rocas verdes y las riolitas se encuentran fuertemente asociadas a las rocas metamórficas. Sobre estas estructuras antiguas se desarrollaron nuevas rupturas relacionadas con la placa de cocos, donde las estructuras morfotectónicas más grandes predominan con orientaciones E-W, como la Falla Chapala-Acambay, la Falla de Perales y el sistema de fallas que componen las sierras del Nevado, Tenango y Chichinauhtzin y que constituyen los arcos que describe Mosser. Las rocas características de este período son las andesitas, las dacitas y los materiales piroclásticos como las pumitas, las cuales cubrieron muchos de los rasgos y las rocas más antiguas.

Más recientemente, durante el Pleistoceno, las estructuras tectónicas dominantes son más pequeñas y más locales, desarrollándose procesos de basculamiento tectónico como producto del choque de las morfoestructuras regionales, de modo que la mayor parte de las morfoestructuras se desarrollan en sentido N-S y en sentido SE-NW y SW-NE, asociándose con procesos volcánicos eruptivos y rocas principalmente basálticas y volcans clásticas como el tezontle, las tobas ácidas y las arenas volcánicas. En esta etapa se desarrollaron los grandes estrato-volcanes aislados y las secuencias de conos cineríticos sobre las líneas de falla. Esta compleja situación

refleja muchas zonas de actividad volcánica, sísmica y de movimientos gravitacionales en las laderas, que constituyen zonas de peligro activo para muchas localidades de la entidad, que están expuestas a sufrir percances.

Particularmente, la ciudad de México y sus áreas conurbadas en el Estado de México se encuentran expuestas a peligros por vulcanismo activo en las zonas de fallas y de fracturas, tanto por la presencia del gran estrato volcán del Popocatepetl, como de muchos volcanes pequeños que todavía se encuentran activos dentro de la ciudad y que son conocidos como peñones, especialmente los asociados con la sierra de Santa Catarina.

Otras ciudades como Acambay, Temascalcingo, el Oro y Atlacomulco se encuentran en las inmediaciones de grandes fallas, donde la incidencia de sismos es significativa, generalmente asociados a la caída de bloques y el deslizamiento de laderas, además de la cercanía con pequeños volcanes todavía activos.

Otras ciudades más pequeñas como Valle de Bravo, Amanalco y Santo Tomás de los Plátanos se encuentran sobre sizallamientos antiguos que todavía son altamente activos y que pueden provocar sismos intensos en cualquier momento, al igual que otras como Ixtapan del Oro y Villa de Allende que están sobre fallas más recientes y con una gran asociación a volcanes potencialmente activos.

En conjunto, más de cincuenta localidades pequeñas se encuentran en zonas altamente sísmicas o ligadas a fallas activas más pequeñas, donde la asociación con fenómenos volcánicos potenciales es común y sujeta a altas probabilidades de ocurrencia. De ahí la importancia de precisar cada vez más la caracterización de estas morfoestructuras en los procesos de planeación y ordenación del territorio, con la finalidad de poder mitigar la vulnerabilidad de la población.

Por otra parte, el uso de las geotecnologías, estrechamente ligado a la aplicación de todo tipo de caracterizaciones de gabinete y campo, resulta de mucha utilidad en el campo de la Geología y la Geomorfología, tal y como se demuestra en los resultados obtenidos.

8. Bibliografía

- Alanís, A.S., Nieto, S.F., Orozco, M.T., Vasallo, F.L. y Shunshan, X. (2002). El Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LV, núm. 1, 2002.* pp. 12-29.
- Capra, L., Macías, J.L. & Garduño, H. (2004). The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, México: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera. *Geofísica Internacional, UNAM (publicación virtual)*. 12 págs.
- Zoltan de, C. (1982). Hoja Tejupilco 14Q-g (9), con resumen de la geología de la hoja Tejupilco, estados de Guerrero, México y Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Carta Geológica de México, Serie 1:100 000, mapa con texto. 28 p.
- Zoltan de, C., La Duch, M., Palacios, M., Triay, L., Mitre, L.M. y Mota, R. (1987). *Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México*. Boletín 104, Instituto de Geología de la UNAM. pp. 32-46
- Demant, A. (1978). "Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación". *Revista del Instituto de Geología de la UNAM. México*. Pp. 89-112.
- Mariano, E. H. & Sánchez, J. L. (1992). "Tectonic implications of a mylonitic granite in the lower structural levels of the Tierra Caliente complex (Guerrero Terrane), southern México". *Revista del Instituto de Geología de la UNAM. México. Vol. 9.* pp. 113-125.
- Escalona, H. J. L., López del C., R. y Martínez, M. (2005). *Evaluación de Riesgo Volcánico en la Región del Volcán Jocotitlán, Estado de México*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, Méx. 152 págs.
- Flores, J. H. (1998). *Estructura Cortical en el Centro de México, derivada del análisis de anomalías gravimétricas regionales*. Tesis de Doctorado en exploración Geofísica. Instituto de Geofísica, UNAM. México. 152 p.
- Fries, C.J., Ross, C., Obregón, A. (1965). *Mezcla de vidrios en los derrames cineríticos Las Américas de la Región de el Oro-Tlalpujahuá, estados de México y Michoacán, parte centro-meridional de México*. Boletín no. 70, Instituto de Geología de la UNAM. México. 85 p.

- García, A., & Macías, J. L. (2002). "Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, Central Mexico". *Geological Society of America. Map and Chart Series MCH89*, pp. 1-26.
- Guadarrama, S. G. (2001). *Elaboración e interpretación de la Carta Geomorfológica, escala 1:50 000 de la hoja Tenango del Valle*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 122 págs.
- Hernández, E. R. (2007). *Procesos Geomorfológicos en las Vertientes del Municipio de Lerma*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 168 págs.
- Kostenko, N. (1987). *Geomorfología Estructural*. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 92 p.
- Lugo, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM. 112 p.
- Lugo, J., & Córdova, C. (1992). *Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 25: pp. 25-63.
- Martínez, G. (2003). *Carta Geomorfológica E14A18*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 89 págs.
- Mendiola, F. (1999). *Evaluación del Peligro Sísmico en el Estado de México*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 96 págs.
- Miranda, M. (2006). *Caracterización Geomorfológica de la Carta E14A28, Villa del Carbón, Estado de México*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 185 págs.
- Mooser, F., Montiel, A. y Zúñiga, A. (1996). *Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla*. Comisión Federal de Electricidad. México. 212 págs.
- Ortiz, M.A. (1990). *Perfiles Geomorfológicos Complejos*. Serie Varia T. I., No. 12 Instituto de Geografía.
- Silva, A., Medina, L. (2003). *Estudio Geomorfológico de la Carta Atlacomulco, México, escala 1:50 000*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Geografía de la UAEM, Toluca, México. 94 págs.
- Solleiro, R. E., Macías, J. L., Gama, J., Sedov, S. and Sulerzhitsky, L.

(2004). Quaternary Pedostratigraphy of the Nevado de Toluca Volcano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 21, núm. 1. México.* Pp. 101-109.

Urrutia, J., Flores, J.H. (1996). Bouguer gravity anomalies and regional crustal structure in Central México., *Inter. Geol. Rew.*, v.38., p. 176-194.

