



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Cartografía geológico-estructural de la Formación
Teposcolula entre Chila de las Flores Puebla y
Huajuapán de León Oaxaca.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A

RODRIGO GUTIÉRREZ NAVARRO

Director de Tesis: Dr. Gilberto Silva Romo

Septiembre de 2010



Tabla de Contenido

Pág.

Resumen

Relación de figuras

Relación de apéndices

Capítulo 1. Introducción

- 1.1 Planteamiento del problema
- 1.2 Objetivos.
- 1.3 Área de estudio
- 1.4 Metas.
- 1.5 Metodología

Capítulo 2. Geología Regional

- 2.1.-Estratigrafía Regional
 - 2.1.1.-Basamento
 - 2.1.2.-Mesozoico
 - 2.1.3.-Cenozoico
- 2.2.-Evolución tectónica del Terreno Mixteco

Capítulo 3.- Geología Local

- 3.1.-Estratigrafía
 - 3.1.1 *Paleozoico*
 - 3.1.2 *Mesozoico-Jurásico Medio*
 - 3.1.3 *Mesozoico-Jurásico Superior*
 - 3.1.4 *Cretácico*
 - 3.1.5 *Cenozoico*
- 3.2.-Geomorfología Local
 - 3.2.1 *Geomorfología kárstica*

Capítulo 4.- Geología Estructural

- 4.1 Estructuras regionales
- 4.2 Estructuras del área
- 4.3 Estructuras en Formación Teposcolula
- 4.4 Estructuras en Formación Solano
- 4.5 Fracturas

Capítulo 5.- Discusión

Capítulo 6.- Conclusiones

Capítulo 7.-Referencias

Apéndices

Relación de Figuras

- Figura 1. Ubicación del área de estudio
- Figura 2. Modelo de elevación digital
- Figura 3. División Tectonoestratigráfica del Sur de México
- Figura 4. Marco geológico del terreno Mixteco
- Figura 5. Tabla de correlación estratigráfica regional
- Figura 6. Columna estratigráfica del área de estudio
- Figura 7. Fotografías de estructuras Rillenkarrren
- Figura 8. Fotografías de campo
- Figura 9. Estructuras encontradas en la Formación Teposcolula
- Figura 10. Mapa estructural del área de estudio
- Figura 11. Pliegue por flexión de falla
- Figura 12. Pliegue por propagación de falla
- Figura 13. Pliegues en intercalación de lutitas calcáreas y calizas
- Figura 14. Fractura en un pliegue
- Figura 15. Diagrama de rosa de las fracturas en Formación Teposcolula
- Figura 16. Diagrama de rosa de las fracturas encontradas en Formación Solano
- Figura 17. Diagrama de rosa de las fracturas encontradas en Formación Zapotitlán

Relación de apéndices

- Apéndice A Mapa geológico
- Apéndice B Secciones estructurales

Resumen

Al NW del estado de Oaxaca cerca de la ciudad de Huajuapán de León se presenta una cuenca orientada NW-SE en donde afloran una sucesión sedimentaria clástica y marina que corresponde con la cubierta mesozoica del terreno Mixteco, el cual tiene un basamento metamórfico paleozoico. Las secuencias cretácicas depositadas en un ambiente de aguas claras cálidas y someras se encuentran plegadas y fracturadas.

La caracterización geométrica de las estructuras cretácicas y jurásicas es descrita con una dirección general de los planos axiales: NW-SE, se observaron estructuras mesoscópicas como rampas y pliegues por propagación de falla, duplex, pliegues por flexión de falla, pliegues tipo chevron y se encontró una zona de despegue con el desarrollo de una banda milonítica. Relacionado al plegamiento se caracteriza el sistema de fracturamiento con una dirección preferencial E-W.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

El presente trabajo pretende comprender y documentar la deformación que ocurre en las rocas carbonatadas que afloran al norte de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León en el estado de Oaxaca y busca complementar la caracterización del acuífero kárstico de la región.

El área de estudio de este trabajo forma parte de la porción norte del Terreno Tectonoestratigráfico Mixteca para el cual se han sugerido desplazamientos tectónicos mesozoicos con respecto a América del Norte (Anderson y Schmidt, 1983; Campa y Coney 1983; Urrutia-Fucugauchi, 1984); que en complemento con los trabajos de Boehnel (1984); Morán-Zenteno et al., (1988) y Ortega-Guerrero (1989) han tratado de comprender en detalle la evolución paleogeográfica de la zona.

No existen trabajos previos que estudien en detalle el estilo de deformación de la secuencia carbonatada del área de estudio, pero sí existen estudios regionales como los de Morán Zenteno *et al.*, 1986; Caballero-Miranda *et al.*, 1989, Galina-Hidalgo, 1991, que tratan acerca de la paleogeografía de la región. En el área de estudio se observan estructuras regionales como pliegues y fallas con geometrías y relaciones complejas y variadas, la falla más importante de la zona es la Falla Huajuapán-Petlalcingo que tiene una dirección N30W aproximadamente y tiene un desplazamiento normal.

La zona de interés comprende a la secuencia carbonatada depositada durante el Mesozoico; Formación Teposcolula, descrita por vez primera por Salas (1949).

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es realizar un análisis estructural del área, con base en el trabajo cartográfico y la descripción estructural de los afloramientos. Los objetivos particulares se enlistan a continuación.

- Conocer las características litológicas de la Formación Teposcolula, su distribución espacial y su significado geológico.
- Establecer la evolución de las estructuras de la zona mediante el análisis de la geometría, cinemática y relaciones de corte de los principales pliegues y fallas.
- Contribuir a la caracterización del acuífero kárstico definido en la Formación Teposcolula

1.3 Área de estudio

El área de estudio queda comprendida en la carta topográfica E14-D14 "Huajuapam de León" Oaxaca, México (INEGI 1986). Está delimitada por las coordenadas $97^{\circ}40'00''$ y $98^{\circ}00'00''$ de longitud oeste y $17^{\circ}45'00''$ y $18^{\circ}00'00''$ de latitud norte y cubre un área de 976 km^2 , se encuentra comprendida en el límite de los estados de Puebla y de Oaxaca. (Figura 1).

Esta región se encuentra dentro de la Provincia Morfotectónica de la Sierra Madre del Sur (SMS) y dentro del terreno Mixteco según Campa y Coney (1983) y Sedlock *et al.* (1993). (Figura 3).

Los principales elementos orográficos de la zona son la Sierra que va de San Jerónimo Silacayoapila a San José Ayuquila, la sierra comprendida por rocas carbonatadas y que comprende a las cañadas El Boquerón, Boquerón Chico, Mirador y Barranca El Otate y la alineación de los cuerpos volcánicos que pasan por Zapotitlán Palmas, todos estos elementos presentan una alineación general NNW-SSE.

La principal vía de comunicación es la carretera federal No. 190 que comunica las ciudades de Huajuapán de León con Chila de las Flores, algunos de los afloramientos bajo estudio se encuentran sobre esta carretera y algunos otros sobre el camino que va de San Jerónimo Silacayoapilla a San José Chapultepec o sobre las terracerías que comunican a los poblados de la zona. (Figura 2).

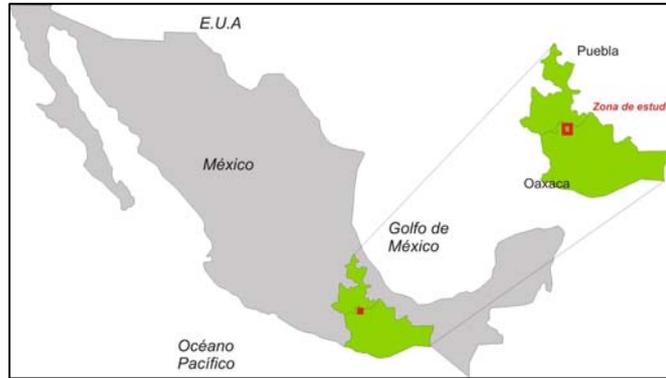


Figura 1: Ubicación del área de estudio, límite entre los estados de Puebla y Oaxaca.

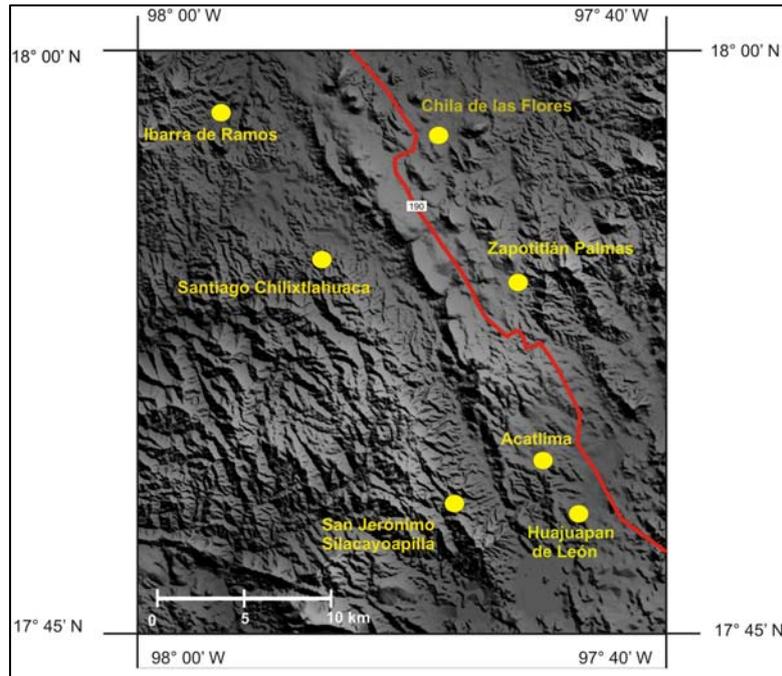


Figura 2. Modelo de elevación digital con iluminación oblicua del área de estudio, se señala la carretera principal y las poblaciones.

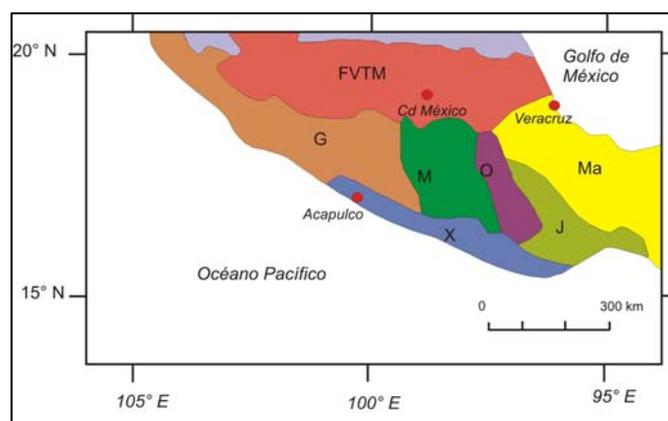


Figura 3. División Tectonoestratigráfica del Sur de México (Campa y Coney, 1983). FVTM: Faja Volcánica Transmexicana; G: Terreno Guerrero, M: Terreno Mixteco; O: Terreno Oaxaca; X: Terreno Xolapa; J: Terreno Juárez; Ma: Terreno Maya.

1.4 Metas

Para lograr cubrir los objetivos anteriormente planteados se establecieron las siguientes metas:

- Obtener el mapa geológico de la zona.
- Elaborar secciones geológicas representativas que ilustren la disposición de unidades y las estructuras que las afectan.
- Establecer un análisis a semidetalle de los pliegues y fallas mas característicos de la zona.
- Establecer un modelo de evolución geológica que explique los rasgos estructurales y la cinemática de éstos en el área de estudio.
- Explicar el desarrollo de fracturas y relacionarlas con los eventos de deformación de la cubierta sedimentaria.

1.5 Metodología

La metodología que se siguió para llevar a cabo este trabajo fue la siguiente:

- Investigación documental
- Interpretación de fotografías aéreas
- Geología de campo
- Trabajo de gabinete

Investigación documental

En esta etapa se buscó y recopiló la información previa del área de estudio y zonas aledañas para tener una primera aproximación de la geología del sitio buscando así en artículos, trabajos de tesis y cartas. También se revisó la literatura básica relacionada a la geología estructural.

Fotointerpretación

El trabajo fotogeológico se realizó con el objetivo de crear un mapa base en donde se puedan diferenciar y resaltar contactos entre las unidades

litoestratigráficas más importantes. Con ayuda de un estereoscopio se elaboró el mapa fotogeológico con base en fotografías aéreas verticales a escala 1:80 000 y 1:50 000 con el fin de reconocer los rasgos geomorfológicos sobresalientes y señalar las zonas de mayor interés.

Geología de campo

Posteriormente se efectuaron diversas salidas a campo para verificar la extensión, y naturaleza y de los contactos de las unidades cartografiadas, así como para levantar información de las principales estructuras geológicas. En esta etapa se realizó un muestreo de las diferentes litologías que afloran en la zona de estudio, se tomaron datos estructurales y se levantaron secciones geológico-estructurales para entender mejor la ocurrencia y disposición de las unidades. Durante el tiempo que se realizaron las diferentes salidas, el mapa base se fue mejorando hasta la versión final y definitiva.

Trabajo de gabinete

Finalmente en gabinete se analizó la información geológica-estructural obtenida en campo, se elaboró y revisó un mapa litoestratigráfico con un software especializado para crear Sistemas de Información Geográfica (SIG), se analizaron redes de proyección, también se elaboraron y modificaron figuras para ilustrar las estructuras observadas en el área de estudio.

Capítulo 2. Geología Regional

El área de estudio se localiza al norte del terreno Mixteco (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993) dentro de la Provincia Morfotectónica de la Sierra Madre del Sur (SMS). El terreno Mixteco abarca 35 000 km² del territorio mexicano y su basamento está constituido por rocas metamórficas e ígneas asociadas a diferentes eventos de deformación debido al choque de diversas masas continentales.

Los límites de este terreno están conformados por: la Falla de Caltepec al este que pone en contacto al terreno Mixteco con el terreno Oaxaca, la falla Papalutla al oeste (contacto entre el terreno Mixteco y el terreno Guerrero) y la falla de Chacalapa-Tierra Colorada (contacto entre el terreno Mixteco y el terreno Xolapa). Al norte se encuentra la Faja Volcánica Transmexicana. (Figuras 3 y 4).

El basamento del terreno Mixteco lo comprende el Complejo Acatlán, el cual aflora principalmente en la zona este del área de estudio, cerca de la localidad San Jerónimo Silacayoapilla y hacia la parte nororiental. Las secuencias mesozoicas se extienden a lo largo de un eje NW-SE desde Chila de las Flores hasta la Ciudad de Huajuapán de León, los cuerpos ígneos y volcánicos se encuentran alineados a lo largo de fallas regionales con un aparente control estructural NW-SE.

Durante el Cretácico Tardío ocurrió un acortamiento, históricamente asignada a la Orogenia Laramide, la cual plegó las unidades mesozoicas dejándolas expuestas y formando altos topográficos. El estudio de la evolución geológica del terreno Mixteco ha sido abordado por autores como Ortega-Gutiérrez (1978), Morán-Zenteno *et al.*, (1993), Weber *et al.*, (1997) Caballero-Miranda (1990), sin embargo el estilo y la cuantificación de la deformación de la cubierta mesozoica no se han documentado a detalle.

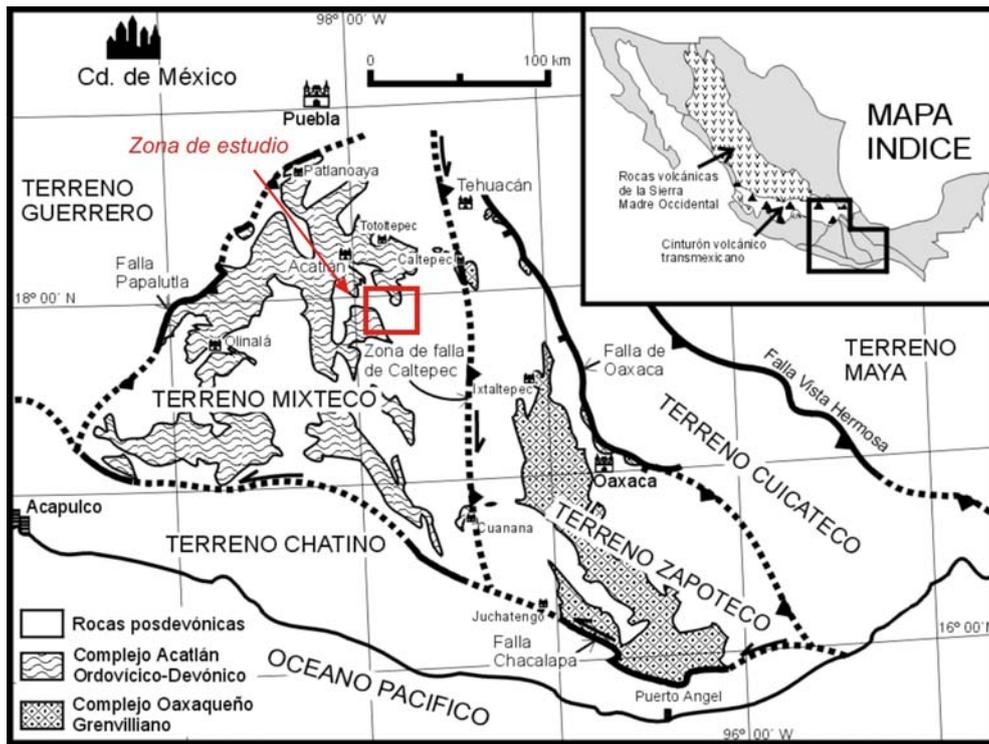


Figura 4. Marco geológico del terreno Mixteco (Modificado de Ortega-Gutiérrez *et. al* 1999).

2.1 Estratigrafía Regional

2.1.1 Basamento

El basamento del terreno Mixteco (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993) está formado por rocas del Complejo Acatlán de edad paleozoica (Ortega-Gutiérrez 1978), este complejo es una secuencia polideformada que está constituido por diversas unidades metamórficas de facies de esquistos verde a eclogita, relacionadas con una colisión de masas continentales durante el Paleozoico Temprano (Ortega-Gutiérrez 1978).

La sección tipo del Complejo Acatlán se ubica a lo largo del tramo de la carretera Federal 190 (México-Oaxaca), en el entronque con el camino a Tecamatlán, hasta los afloramientos entre Petlalcingo y Chila de las Flores, Puebla.

Ortega-Gutiérrez *et al.* (1999) estiman que el espesor estructural del Complejo Acatlán es de más de 15 km. Está conformado principalmente por dos unidades tectónicas (los subgrupos Petlalcingo y Acateco), separadas por una cabalgadura mayor. Considerando su gran espesor, su composición y la presencia de fragmentos de piso oceánico ha sido interpretada como depósitos de trinchera y antearco de una margen continental convergente (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1999).

La edad del Complejo Acatlán ha sido propuesta por diversos autores mediante fechamientos isotópicos de los Granitoides Esperanza (Fries y Rincón-Orta, 1965; Halpern *et al.*, 1974; de Cserna *et al.*, 1980; López-Infanzón, 1986; Robinson, 1991; Yañez *et al.*, 1991), las cuales se encuentran en el intervalo Cámbrico-Devónico.

Se considera que el Complejo Acatlán sobreyace a una corteza continental precámbrica indeterminada, cuya edad se considera, tentativamente, Grenvilliana (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1990).

2.1.2 Mesozoico

Para esta era el régimen tectónico regional se caracteriza principalmente por etapas de acortamiento y de extensión en donde en las cuencas se acumularon secuencias gruesas de origen continental y marino, representadas principalmente por caliza, caliza arcillosa, arenisca y limolita. El hiatus deposicional de rocas sedimentarias del Triásico y Jurásico Inferior sugiere un periodo asociado a la emersión debido al levantamiento de bloques de la corteza continental. Durante este lapso, la cubierta sedimentaria paleozoica fue erosionada por lo que quedó nuevamente expuesto el Complejo Acatlán.

El Jurásico Tardío se caracterizó por el desarrollo de una cuenca sedimentaria denominada cuenca de Tlaxiaco (López-Ticha, 1985), la cual Meneses-Rocha *et al.* (1994) asociaron con la evolución del Golfo de México. Los afloramientos detríticos son extensos y corresponden a rocas sedimentarias, que incluyen conglomerados y areniscas continentales (Formación Tecamazúchil) y rocas compuestas por sedimentos de un ambiente litoral a marino somero (Formaciones Chimeco-Mapache).

Durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano se depositaron secuencias calcáreas marinas, con un menor aporte de terrígenos. La caliza Teposcolula evidencia una transgresión marina a partir del Albiano que produjo una plataforma calcárea extensa sobre el terreno Mixteco, la caliza Teposcolula se correlaciona con la caliza Petlalcingo. El ambiente de plataforma continuó hasta por lo menos el Turoniano en el área noreste de Huajuapán (Caballero-Miranda, 1990).

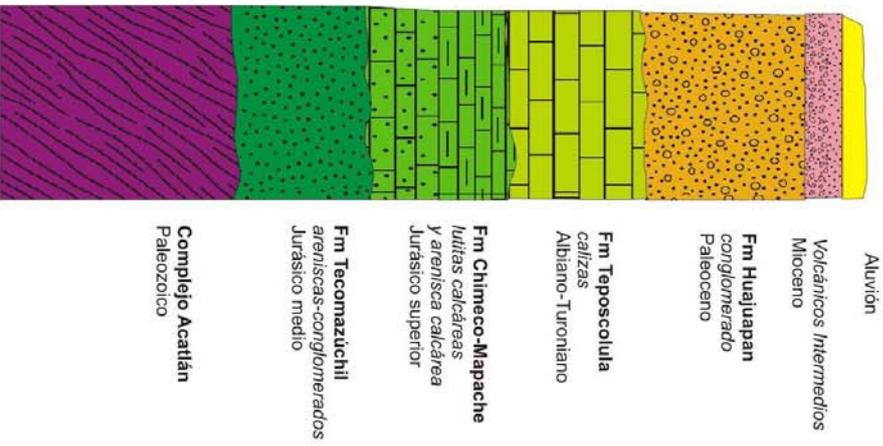
2.1.3 Cenozoico

El registro estratigráfico cenozoico es de carácter continental e incluye principalmente depósitos fluviales y volcanoclásticos, así como rocas volcánicas piroclásticas y lávicas. Las litologías presentes en el área de estudio corresponden a areniscas, cenizas volcánicas, arcillas arenosas, capas de conglomerados y brechas que ocurren interestratificadas y se encuentran sobreyaciendo a los paquetes mesozoicos de manera discordante.

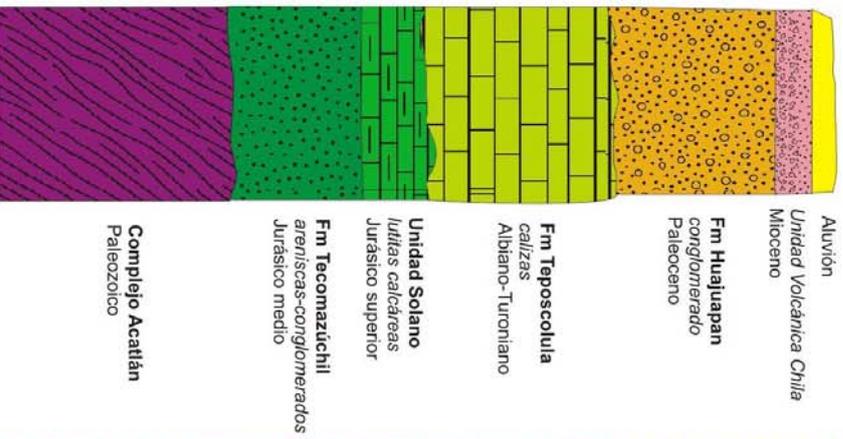
Los conglomerados han sido descritos de manera general en las cercanías de Huajuapán (Salas, 1949; Erben, 1956) En la zona de Huajuapán, Salas (1949) agrupó todas las rocas continentales del Paleógeno dentro de una unidad y describió "una serie de areniscas, cenizas volcánicas, arcillas arenosas y capas de conglomerados y brechas que ocurren interestratificados en la sección" a la cual nombró como "Capas Huajuapán".

Este autor observó que la base de las Capas Huajuapán está formada por conglomerado con clastos de rocas mesozoicas y cenozoicas. En esta misma zona general, Erben (1956, p. 70, mapa 2 y 5, y lámina 16) dividió las Capas Huajuapán en tres miembros: (1) el "miembro Catarina" para el conglomerado basal, (2) el "miembro Tezoatlán" que corresponde a toba, arenisca, y otros depósitos clásticos y (3) el "miembro volcánico" para los derrames de lava y tobas en la cima de la sucesión. Erben también observó que el contacto superior del conglomerado con las rocas volcanoclásticas es discordante, mientras que en otras áreas cercanas, es concordante o transicional (Petlalcingo – Ortega-Gutiérrez, 1970; Mariscal – Ruiz-Castellanos, 1970).

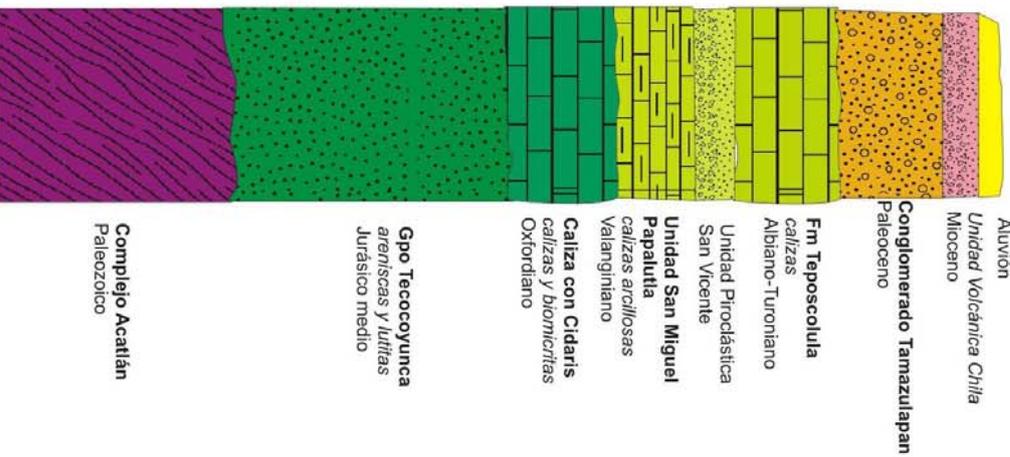
Petalcingo



Huajuapán



Tezoatlán



Tlaxiaco

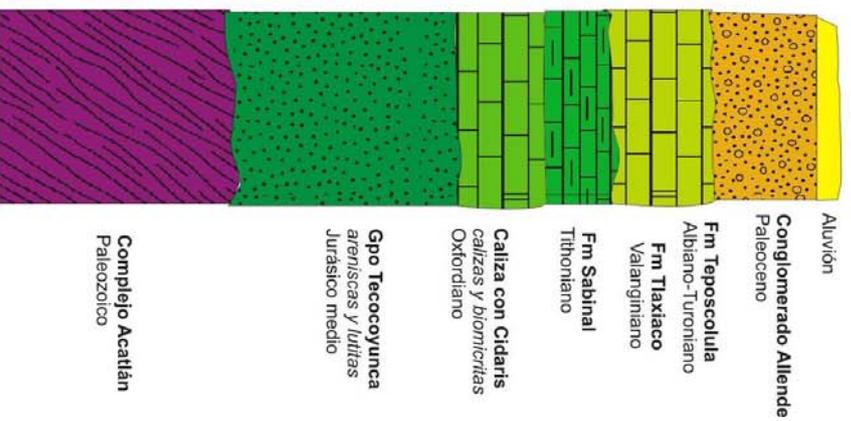


Figura 5. Tabla de correlación estratigráfica de la región (modificado de Caballero-Miranda 1990).

2.2 Evolución tectónica del terreno Mixteco

La evolución tectónica del terreno Mixteco ha sido ampliamente discutida en la literatura debido al interés de la zona y a las interesantes reflexiones en torno a los límites tectónicos y los diferentes tipos de régimen estructural a los que ha sido expuesto.

Para el Paleozoico el basamento del terreno Mixteco, el Complejo Acatlán, se encontraba dentro del supercontinente Pangea con un polémico traslape geométrico por lo que surge la necesidad de encontrar un acomodo tectónico.

Para el Mesozoico Caballero Miranda (1990) propone tres fases de deformación, las cuales se pueden dividir entre el Jurásico Medio en donde el régimen fue de carácter distensivo, provocando una dislocación de bloques con una pendiente general hacia el sur y una fase de acortamiento de fines del Cretácico que afectó a los paquetes rocosos continentales y marinos, propiciando la generación de pliegues. Para el Terciario se tiene un régimen compresivo que generó fallas a nivel regional.

Capítulo 3. Geología Local

3.1 Estratigrafía

3.1.1 Paleozoico

Complejo Acatlán

El Complejo Acatlán está ubicado en la provincia morfotectónica de la Sierra Madre del Sur. Se extiende por más de 200 km² al oeste del Complejo Oaxaqueño (Ortega-Gutiérrez, 1981). Fue definido con base en un reconocimiento geológico de las rocas cristalinas expuestas en la Mixteca de los estados de Puebla y noroeste de Oaxaca (Ortega-Gutiérrez, 1978), y constituye la unidad litoestratigráfica más antigua del terreno Mixteco, Ortega-Gutiérrez (1978a) sustituyó el nombre anterior: "Formación Acatlán", propuesto por Fries y Rincón Orta en 1965.

Este Complejo Paleozoico fue dividido litoestratigráficamente en 2 Subgrupos: Petlalcingo (Acatlán Inferior) y Piaxtla (Acatlán Superior), y por la Formación Tecomate (Devónica) que cubre en discordancia a los 2 subgrupos (Ortega-Gutiérrez et al 1999). Weber *et al.* (1997) proponen seis fases de deformaciones distintas basados por distintas facies metamórficas, grados de ductilidad y correlación temporal.

El Subgrupo Petlalcingo está compuesto por tres unidades: La Migmatita Magdalena en la base, La Formación Chazumba en medio, y la Formación Cosoltepec sobreyaciendo a las anteriores. La Migmatita Magdalena se compone en su porción neosomática (anatexítica) por rocas graníticas a granodioríticas, teniendo como un paleosoma (protolito) probablemente a una sucesión de lutita calcáreas, arenisca y dolomía.

La Formación Chazumba está definida por esquisto de biotita con alto contenido de cuarzo intercalados con bloques metagabroicos. La Formación Cosoltepec (Ordovícico?) con litología diversa es sin duda la unidad más extensa de todo el Complejo Acatlán (Yañez, et al., 1991) y se constituye por intercalaciones de anfibolita y cuarcita en su parte basal, esquisto de

mica y gránate en su porción media, y filita alternada con cuarcita en la porción superior de dicha unidad (Ortega-Gutiérrez, 1981). Los protolitos de las tres unidades probablemente han derivado de fuentes grenvillianas como el Complejo Oaxaqueño (Ruiz et al, 1990; Yañez et al, 1991).

Las rocas originales del subgrupo Petlalcingo debieron corresponder a una secuencia marina probablemente pelágica de grauvaca, lutita, pedernal y escaso carbonato asociada con vulcanismo e intrusiones máficas (Ortega-Gutiérrez 1978). El subgrupo Piaxtla está constituido por la Formación Xayacatlán y los Granitoides Esperanza. La primera está compuesta por serpentinita, anfibolita, metagabro, eclogita y esquistos verdes y pelíticos, correspondientes a una secuencia metaofiolítica (Caballero Miranda 1990). Los Granitoides Esperanza están constituidos por rocas graníticas, aplíticas y pegmatitas (Ortega-Gutiérrez, 1978).

La Formación Tecomate contiene psamitas y semipelitas bandeadas y metagrauvas y clastos de los Granitoides Esperanza (Yañez *et al.*, 1991).

En el área de estudio el Complejo Acatlán aflora en la parte poniente y presenta principalmente afloramientos de esquistos pelíticos y esquistos verdes, pertenecientes a la Formación Cosoltepec. Existen también gneis cuarzo feldespáticos color claro con alineamientos minerales, augengneises y gneis de mica. Esta formación ha sido deformada por tres fases y se encuentra en facies de esquistos verdes a anfibolita con edades entre el Devónico y el Carbonífero (Talavera-Mendoza, *et al.* 2005).

En el contacto con la Formación Tecomazúchil se ha inferido una falla inversa, la cual corre de norte a sur ubicándose a lo largo de los poblados: San José Chapultepec y San Jerónimo Silacayoapilla.

Esta traza de falla se comporta como una zona de debilidad y asociado a ésta, se encuentran diversos cuerpos intrusivos hipabisales con una dirección preferencial de emplazamiento N-S.

3.1.2 *Mesozoico-Jurásico Medio*

Formación Tecomazúchil

La Formación Tecomazúchil fue descrita por Perez-Ibarguengoitia y colaboradores en 1965 como una secuencia de conglomerado, arenisca y limolita, de origen continental.

Los colores que predominan en las capas de arenisca y arenisca conglomerática son marrón amarillento y marrón crema, en menor proporción se presentan colores rojizos y grises claros.

La base de esta formación presenta cuerpos conglomeráticos con una matriz arenosa, intercalados con capas gruesas de conglomerado con clastos de cuarzo metamórfico subredondeado elongados y en menor proporción clastos de esquisto y arenisca.

Caballero Miranda (1990) propone que la Formación Tecomazúchil se divida en dos subunidades debido a que existe una discordancia angular y a diferencias en el grado de cementación de la formación.

Existen en menores proporciones capas de limolita y conglomerado arenoso, de poca persistencia lateral. Se han reportado en fracciones arenosas restos de flora fósil, estructuras de arrastre y estratificación cruzada, lo que indica cambios en la dirección durante la acumulación de sedimentos.

La granulometría predominante es de arena gruesa (0.5 a 2 mm), y con frecuencia grava arenosa (0.05 a 10 mm); en menor proporción ocurren estratos con tamaño de grano fino y muy fino (menor a 0.5 mm). Los granos identificables son principalmente de cuarzo y algunos líticos, en los que se observan clastos subredondeados y subangulares. El espesor de los estratos está directamente relacionado con su granulometría.

Los principales componentes detríticos reportados por Caballero-Miranda (1990) de esta Formación son: cuarzo metamórfico (40%), feldespatos (20%), fragmentos líticos (20%), mica (2%) y minerales pesados (5 %). (Porcentajes promedio).

Según la clasificación de la autora antes citada, las principales rocas que componen a la Formación Tecamazúchil son esencialmente litarenita con la siguiente distribución: arcosa lítica (59%), arcosa (23%) y litarenita arcósica (18%). Esta Formación aflora en la parte oeste de la zona de estudio sobreyaciendo al Complejo Acatlán y suprayaciendo a las Formaciones Chimeco, Mapache y Teposcolula, por lo que la edad asignada a este paquete de roca está entre el Aalleniense y el Bajociense por su contenido de flora fósil. El espesor de esta unidad ha sido estimado alrededor de 1500 m para la subunidad 1 y de 700 a 1200 m para el resto de la unidad. (Caballero-Miranda, 1990).

Cerca de la ciudad de Santiago Chilixtlahuaca, dentro de la secuencia detrítica, hacia la parte inferior y en contacto con el Complejo Acatlán, se encuentran diversos cuerpos volcánicos que intrusionan a la Formación Tecamazúchil y que serán descritos con mayor detalle más adelante.

3.1.3 Mesozoico-Jurásico Superior

Sobre la formación Tecamazúchil descansan tres paquetes de rocas postjurásicas marinas: Formación Chimeco, Formación Mapache y Formación Teposcolula.

Formación Chimeco

Esta formación constituida principalmente de arenisca calcárea aflora al norte de la zona de estudio subyaciendo a la Formación Mapache y sobreyaciendo a la Formación Tecamazúchil, fue nombrada por Perez-Ibarguengoitia y colaboradores en 1965. Su localidad tipo se encuentra situada en el camino que va de Petlalcingo a Texcalapa, su espesor varía de 100 a 350 m y se adelgaza hacia el sur hasta desaparecer por efecto de erosión, a la altura de Santiago Chilixtlahuaca.

Su litología consta de arenisca calcárea, caliza arenosa y ooespatita, en la parte inferior; en la parte superior consta de caliza arenosa y caliza

arcillosa, con equinoides, pelecípodos y rellenos de gusanos (Pérez-Ibarguengoitia et al., 1965).

En la base de la Formación Chimeco, en las inmediaciones del poblado Chila de las Flores, se presenta un cuerpo calcáreo con yesos intercalados lo que se interpreta como una zona evaporítica tipo Sabkha; estos yesos se pueden relacionar con los reportados en los pozos de PEMEX (Yucudac 1 y Teposcolula 1). (Mendoza-Rosales, 2010. Comunicación directa).

La fauna reportada en el área se localiza en la parte superior de la formación (Pérez-Ibarguengoitia et al., 1965) e indica una edad oxfordiana (Alencaster y Buitrón, 1965). Incluye equinoides de las especie *Cidaris submarginata* y pelecípodos como *Cucullea sp* y *Parallelodon montanayensis*. Los pelecípodos reportados sugieren un ambiente litoral de alta energía en un inicio con aporte de corrientes fluviales, lo que propició el depósito de lutita y limolita arenosa en la base y el desarrollo de ooespatita y ausencia de fósiles en la parte inferior. La ausencia de amonitas y otros organismos plantónicos denota una comunicación sumamente restringida al mar abierto (Caballero-Miranda 1990). Se correlaciona con la "Caliza con *Cidaris*" expuesta hacia el sur de la región cerca de Tezoatlán.

Formación Mapache

Esta Formación aflora al norte de la zona de estudio y fue designada con este nombre por Pérez-Ibarguengoitia y colaboradores en 1965. Está constituida principalmente por una secuencia calcáreo arcillosa de aproximadamente 350 m de espesor. Su localidad tipo es la Barranca del Mapache que se ubica al norte del camino entre Petlalcingo y Texcalapa. Hacia la base de esta Formación se encuentra una caliza recristalizada de color marrón y sobre ésta se tiene una biomicrudita con abundantes moldes de pelecípodos y amonoideos.

La fauna reportada en el área Texcalapa-Petlalcingo por Alencaster y Buitrón (1965) es indicativa de una edad Kimmergardiano-Portlandiano y se incluyen pelecípodos, braquiópodos, gasterópodos, corales y amonoideos, los cuales, a excepción de los amonites, son indicativos de ambientes de aguas someras cercanas a la costa y sumado a la litología apuntan a un ambiente costero de aguas tranquilas relacionado con un ambiente de laguna litoral con comunicación intermitente al mar abierto y con aportes fluviales que llevó en suspensión material fino (Caballero-Miranda 1990).

La Formación Mapache se relaciona con la Formación Solano y se presenta siempre con la Formación Chimeco para conformar una secuencia continua.

Formación Solano

Unidad descrita por Caballero-Miranda (1990) constituida por caliza, caliza arcillosa y marga que afloran en los alrededores de los poblados Solano y Rancho Jesús, al oeste de Huajuapán de León y al sur de la zona de estudio. Esta unidad está compuesta principalmente de calizas de textura mudstone a wackestone, localmente recristalizada o dolomitizada. En su parte media-superior alterna con caliza arcillosa, marga y caliza negra con alto contenido de materia orgánica, compuesta por kerógeno sapropélico amorfo aparentemente derivado de algas (López-Ticha 1985).

En diversos afloramientos de la unidad, se observa estructura laminar y en las partes más calcáreas la laminación se presenta contorsionada, entre los estratos se observan valvas sueltas de pelecípodos que se encuentran en posición normal e invertida (Caballero-Miranda, 1990).

El contacto inferior con la Formación Tecomazúchil es discordante y el contacto superior con la Formación Teposcolula se observó concordante al norte del poblado Rancho Jesús.

La Formación Solano se encuentra en gran parte cubierta por clásticos terciarios (Formación Huajuapán), lo que impide observar con claridad sus

contactos, sin embargo Caballero-Miranda (1990) infiere su espesor de aproximadamente 500 m. La edad de esta formación se asigna a la parte más alta del Jurásico Superior en virtud de la presencia de los amonites *Virgatosphinctes sp* y *Substeueroceras sp* (Caballero-Miranda, 1990).

Las características litológicas y contenido fosilífero permiten interpretar un ambiente de depósito marino de aguas tranquilas con comunicación al mar abierto, donde ocurrieron episodios de rápida sedimentación, lo que propició la conservación de materia orgánica (Caballero-Miranda, 1990). Esta formación se correlaciona con la Formación Mapache, constituyendo un cambio de facies lateral.

Esta Unidad presenta un intenso plegamiento en la parte media donde se intercalan calizas y lutitas calcáreas.

3.1.4 Cretácico

Formación Teposcolula

Fue nombrada de manera informal por Salas (1949) como Formación Petlalcingo, más tarde Pérez-Ibarguengoitia y colaboradoras la reportaron como Formación Morelos (1965), posteriormente Ferrusquía-Villafranca (1976) la describe y define formalmente y reporta la presencia de diversos géneros de foraminíferos, tintinidos, gasterópodos y pelecípodos, todos del Cretácico entre el Albiano-Conciano.

Finalmente Caballero-Miranda (1990) la relaciona con la Formación Teposcolula y queda con este nombre, debido a que muestra una continuidad estructural y una litología similar.

En el área de estudio se pueden diferenciar dos partes de este paquete calcáreo; la inferior es esencialmente calcárea, se caracteriza por formar altos topográficos; contiene caliza masiva de textura mudstone a packstone con nódulos de pedernal, localmente se encuentra dolomitizada, presenta estilolitas verticales y se tienen presentes estructuras arrecifales dómicas con relleno posterior de pedernal.

La parte superior es calcárea con fracciones arcillo-arenosas; contiene caliza arcillosa, caliza limosa, arenisca calcárea, marga y caliza masiva. En toda a unidad se presentan pelecípodos, rudistas, gasterópodos, equinoides, miliólidos y foraminíferos. A este paquete de rocas carbonatadas se le ha asignado una edad Albiano-Cenomaniano Inferior, con base en los fósiles reportados por Pérez-Ibarguengoitia y colaboradores (1965), este intervalo se amplía al Albiano-Turoniano si se toman en cuenta los fósiles presentes en la parte superior *Gryphaea graysonana*, del Cenomaniano (Caballero-Miranda., 1990) e *Hippurites resectus mexicanus*, del Turoniano, reportada por Erben (1956).

El espesor de esta formación se ha estimado en 400 m al oeste de Pletlacingo (Pérez-Ibarguengoitia et al., 1965) y de hasta 800 m a la altura de las barrancas El Mirador y El Boquerón. El espesor máximo estimado medido es de 1000 m en la sección de la barranca El Boquerón (Caballero-Miranda 1990).

El ambiente de depósito se ha interpretado como marino, de aguas claras, cálidas y someras de plataforma, con influencia de terrígenos hacia su parte superior; considerando a los niveles con brechas de colapso kárstico como episodios esporádicos de emersión y erosión subaérea. Ferrusquía-Villafranca (1976) reporta comunidades fósiles tanto neríticas como pelágicas lo que interpreta como una zona de relieve contrastado.

Las brechas de colapso kárstico dentro de la Formación Teposcolula se clasifican con base en Loucks (1999) como brechas caóticas soportadas por una matriz de calcita neomórfica, también se observan brechas caóticas soportadas por una matriz arcillosa, brechas de mosaico ricas en matriz, así como sedimentos de relleno de cavernas con astillas, lajas y bloques.

Al SW del poblado Yucunduchi se observa el desarrollo de 3 cavernas tipo simas con profundidades de hasta 30 metros y con una orientación general N-S. Citar René Morales

En contacto con la Formación Tecomazúchil sobre el arroyo del río Boquerón y en el Boquerón chico se observa una zona de despegue con un notorio escarpe visible en las fotografías aéreas. En este contacto la roca se encuentra recristalizada y milonitizada, asociado a estas estructuras se tienen presentes brechas de deslizamiento en una matriz arcillosa con alineaciones minerales de pedernal y clastos de caliza.

La caliza Teposcolula se correlaciona con la Caliza Coyotepec (con características similares a la porción inferior y hacia arriba rizaduras de oleaje y huellas de desecación (Ortega-Guerrero, 1989). Su parte superior es correlacionable con la Formación Cuautla, del estado de Morelos y norte de Guerrero (Fries, 1960).

3.1.5 *Cenozoico*

Formación Huajuapán

Serie de capas interestratificadas de areniscas, cenizas volcánicas, arcillas arenosas y capas de conglomerados, denominadas informalmente por Salas (1949) como "Capas Huajuapán", posteriormente Erben (1956) la redefinió como Formación Huajuapán.

Como señala Erben (1956) esta formación se puede subdividir en tres partes: hacia la base, en las inmediaciones de Chila de las Flores (al norte de la zona de estudio), se observa una brecha calcárea con clastos subredondeados a subangulosos de caliza en un cementante calcáreo.

Al poniente de la ciudad de Huajuapán de León sobre las Barrancas de la Estancia se observa una segunda parte con una matriz vulcanosedimentaria con clastos subredondeados y mal seleccionados de caliza, formando estratos de hasta 3 metros de espesor.

Hacia Zapotitlán Palmas-Hujuapán, se observa conglomerado calcáreo con cantidades menores de pedernal, calcedonia y cuarzo lechoso. Los clastos se encuentran subredondeados, moderadamente seleccionados, y presenta estratificación mayor a 2 metros. En la cima ocurren capas limo-arenosas tobáceas de colores rojo, rosa y verde, con yeso en vetillas, muy abundante localmente y calcedonia en forma de concreciones irregulares.

La tercera parte se encuentra bien cementada, con una matriz arenosa de color rojizo y con clastos de esquisto y cuarzo metamórfico de hasta 30 cm. La estratificación en los afloramientos observados es subhorizontal, con una ligera inclinación hacia el NW, de entre 5 y 14 grados. Su espesor es variable, Caballero-Miranda (1990) estima de hasta 250 m en algunas localidades.

Cortando a la Formación Huajuapán se tiene una veta de yeso "masivo" de 60 cm con textura "sacarosa", las vetillas de yeso en la zona tienen un hábito acicular y su espesor máximo es de 10 cm.

La Formación Huajuapán sobreyace de manera discordante a las formaciones mesozoicas e infrayace discordantemente mediante un contacto ondulante, a las rocas volcánicas.

A esta unidad se le correlaciona con la Formación Yanhuatlán (Schlaepfer, 1970; Ferrusquia-Villafranca, 1970 y 1976) al sureste del área de estudio, para la cual se tienen edades isotópicas de 49.0 +/- 8 Ma (Ferrusquia-Villafranca, 1976).

Hacia la Barranca de Rancho La Virgen se observa una cuarta subunidad constituida por conglomerado arenoso con clastos de esquisto, caliza, arenisca en una matriz de color rojo, para caracterizar bien el espesor y el ambiente de depósito de esta secuencia se sugiere hacer un estudio estratigráfico a detalle.

Rocas volcánicas cenozoicas

Unidad Ahuehuetitlán

Secuencia volcánica de morfología tabular y superficie irregular de fuertes pendientes, conformada por diversas emisiones lávicas y piroclásticas, con un espesor estimado por Caballero-Miranda (1990) de 200 m.

La composición predominante de las rocas volcánicas es andesita, la textura de los componentes varía de afanítica a porfídica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda; presentan un color gris verdoso y frecuente intemperismo esferoidal (Caballero-Miranda, 1990).

Esta unidad se compara, por su posición estratigráfica y por sus características litológicas, con las Andesitas Yucudac y San Marcos, ambas al sureste del área (Ferrusquia-Villafranca, 1976).

Andesita basáltica Chila

Serie de rocas volcánicas de composición andesítica-basáltica compuestas por basaltos vesiculares de color gris oscuro a negro y estructura lajeada, Caballero-Miranda (1990) considera que son de edad posterior a la unidad Ahuehuetitlán e inclusive cuaternarios. La misma autora los relaciona con una zona de debilidad que corresponde con la traza de la falla Petlalcingo Huajuapan.

Rocas hipabisales

Cuellos hipabisales descritos por Caballero-Miranda (1990) y que se relacionan genéticamente con la Andesita basáltica Chila, de composición andesítica y dacítica, contiene fenocristales de anfíboles en una matriz microcristalina. Se encuentran emplazados sobre la Formación Huajuapan y sus relaciones de corte y su morfología sugieren una edad del Neógeno.

Otro cuerpo descrito por Caballero-Miranda (1990) se encuentra en la Barranca Cola de Tlacuache, al norte de San Jerónimo Silacayoapilla dentro de la Formación Tecomazúchil, su extensión es pequeña para ser

cartografiado, es una diabasa porfídica constituida por fenocristales de hornblenda de 4 cm de largo con una matriz color gris oscuro, intemperiza de manera esferoidal en un color gris verdoso. Por estar dentro del paquete rocoso del Jurásico se le asinga una edad general mesozoica.

Rocas intrusivas

1) Al oeste de Santiago Chilixtlahuaca se presenta un cuerpo intrusivo que aflora en contacto con la Formación Acatlán y la Formación Tecomazúchil, es de composición diorítica con cristales de plagioclasa, hornblenda y biotita. Caballero-Miranda (1990) reporta que contiene xenolitos de arenisca y limolita de longitudes de 3 m por 1.5 m, en superficie expuesta. Estudios previos (Ruiz-Castellanos, 1979) lo clasifican como monzonita. Su morfología es de peñascos redondeados, de relieve poco prominente. Sus relaciones de corte indican una edad posterior al Jurásico medio, dentro del Mesozoico.

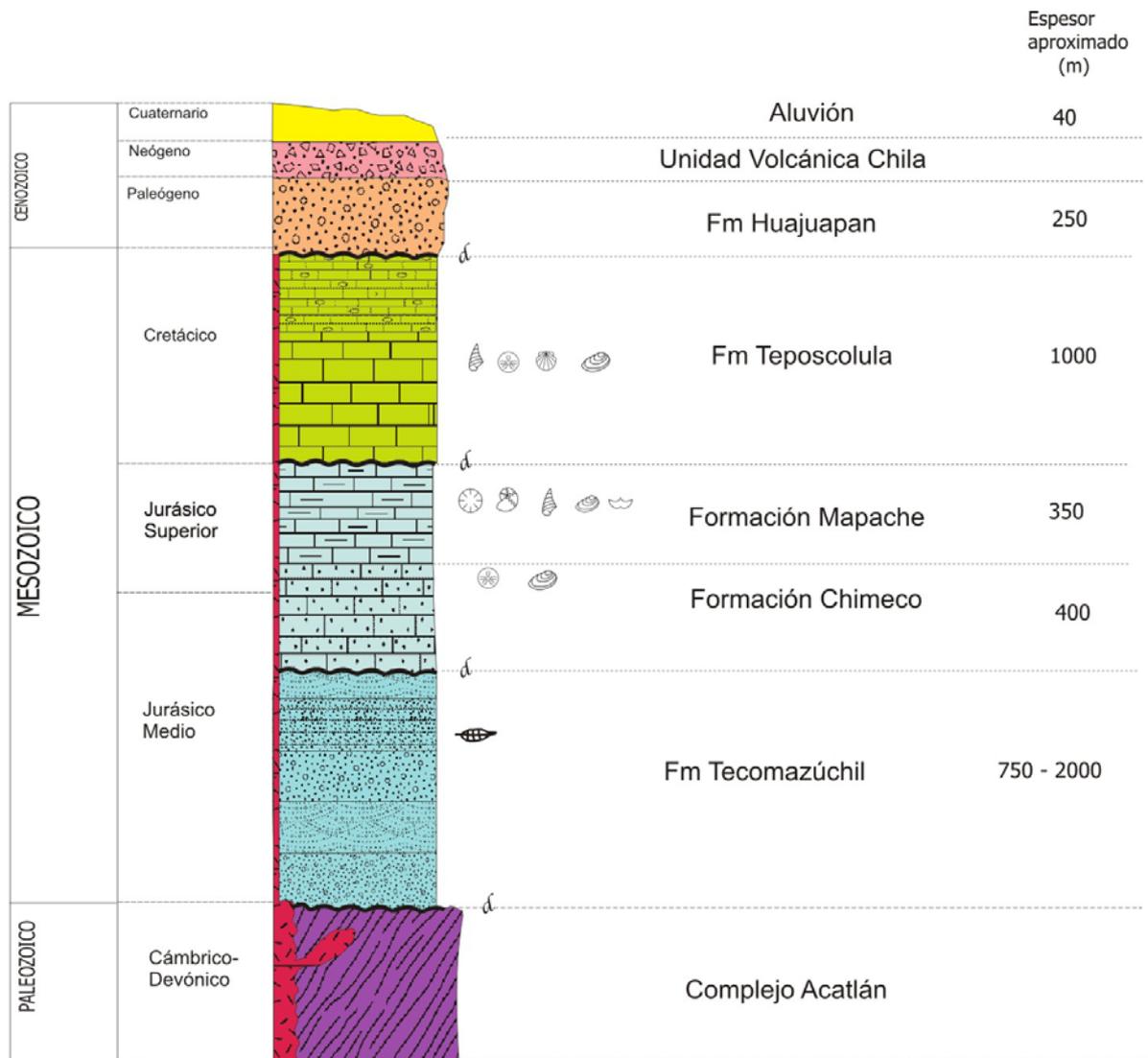
2) Al sureste de Chila: cuerpo más somero que el de Santiago Chilixtlahuaca, Caballero-Miranda (1990) lo describe como un aparente anticlinal debido a que se presenta en dos afloramientos asociados. Su composición es diorítica, es de color verde y su morfología es de hondonadas. Está cubierto por la formación Huajuapan y es cortado por las fallas normales que afectan a toda la secuencia mesozoica, por esto se le asigna una edad general al Terciario inferior.

Depósitos cuaternarios:

Caliche: Costra calcárea de superficie rugosa formada sobre las rocas carbonatadas, que ocurre en la parte superior de las elevaciones de calizas y de los conglomerados calcáreos, afloran en toda la zona de estudio.

Terrazas aluviales: Depósitos de aluvión antiguos, posiblemente de inicios del Holoceno, dedicados a la practica de la agricultura.

Aluvión: Depositados a lo largo de valles en zonas de baja pendiente algunos dedicados a cultivos agrícolas.



Simbología

 Aluvión	 Caliza con nódulos de pedernal	 Cuerpos intrusivos.	 Flora fósil
 Areniscas, cenizas y arcillas.	 Caliza masiva	 Andesita basáltica	 Pelecípodos
 Conglomerado arenoso	 Caliza arcillosa	 Discordancia	 Moluscos
 Arenisca bandeada	 Caliza arenosa		 Equinoideos
 Arenisca con estratificación cruzada	 Esquistos pelíticos verdes y gneis de mica		 Corales
			 Gasterópodos
			 Braquiópodos
			 Amonioideos

Figura 6. Columna estratigráfica del área de estudio (modificado Martiny-Kramer 2010).

3.2 Geomorfología Local

El área de estudio se encuentra dentro de la Sierra Madre del Sur definida de manera general como: una sierra con prominencias de hasta 3000 m de altitud, con valles intermontanos, planicies con lomeríos, barrancas y planicies aluviales, lo que da una variedad de tofoformas muy amplia.

El relieve de la zona está marcado por la presencia de un gran número de cerros y lomeríos, que forman parte de la Sierra Mixteca o también conocida como Nudo o Escudo Mixteco. Esta sierra comprende los estados de Puebla y Oaxaca y se le conoce con el nombre de Zempoaltépetl (las veinte montañas en náhuatl). Se le llama Escudo Mixteco por que en la zona donde confluyen la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur.

La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km entre el sur de Jalisco y el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Su altitud media es de 2000 m.s.n.m.

La geomorfología del área de estudio es el resultado de la interacción de diferentes factores: la litología, estructuras geológicas, tipos de suelo, patrones fluviales y el clima de la región.

Hacia la zona oeste de estudio, donde aflora rocas metamórficas que componen al basamento, se observa un sistema de lomeríos y cerros con cotas que van de los 1500 metros en las partes más bajas hasta los 2000 m.s.n.m en las partes altas. La densidad de drenaje es variable.

Hacia la parte en donde aflora principalmente la Formación Tecomazúchil se presentan lomas con pendientes suaves y un drenaje dendrítico amplio.

En la zona donde afloran las formaciones constituidas por carbonatos las geoformas son lomas con una pendiente suave. En la parte en donde se tiene el contacto entre las formaciones cretácicas y la parte jurásica se presenta un escarpe de aproximadamente 80 metros visto desde las fotografías aéreas e interpretado como una zona de despegue.

Algunos de los cerros que se tienen en el área de estudio corresponden a aparatos volcánicos como el cerro Yucunduchi (monte de frijol en Mixteco), el cerro Yucumi así como el cerro Yucutache (monte del pájaro en Mixteco), (Caballero-Morales, 2008).

En la parte oriental de la zona hacia el poblado de Zapotitlán Palmas existen depósitos volcánicos en donde también se puede observar una densidad de drenaje detrítico y cerros de pendiente mayor a los 30°.

Hacia la ciudad de Huajuapán de León las lomas se presentan con pendiente suave <30° con algunos barrancos pronunciados.

3.2.1 Geomorfología kárstica

Las geoformas que componen al sistema cretácico se caracterizan por ser sierras longitudinales con algunas zonas en donde se observa un desarrollo de zonas kársticas con estructuras de colapso, simas, uvalas y cavernas. Estas estructuras tienen una alineación preferencial norte sur y este oeste.

En las rocas carbonatadas dolomitizadas de la Formación Teposcolula se presentan estructuras de erosión por disolución llamadas lapiaz del francés, karren del alemán (Bauer, 1962) o solution flutes del inglés (Jennings, 1985). Estas estructuras se caracterizan por ser canales parabólicos de 3 a 5 cm de ancho por 4 a 6 cm de profundidad en promedio, con base en la clasificación de Sweeting (1972) se denomina lapiaz libre a las superficies disueltas que no presentan alguna cubierta de suelo o de algún otro tipo de roca y se forman cuando reacciona el agua con el bióxido de carbono liberado por las plantas. En la zona de estudio se presentan lapiaces Rillenkarrén radiales y alargados con las crestas puntiagudas (Figura 7).

El desarrollo de estas estructuras en la calizas de la Formación Teposcolula indica una inocua presencia de lluvias espaciada en periodos temporales.



Figura 7. Fotografías de estructuras Rillenkarren sobre calizas de la Formación Teposcolula, largo de la pluma 15 cm, diámetro de la moneda 3 cm.

Capítulo 4. Geología Estructural

El límite oriental del terreno Mixteco con el terreno Oaxaca ha sido reconocido, al sureste de Tehuacán (Ortega-Gutiérrez, 1981) como tectónico al nivel del basamento, por la existencia de una franja cataclástica con orientación norte-sur.

El límite sur y occidental se encuentra al sureste de Tierra Colorada (Salinas-Prieto, 1984), en donde el Complejo Acatlán se encuentra cabalgando al Complejo Xolapa a través de una zona de milonitización noroeste-sureste con buzamiento hacia el noreste. El límite poniente se encuentra cubierto por los depósitos de la plataforma Morelos-Guerrero, aunque se ha interpretado en contacto tectónico con el Complejo Tierra Caliente con traza norte-sur (Campa y Coney, 1983). El límite septentrional no se conoce ya que está cubierto por depósitos mesozoicos y cenozoicos.

Dentro del Complejo Acatlán Weber *et al.* (1997) han reconocido seis etapas de deformación, las cuales se manifiestan en diferentes facies metamórficas, grados de ductilidad y correlación temporal. La primera deformación está caracterizada por metamorfismo de alta temperatura, que se superimpuso a eclogitas y culminó en anatexis y la intrusión de granitos. La segunda deformación causó retrometamorfismo (diaftóresis) llegando hasta un metamorfismo de bajo grado (esquisto verde). La tercera deformación plegó el área en estructuras isoclinales y estrechas con vergencia hacia el poniente. La cuarta deformación está caracterizada por pliegues tipo "kink" una zona empinada de cizalla cataclástica y planos de estrías. La quinta deformación se relaciona con un fallamiento frágil. Para la sexta y última etapa de deformación existió un fallamiento normal con ejes subverticales y ejes subhorizontales.

Moran-Zenteno en 1987, definió nueve zonas estructurales para clasificar los distintos estilos de deformación en la cubierta sedimentaria del Terreno Mixteco, la zona de estudio se encuentra dentro de la "Zona Huajuapán Tlaxiaco", caracterizada por dicho autor por pliegues abiertos con rumbos axiales casi norte-sur, desarrollados en secuencias de edades Jurásico Medio-Cretácico, con la presencia de basamento en el núcleo de algunas estructuras.

4.1 Estructuras regionales

Una de las estructuras regionales más importantes y preponderantes de la zona es la falla de Oaxaca, un sistema de fallas normales con una longitud de 250 km con una orientación general al NNW y con una inclinación hacia el poniente. Su traza se extiende desde el poblado de Miahuatlán, al sur de la ciudad de Oaxaca, hasta Tehuacán, Puebla (Nieto-Samaniego et al., 1995).

Su historia y su cinemática es amplia y compleja ya que a través del tiempo geológico, la falla de Oaxaca ha tenido diferentes etapas de actividad tectónica con movimientos y magnitudes de desplazamiento diferentes: ha actuado como cabalgadura, falla lateral y como falla normal, presentando fases de actividades desde el Pérmico hasta el Mioceno. (Alaniz-Álvarez et al 1996; Dávalos-Álvarez et al., 2007). La falla de Oaxaca es interpretada como el límite tectónico entre los terrenos Oaxaca y Juárez.

Falla de Caltepec

La Falla de Caltepec es una zona de cizalla con una historia compleja de deformación cristal plástica y frágil (falla transpresiva derecha) que representa el contacto tectónico entre los basamentos cristalinos Acatlán del Paleozoico y Oaxaqueño del Mesoproterozoico, delimitando a los terrenos Mixteco y Zapoteco. La falla Caltepec tiene un rumbo general N-S a NNW con un espesor de 2 a 6 km con una estructura en media flor (half-flower structure) en sección transversal (Elias-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 1998, 2002).

Otra estructura importante a escala regional es la falla lateral del Río Salado, que pone en contacto rocas del Complejo Acatlán con rocas Mesozoicas, esta falla es interpretada por Martiny-Kramer, et al. (2010) como una falla Paleozoica reactivada a finales del Cretácico.

Subparalelas a la falla del Río Salado se tienen las fallas con rumbo NW72 y otra con rumbo NW68, las cuales se encuentran a lo largo del contacto entre la Unidad San Miguel Papalutla (calcáreo arcillosa del Hauteriviano-Valanginiano) y el Complejo Acatlán.

Falla Tamazulapan

Ubicada en el flanco poniente del anticlinal Tamazulapan, al sur del poblado con el mismo nombre, es una estructura con una longitud mayor a los 100 km y un rumbo general Norte-Sur. Presenta dos direcciones de movimiento; como falla normal y como falla lateral derecha. (Santamaría-Díaz et al. 2008).

Falla Las Pilas

Se localiza al norte del anticlinal Teposcolula, tiene un rumbo E-W desde Tejupan hasta Tamazulapan, cambiando a WNW al poniente de Tamazulapan, su inclinación es hacia el norte. En la región de Tamazulapan-Tejupan, esta estructura se manifiesta superficialmente como un lineamiento con orientación E-W y a lo largo de él se observan escalones topográficos sobre rocas del Mesozoico. En el trabajo de Cerca et al. (2007) se le asigna un movimiento lateral izquierdo.

Anticlinorios Diquiyú y Teposcolula

Se consideran estructuras de edad laramídica (Martiny-Kramer, 2008) y se encuentran ubicados al suroeste de Huajuapán de León y al sureste de Tamazulapán. Los ejes de los dos anticlinorios tienen una orientación N-S a NNW y buzan al norte. La mayor parte de las rocas en los dos anticlinorios son rocas sedimentarias marinas, depositadas en una cuenca extensa (cuenca de Tlaxiaco) durante el Jurásico y Cretácico.

En el anticlinorio de Diquiyú, la unidad más joven afectada por la deformación es la Caliza Teposcolula. El anticlinorio de Teposcolula está constituido principalmente por caliza de la Caliza Teposcolula.

4.2 Estructuras del área

Dentro del área cartografiada se observa un lineamiento con rumbo NW-SE (Falla Petlalcingo-Huajuapán) con la presencia de cuerpos ígneos sobre esta traza, se tiene la presencia de otra estructura en el contacto del complejo metamórfico paleozoico y las rocas jurásicas continentales. En las fotografías aéreas destaca la presencia de un escarpe en el contacto entre las unidades jurásicas y la unidad cretácica, la cual se interpreta como una zona de despegue tectónico debido a las notables diferencias en cuanto a la deformación en las unidades posteriores al Jurásico Medio y debido al desarrollo de una superficie milonítica de hasta 8 metros de espesor. (Figura 8).

En el contacto entre el Complejo Acatlán y depósitos continentales del Jurásico Medio, entre los poblados de Santiago Chilixtlahuaca y Saucitlán, se presenta un lineamiento subparalelo a la falla Petlalcingo-Huajuapán que Caballero Miranda (1990) interpretó como una posible falla de crecimiento, contemporánea al depósito de la Formación Tecomazúchil.

Falla Petlalcingo-Huajuapan

Caballero-Miranda (1990) reporta una falla normal post-Turoniano, la cual denominó Petlalcingo-Chila con el bloque caído hacia el suroccidente. Esta estructura fue inferida con base en: el contacto se presenta de manera rectilínea, la inclinación de los estratos de edad cretácica y la distribución lineal de cuerpos hipabisales y productos volcánicos del área.

En la zona de estudio se observa un lineamiento con un rumbo N30W con afloramientos de rocas paleozoicas en el lado nororiental y con cuerpos hipabisales aflorando a lo largo de esta traza. Martiny-Kramer, et al. (2000) reporta las edades de estas rocas pertenecientes al Oligoceno temprano y los asocia a esta zona de debilidad cortical e infiere que la falla puede llegar hasta 35 km de longitud, extendiéndose desde Petlalcingo en el NW hasta Huajuapan de León en el SE.

La presencia del lineamiento de cuerpos hipabisales sugiere un control estructural que facilitó el ascenso de los magmas durante el Oligoceno temprano. Durante el Paleógeno, la acumulación de conglomerados, con clastos derivados principalmente del bloque cretácico levantado, y material volcánico ocultaron la traza de esta falla inferida (Martiny-Kramer, 2008).

Otras de las evidencias encontradas en campo de este lineamiento es una brecha de falla que aflora sobre el libramiento que va de Huajuapan de León a la carretera estatal número 190. Esta brecha está dentro de la secuencia volcánica de la Formación Huajuapan y se encuentra constituida principalmente de arcillas de color amarillo mostaza (Figura 8)

Al oriente del poblado Zapotitlán Palmas sobre los depósitos volcánicos cenozoicos, se encuentra una zona altamente fracturada con bloques caídos hacia el poniente. El sistema de fracturas en esta zona tiene una orientación preferencial medida en campo hacia el N25E-NW24 (Figura 8)

Falla Ibarra Ramos

Inicialmente definida por Caballero-Miranda, 1990, como rasgo se encuentra al sur del poblado con el mismo nombre y corta a parte de la secuencia sedimentaria que aflora en las inmediaciones de Chila de las Flores. La estructura fue inferida con base en la estratigrafía de la zona ya que afloran rocas jurásicas sobreyaciendo a rocas cretácicas. Esta falla es de carácter normal con el bloque oriental caído y se encuentra orientada NW30°.

Falla Rancho La Virgen

Informalmente propuesta en este trabajo para designar al rasgo morfológico que aflora al sur del poblado con el mismo nombre y que pone en contacto rocas jurásicas con rocas cretácicas. Esta estructura se comporta como una falla normal con el bloque poniente caído. De manera conjunta la Falla Ibarra Ramos y la Falla Rancho La Virgen forman un graben limitado por dos cuerpos intrusivos de composición andesítica.

Falla las Peñas

La falla Las Peñas fue descrita por Martiny-Kramer (2008) como una estructura subvertical con una orientación N-S a NW10SE con una longitud de 18 km, expuesta en la población del mismo nombre al nororiente de Tezoatlán.

Al sur del área, Martiny (2008) comenta que la falla Las Peñas se prolonga hasta la presa de Yosocuta donde pone en contacto rocas jurásicas continentales y marinas. En esta localidad, la falla es vertical ($>70^\circ$), presenta una orientación norte a nor-noroeste y una zona de cizalla de ~3 m dentro de una zona de deformación de ~8 m de ancho. Al Sur de esta falla la autora observa un plano de falla subvertical con una orientación general N-S e indicadores cinemáticas de desplazamiento lateral izquierdo.

En este trabajo se prolonga la falla lateral las Peñas ya que se observa un lineamiento norte-sur en las fotografías aéreas y la presencia de cuerpos intrusivos a lo largo de este rasgo. En la carretera que va al poblado de Yosocuta en el contacto entre la Formación Solano y la Formación Tecamazuchil se observan estructuras de foliación sigmoidal, sobre el plano de falla, sobre el contacto entre la Formación Tecamazúchil y la Formación Solano, en el plano de falla las estructuras se presentan con mayor abundancia y asociadas a las sigmoidales se presenta la Formación Solano con un clivaje horizontal muy marcado (Figura 8).

Dentro de la Formación Solano se observan vetillas formadas por extensión rellenas de calcita y formando un ángulo de 90° respecto al plano de cizalla. Así mismo se tienen presentes fibras minerales de calcita, la cual precipita al momento del deslizamiento sobre la roca y se forman como escalones en la dirección del la cizalla de la falla. Dentro de las lutitas calcáreas la lineación de calcita tiene una dirección NW20 y están de manera horizontal (Figura 8).

Asociadas a estas estructuras sobre la Formación Tecamazúchil se tienen presentes fallas laterales izquierdas las cuales presentan espejo de falla y escalonamientos que indican la dirección de los esfuerzos. Estos indicadores sugieren un desplazamiento por una cizalla lateral izquierda de posible edad Jurásica en donde las dos unidades se ven afectadas por este desplazamiento y por sus características litológicas en la Formación Tecamazúchil (clástica continental) se tienen brechas clásticas con estructuras sigmoidales y en la Formación Solano (lutitas calcáreas) se desarrollan fibras minerales de calcita.

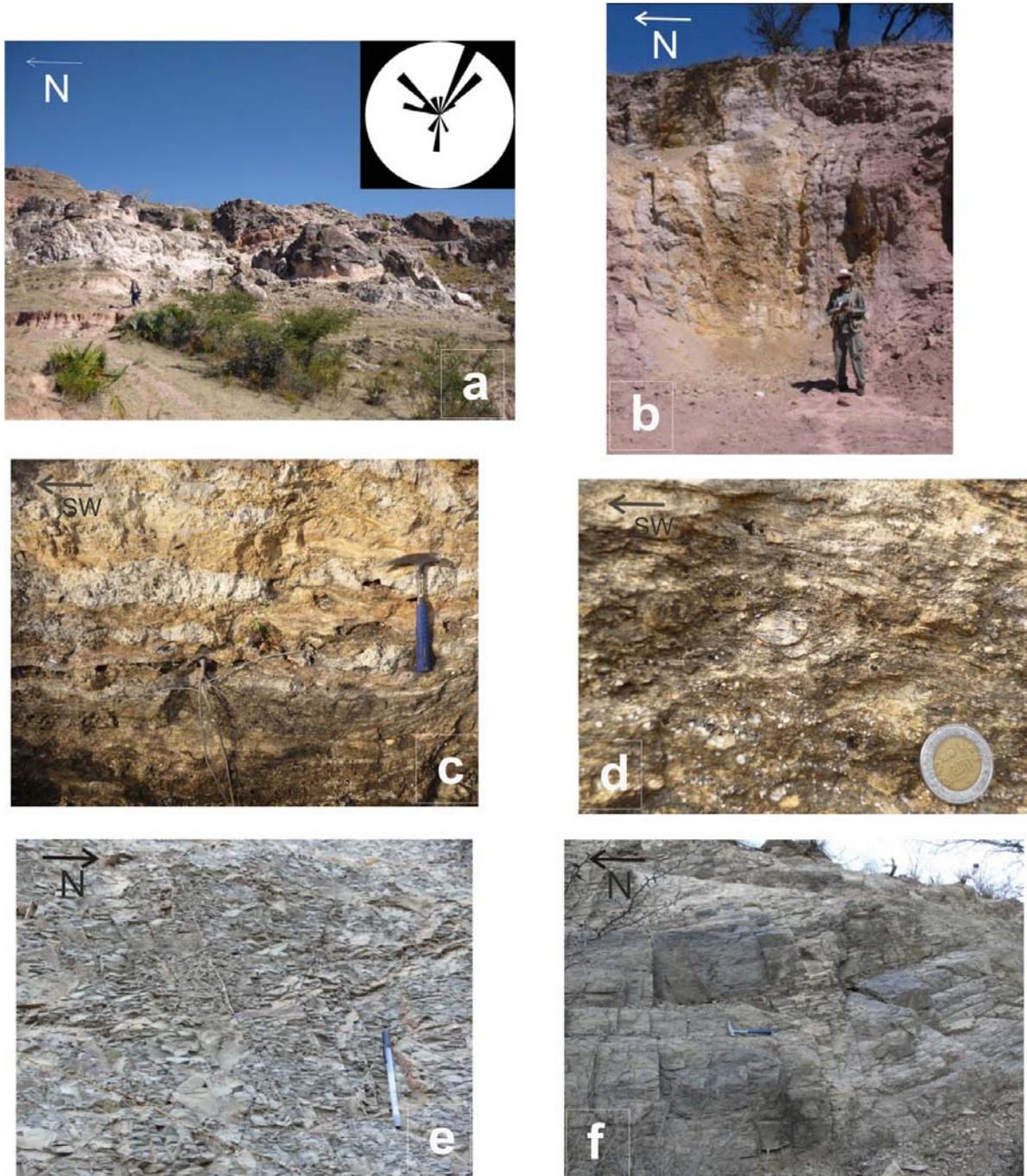


Figura 8. Fotografías de campo; a) Bloques caídos cerca de Zapotitlán Palmas sobre la traza de la falla Petlalcingo-Huajuapán con diagrama de dirección preferencial de fracturas. b) Brecha de falla sobre el libramiento de Huajuapán de León. c) Roca cizallada en zona de despegue sobre el río Boquerón. d) Clasto de pedernal en roca intensamente cizallada sobre el río Boquerón. e) Fracturas y desarrollo de clivaje Falla Las Peñas. f) Crecimientos minerales de calcita en Formación Solano sobre la zona de cizalla de la Falla Las Peñas.

4.3 Estructuras en Formación Teposcolula

Dentro de la Formación Teposcolula sobre los ríos Boquerón y Boquerón chico se observan pliegues por propagación de falla, pliegues de flexión por falla, brechas de falla, cizalla intracapas, una zona de despegue tectónico y pliegues abiertos simétricos que afectan a calizas de plataforma con textura tipo mudstone a wackestone.

Como parte de la caracterización estructural de la Formación Teposcolula se realizaron tres secciones (H, I y J) (Apéndice) con un rumbo general NE-SW en donde se pretende mostrar la deformación de la cubierta sedimentaria, así como un cuadro en donde se resume el estilo de deformación y las estructuras que existen en el paquete cretácico calcáreo (Figura 9).

El conjunto de los pliegues medidos en la Formación Teposcolula nos indica una dirección de los planos axiales hacia el NW Con un buzamiento hacia el NE y un ángulo interflanco de 132°.

El acortamiento medido en campo en algunos de los rasgos de deformación dúctil y frágil de los afloramientos de la secuencia sedimentaria marina reflejan valores de hasta 20% de acortamiento con otros menores de 15% o 10% con el método de la cuerda, en el cual se considera que no ha habido cambio en el volumen del estrato y se mide sobre un estrato la distancia entre las charnelas del pliegue y después se considera al estrato como si tuviera un comportamiento horizontal con lo que se puede hacer calculando la extensión (e) de una línea como se define:

$$e = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} \quad (1.1)$$

En donde l_0 es la longitud original y l_1 es la longitud final.

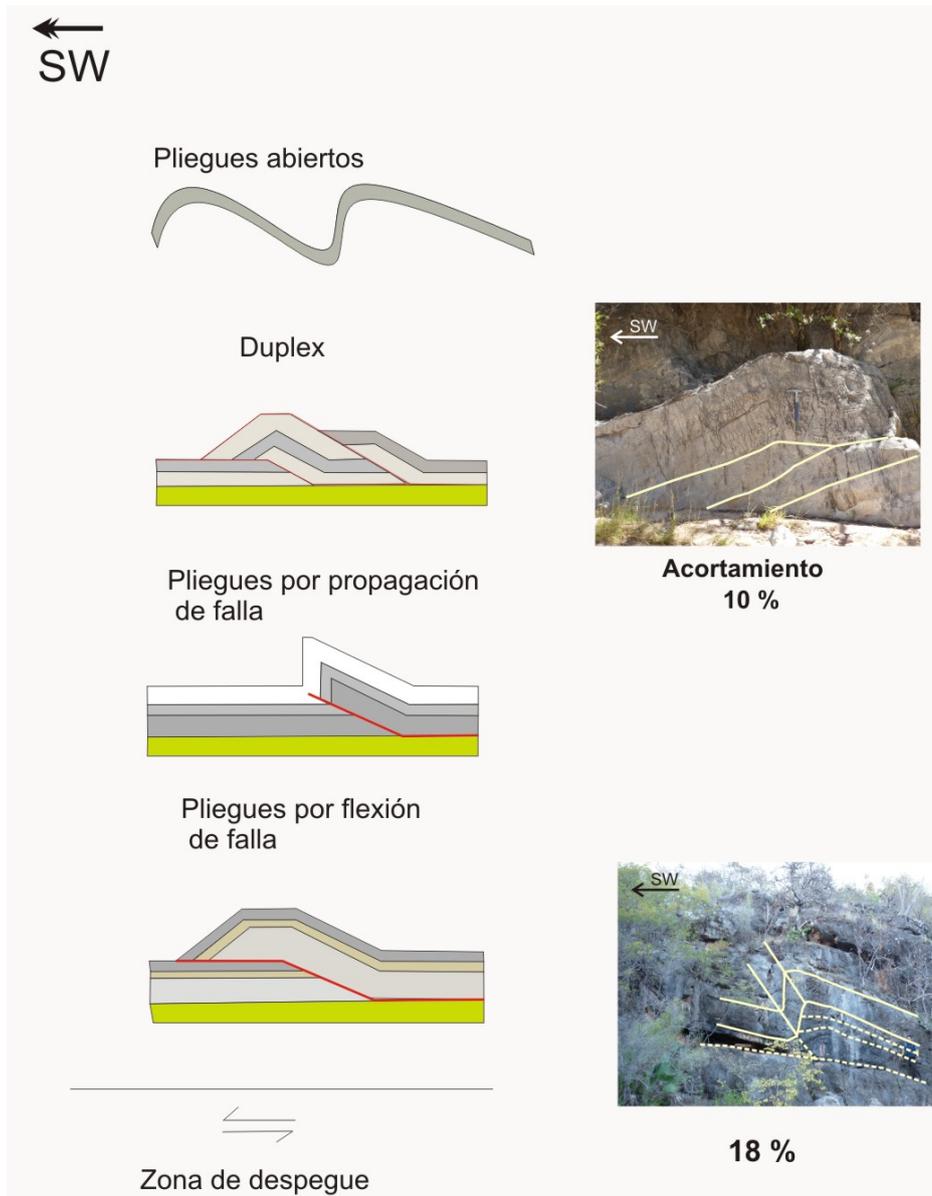


Figura 9. Estructuras encontradas en la Formación Teposcolula.

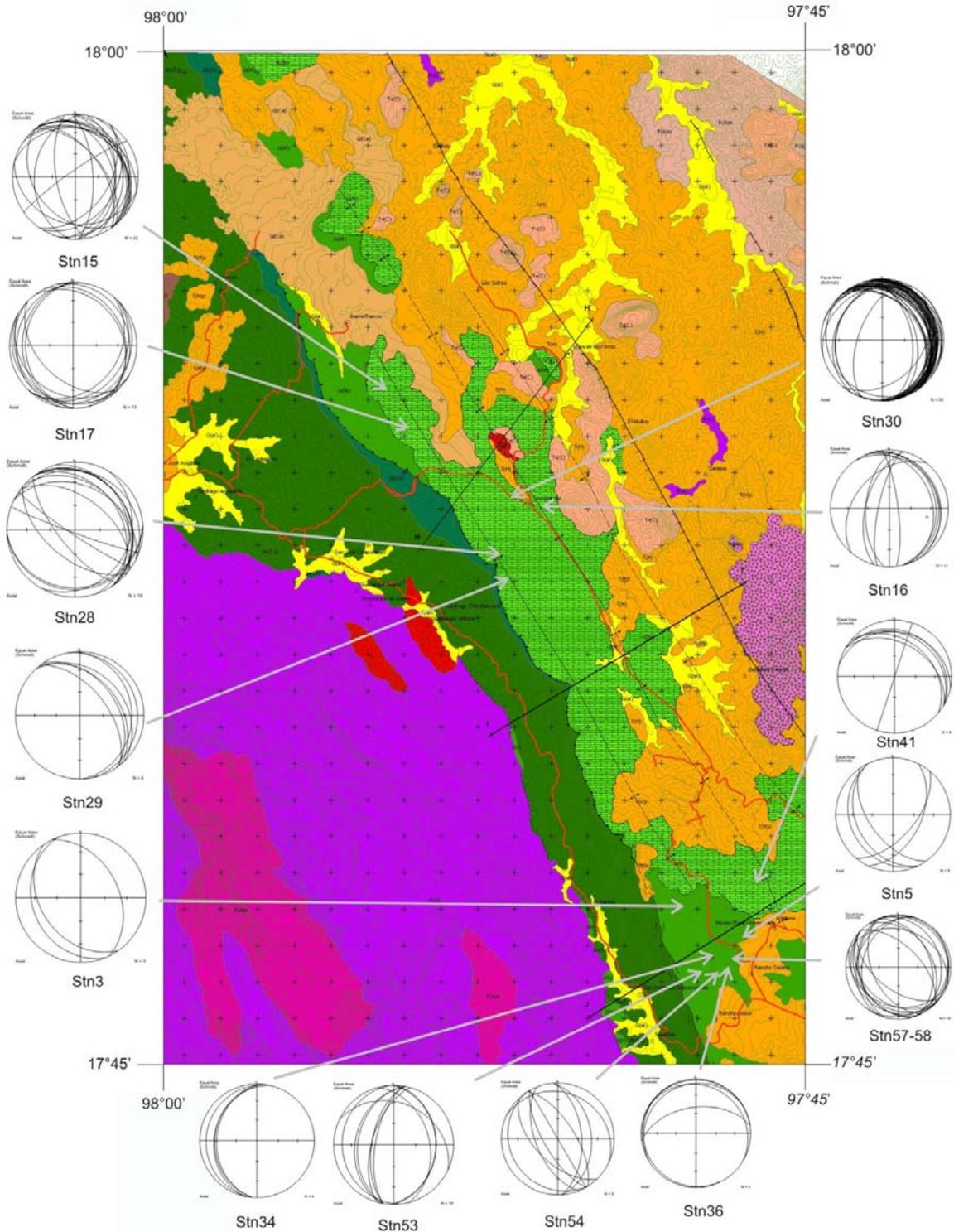


Figura 10. Mapa estructural del área de estudio en donde se muestra el análisis estructural de de algunas estructuras importantes dentro de la Formación Teposcolula y Solano. Diagramas equiareales (proyección Schmidt) de los pliegues mesoscópicos.

La Formación Teposcolula se encuentra deformada y presenta pliegues asimétricos con vergencia hacia el SW. Los pliegues de flexión por falla se desarrollan cuando la roca está sometida a un esfuerzo cortical y existe una zona que se pliega y se rompe a lo largo de un plano y formando un ángulo interflanco promedio de 60° (Suppe, 1985). (Figura 11). Los pliegues que también se encuentran en las secciones del Boquerón y Boquerón chico son asociados a la propagación de fallas (Figura 12). El flanco corto en los pliegues de la Formación Teposcolula se encuentra de forma vertical. La deformación es más intensa hacia el NE que hacia la zona de despegue en contacto con las unidades más viejas.

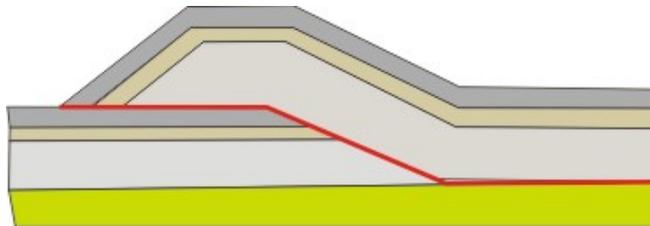


Figura 11. Pliegue por flexión de falla (Modificado de McClay 1992).

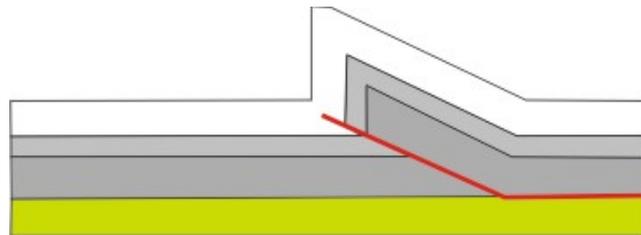


Figura 12. Pliegue por propagación de falla (Modificado de McClay 1992).

4.4 Estructuras en Formación Solano

Hacia el poblado de Rancho Jesús las intercalaciones jurásicas entre lutitas calcáreas y calizas presentan un plegamiento más intenso representado con pliegues tipo chevron con una vergencia de los planos axiales hacia el NE.

Para los pliegues tipo Chevron el acortamiento medido en campo fue de 50% por el método de la cuerda o de extensión para líneas horizontales, se presenta cizalla intracapas con los estratos de menor competencia mecánica más intensamente deformados y aplastados, así como con un mayor desarrollo de clivaje, el ángulo interflanco oscila entre 80 y 100° con un fracturamiento concentrado en el plano axial de los pliegues (Figura 13).

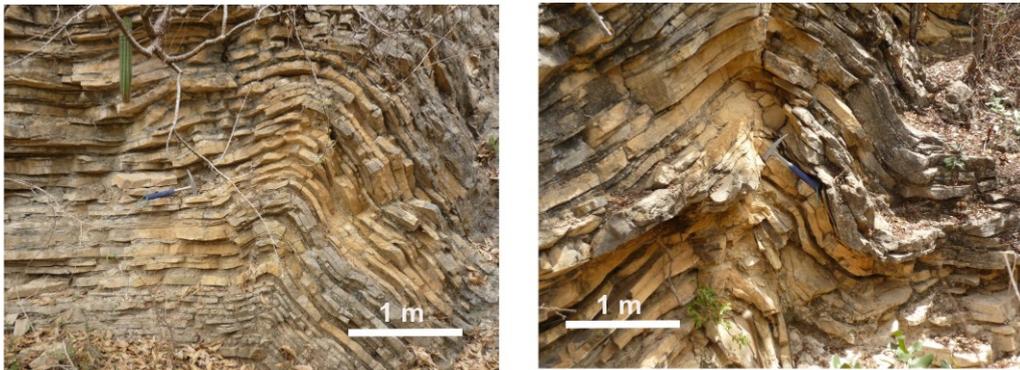


Figura 13. Pliegues en intercalación de lutitas calcáreas y calizas (Formación Solano)

4.5 Fracturas

Es interesante relacionar el desarrollo de las estructuras mayores, con la deformación regional, así como con los sistemas de fracturas encontradas en las diferentes litologías de la zona de estudio. La interpretación de los sistemas de fracturas se establece tomando en consideración los datos estructurales de campo y posteriormente se analizan en gabinete.

El desarrollo de fracturas es referido de manera amplia en la literatura y se pueden clasificar con base en experimentos de laboratorio considerando tres tipos: a) fracturas de cizalla; b) fracturas de extensión; c) fracturas tensiles o híbridas. Otra clasificación es por la ocurrencia natural (Stearns *et al* 1972.) en dónde las estructuras pueden ser clasificadas con base en el origen de las fuerzas que las ocasionó, de deducidas por la relación geométrica que presenten. Para la interpretación de de fracturas por ocurrencia natural es necesario determinar el campo de esfuerzos en el momento que ocurren las fracturas ya que se relaciona de manera directa con los tres esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , σ_3).

La clasificación por ocurrencia natural propuesta por Stearns *et al.* (1972) considera tres tipos de fracturas: a) Fracturas tectónicas (debidas a fuerzas de superficie); b) fracturas regionales (debidas a fuerzas de superficie); c) fracturas diagenéticas (debidas a fuerzas de volumen).

La intensidad del fracturamiento asociado con el fallamiento depende del tipo de litología, deformación de las rocas, profundidad y otros parámetros relacionados al ambiente tectónico que se esté analizando, sin embargo la relación espacial de las fracturas siempre se mantiene (sistemas de fracturas). Los sistemas de fracturas relacionados con pliegues es un tema abordado por diversos autores como Price (1966), Stearns *et al.* (1972), Price y Cosgrove (1990).

La posición e intensidad de las fracturas en un pliegue, varían con la forma y origen de este, muchos patrones persisten en la mayoría de los pliegues que han sido observados y estudiados en detalle. Los sistemas de fracturas más abundantes que se han reconocido en la mayoría de los pliegues son sistemas denominados por Stearns *et al.* (1972) como del tipo I y tipo II. La geometría idealizada y la distribución típica característica del tipo I y tipo II. Los sistemas I y II forman enjambres que presentan lineamientos, estas fracturas se generan tanto por compresión horizontal como por levantamiento vertical. Las fracturas del tipo II se desarrollan siguiendo el eje mayor, mientras que las del tipo I en sentido transversal, esto es las fracturas del tipo II presentan extensión perpendicular al eje mayor del pliegue y las del tipo I compresión en la dirección del eje menor (Figura 14).

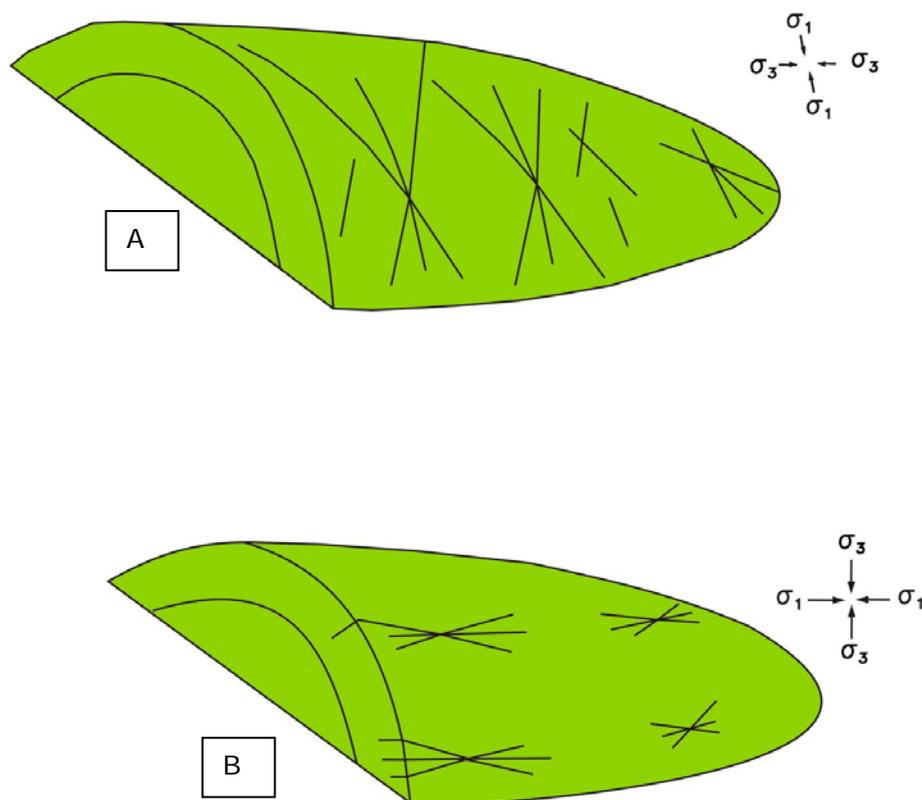


Figura 14. Fracturas en un pliegue A) Fracturas del tipo I, B) Fracturas del tipo II (Modificado de Stearns 1972).

Para realizar el análisis de fracturamiento de la Formación Teposcolula se tomaron un total de 243 fracturas y después de analizarlas se observa que las fracturas encontradas en la Formación Teposcolula tienen una dirección preferencial E-W (Figura 15). Dentro de la Formación Solano se analizaron fracturas y la dirección preferencial es NE70 (Figura 16).

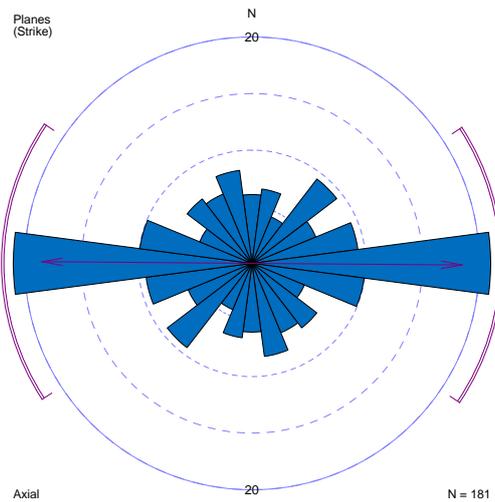


Figura 15. Diagrama de rosa de las fracturas encontradas en la Formación Teposcolula

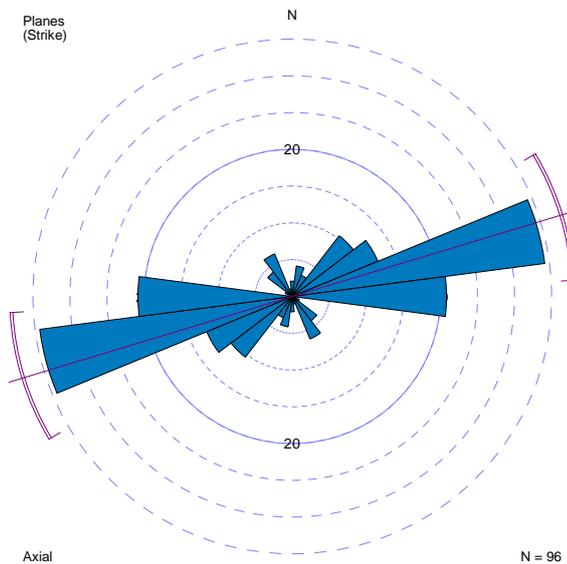


Figura 16. Diagrama de rosa de las fracturas encontradas en la Formación Solano.

En la Formación Huajuapán cerca del poblado de Zapotitlán se observan bloques caídos y una zona con una densidad de fracturamiento alta (Figura 17).

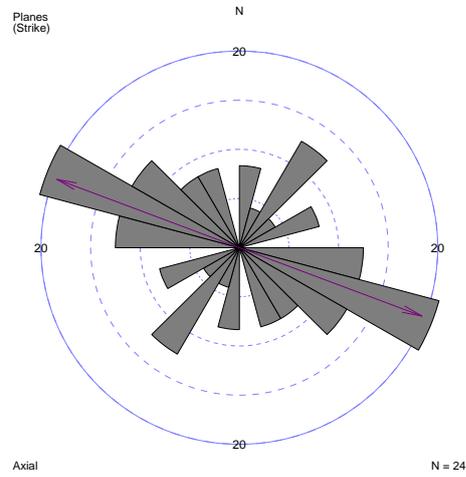


Figura 17. Diagrama de rosa de las fracturas en Formación Huajuapán.

Capítulo 5. Discusión

En el área de Huajuapán de León Oaxaca afloran estructuras plegadas de distintas edades y estilos de deformación, las cuales son el resultado de una evolución estructural particular y compleja para el terreno Mixteco. En este estudio se recolectó información geológica para caracterizar las unidades que afloran en la zona y principalmente para documentar la deformación que ocurre en las secuencias marinas depositadas durante el Cretácico y Jurásico.

El desarrollo de pliegues en la Formación Teposcolula está relacionado posiblemente a la deformación laramídica del sur de México y a los movimientos del bloque Mixteco-Zapoteco e inclusive con el levantamiento del Terreno Xolapa al sur de México y su relación con el polémico Bloque de Chortis.

Las condiciones de depositación de las secuencias carbonatadas cretácicas se caracterizan por ser de aguas someras con abundantes organismos marinos y con eventos esporádicos de colapso en las zonas karstificadas (brechas de colapso), así como eventos de emersión subaérea lo que conllevó al desarrollo de la dolomitización.

En la parte superior de la sucesión cretácica se encuentra una unidad caracterizada por la presencia de margas y lutitas calcáreas que corresponde a un evento con gran aporte de terrígenos, probablemente por su cercanía con la costa. Esta secuencia se debe describir con detalle ya que aparenta tener diferencias litológicas con respecto a la Formación Teposcolula, la presencia de fósiles también indica condiciones de depósito distintas.

La deformación en la Formación Solano también se asocia a este evento compresivo aunque presente pliegues con una vergencia opuesta a los de la Formación Teposcolula, la diferencia en las vergencias es debido a la diferencia en competencia mecánica de las litologías involucradas y a la manera de que los paquetes de roca responden y reflejan los estados de

esfuerzos regionales. La secuencia cretácica está compuesta por calizas con mayor espesor y la secuencia jurásica tiene una menor competencia mecánica por estar constituida de lutitas y calizas de estratos más delgados.

Estas manifestaciones de la deformación proponen un nuevo modelo estructural distinto al antes conceptualizado por Caballero Miranda (1990) como "Homoclinal de Petlalcingo" en donde se plantea un modelo estructural con buzamiento constante en las estructuras hacia el NE y la ocurrencia de 3 fallas normales con dirección NW-SE que acomodan la repetición de las unidades. En el desarrollo de este trabajo se encontró que la estructura tiene una geometría con claros indicios de una deformación y cuerpos intrusivos a lo largo de las Fallas inferidas Ibarra y Rancho La Virgen.

Dentro de las estructuras que entran en la deformación frágil, la Falla Las Peñas se prolonga hasta el E del poblado El Sabino sobre el contacto entre la secuencia clástica Tecomazúchil y la unidad calcárea jurásica Solano. Este rasgo tiene una dirección norte a noroeste y sobre la traza se encuentran indicadores cinemáticos como crecimientos minerales y estrías de falla secundarios. La influencia de esta estructura solo afecta las secuencias jurásicas por lo que en relación con las estructuras plegadas están relacionadas a eventos de deformación de distinta edad.

La Falla Petlalcingo-Huajuapán es una falla inferida que posiblemente basculó a la cobertura sedimentaria pero no está del todo entendido si este basculamiento general hacia el NE es debido al plegamiento; al fallamiento o un fenómeno con la influencia de ambos eventos.

El desarrollo de la karstificación posiblemente se encuentra ligado con las estructuras locales y hacia la charnela del pliegue se encuentra una mayor densidad de fracturamiento, lo que favorece al desarrollo de las simas y posteriormente de las cuevas. Para determinar bien estos rasgos preferenciales es necesario realizar estudios a detalle para tener un mejor control de las estructuras y discernir con más elementos.

Hacia la base de la Formación Chimeco-Mapache se tiene la presencia de Yesos asociados a un ambiente evaporítico los cuales no habían sido reportados con anterioridad, el desarrollo de yesos también es importante dentro de la deformación ya que son litologías que sirven como superficies de deslizamiento.

La relación de los cuerpos de corte en las fracturas indica la relación temporal de las estructuras y ayuda a discernir entre las estructuras relacionadas a plegamiento o las que fueron formadas por la falla Petlalcingo-Huajuapán y las fracturas relacionadas al plegamiento de la secuencia cretácica. El sistema de fracturas asociado a plegamiento tiene una dirección promedio E-W, NEE-SWW. Para el sistema de fracturamiento de la unidad volcánica la dirección preferencial es: NW-SE; NWW-SEE.

Capítulo 6. Conclusiones

- En área estudiada se presentan estructuras plegadas y un basculamiento general de la cubierta sedimentaria hacia el NE. Se observó que a grandes escalas los mecanismos de deformación fueron plegamiento y fracturamiento.
- Las estructuras encontradas en la Caliza Teposcolula reflejan un estado de compresión con los esfuerzos principales en dirección SW-NE, en donde la unidad ha sufrido deformación y acortamiento siendo este manifiesto en el desarrollo de estructuras como pliegues por flexión de falla, rampas, duplex y pliegues por propagación de falla.
- Se identificaron dos eventos de deformación
- El primer evento se caracteriza por ser compresivo y desarrolló el plegamiento de la cobertura sedimentaria con una dirección preferencial de los planos axiales NW-SE
- El segundo evento es de carácter distensivo y se asocia al desarrollo de la Falla normal Petlalcingo Huajuapán (rumbo NW30°) y relacionado con esta estructura se encontró un sistema de fallas en las unidades volcánicas.
- Se encontró una parte superior de la Formación Teposcolula que puede ser subdividida debido a su contenido fosilífero y a sus características litológicas
- Se prolongó la falla Las peñas con componente lateral izquierda

En vista de la complejidad estratigráfica se propone realizar un estudio a detalle de las Formaciones Teposcolula, Chimeco y Mapache para entender mejor los ambientes de depositación y el desarrollo de estas unidades.

Con el propósito de entender el marco tectónico es necesario realizar análisis de geoquímica y delimitar bien los eventos de deformación así como sus alcances e implicaciones regionales, para estudios posteriores es de interés conocer los alcances de la Orogenia Laramide en las diferentes secuencias sedimentarias mesozoicas del sur de México.

7. Referencias

- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., 1997, Representación gráfica de los dominios de ruptura y deslizamiento: aplicación a la Falla de Oaxaca, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14, 26-37.
- Allmendinger, R., *Introduction to Structural Geology*, Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, USA, 1999.
- Bauer, F. Nacheiszeitliche karsformen in the Osterreichen kalkhochalpen, *Proceedings 2nd International Congress of Speology*. Bari-Lecce-Salerno, 1, 224-229 p.
- Campa, M.F., Coney, P.J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1040-1051.
- Carrasco-Velázquez, B.E., 2005, Paleokarst en rocas cretácicas de la plataforma de Actopan Hidalgo, Instituto de Geología, UNAM, Tesis de Doctorado, 105 p.
- Caballero-Miranda, C., 1990, Geología y Anisotropía del Jurásico Continental del área de Huajuapán de León-Petlalingo Estados de Oaxaca y Puebla: Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Maestría, 142 p.
- Caballero-Morales, G., 2008, *Diccionario del Idioma Mixteco (Tutu Tu'un Nuu Savi)*, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 811 p.
- Cerca, M., Ferrari, L. López-Martínez, M., Martiny, B., Iriondo, A., 2007, Late Cretaceous shortening and early Tertiary shearing in the central Sierra Madre del Sur, southern Mexico: Insights into the evolution of the Caribbean-North American plate interaction: *Tectonics*, v. 26, TC3007, doi:10.1029/2006TC001981.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J.L., Macías-Romo, C., Ortega-Rivera, A., Iriondo, A., 2005, La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales del sur de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVII, núm. 1, p. 83-109.
- Erben, H.K., 1956, El Jurásico Medio y el Calloviano de México: XX Congreso Geológico Internacional, México, 140 p.
- Ferrusquía-Villafranca, I., 1976, Estudios geológico-paleontológicos en la región Mixteca, parte 1: Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 97, 160 p.
- Galina-Hidalgo, S.M., 1996, Geocronología y paleomagnetismo de rocas intrusivas y volcánicas del área de Huajuapán de León, Oaxaca: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de maestría, 101 p.
- Galina-Hidalgo, S.M., Urrutia-Fucugauchi, J., Ruiz-Castellanos, M., Terrell, D., 2003, K/Ar dating and magnetostratigraphy of Cretaceous and Oligocene igneous rocks from Huajuapán de León-Petlalingo, Mixteca terrane, Mexico: *Abstracts*

with Programs, Geological Society of America, 99th Annual Meeting, Cordilleran Section, Puerto Vallarta, Jalisco, p. 8.

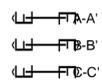
- González-Ramos, A., Sánchez-Rojas, L.E., Mota-Mota, S., Arceo y Cabrilla, F.A., Onofre-Espinoza, L., Zárate-López, J., Soto-Araiza, R., 2000, Carta geológico-minera de Oaxaca (E-14-9). Escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Gutiérrez-Elorza, M. 2008, Geomorfología, Pearson Prentice Hall, Madrid, España, 898 p.
- Jennings, J., N., 1985, Karst geomorphology, Blackwell, Oxford, 293 p.
- Ortega-Gutierrez, F., Elias-Herrera, M., Reyes, S.M., Macias, R.C., and Lopez, R. 1999. Late Ordovician – Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana–Laurentia connections. *Geology*, 27: 719–722.
- Pacheco-Gutiérrez, A., C., 2000, Deformación Transpresiva de edad Mioceno Medio y el desarrollo de sistemas de fracturas en la porción nororiental de la Sonda de Campeche, UNAM, Tesis de Maestría, 111 p.
- Price, N. J., Cosgrove, J.W., 1990, Analysis of Geological Structures, Cambridge University Press, 501 p.
- Martiny-Kramer, B. 2008, Estratigrafía y Geoquímica de las rocas magmáticas del Paleógeno en el occidente de Oaxaca y significado petrogenético y tectónico, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Tesis de Doctorado, 146 p.
- Morán-Zenteno, D. J., Caballero-Miranda, C.I., Silva-Romo, G., Ortega-Guerrero, B., and Gonzalez-Torres, E., 1993, Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the Northern Mixteca terrane, southern Mexico, *Geofísica Internacional*, Vol 32, Num. 3, p. 453-473.
- Morán-Zenteno D. J., 1987, Paleogeografía y paleomagnetismo precenozoicos del Terreno Mixteco, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Tesis de Maestría, 177 p.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Silva-Romo, G., Eguiza-Castro, M.H., Mendoza-Rosales, C.C., 2006, Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the eastern Sierra Madre del Sur, Mexico, inferred from the geometry and age of major structures: *Geological Society of America Bulletin*, v. 118, p. 1868-1882.
- Ramsay, John, G., Huber, M., The techniques of modern structural geology, Volume 2 Folds and Fractures, London: Academic Press, 1987, 391 p.
- Salas, G.P., 1949, Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 1, núm. 2, p. 79-156
- Salinas-Prieto, J.C., 1984, Los límites sur y occidental del Terreno, Mixteco. *Sociedad Geológica Mexicana, Boletín* 45, p.73-86.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., 2008. Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de

- Tamazulapam, sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.25, núm. 3, p. 494-516.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., y Speed, R. C., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *GSA Special Paper*, v. 278, 153 p.
- Stearns W. and Friedman, M., 1972, Reservoirs in Fractured Rocks: Stratigraphic Oil and Gas Fields; Classification, Exploration Methods and Case Histories. *American Association of Petroleum Geologists, Memorandum (16)*, p. 82-106.
- Suppe, J., 1983, Geometry and kinematics of fault-bend folding: *American Journal of Science*, v.283, p.684-721.
- Sweeting, M., M., 1972, *Karst landforms*, Macmillan, London, UK, 362 p.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G., Meza-Figueroa, D, M., Vega-Granillo, R., Campa-Uranga, M.F., 2005, U-Pb geochronology of the Acatlán Complex and implications for the Paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern Mexico: *Earth and Planetary Science Letters* 235 p. 682-699.
- Uribe-Luna, J., 1999, *Cartografía y Estratigrafía mediante sensores remotos en un Sistema de Información Geográfica: Área de Huajuapán de León, Oaxaca, México*, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Maestría, 117 p.
- Weber, B., Meschede, M., Ratschbacher, L., Frisch, W., 1997, Structure and kinematic of the Acatlán Complex in the Nuevos Horizontes-San Bernardo region Puebla, *Geofísica Internacional*, v 36, p 63-76.

609422 611422 613422 615422 617422 619422 621422 623422 625422 627422 629422 631422

Simbología

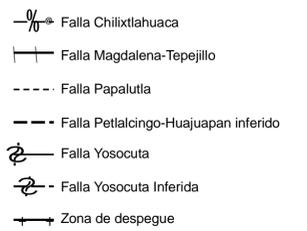
Secciones



Anticlinales



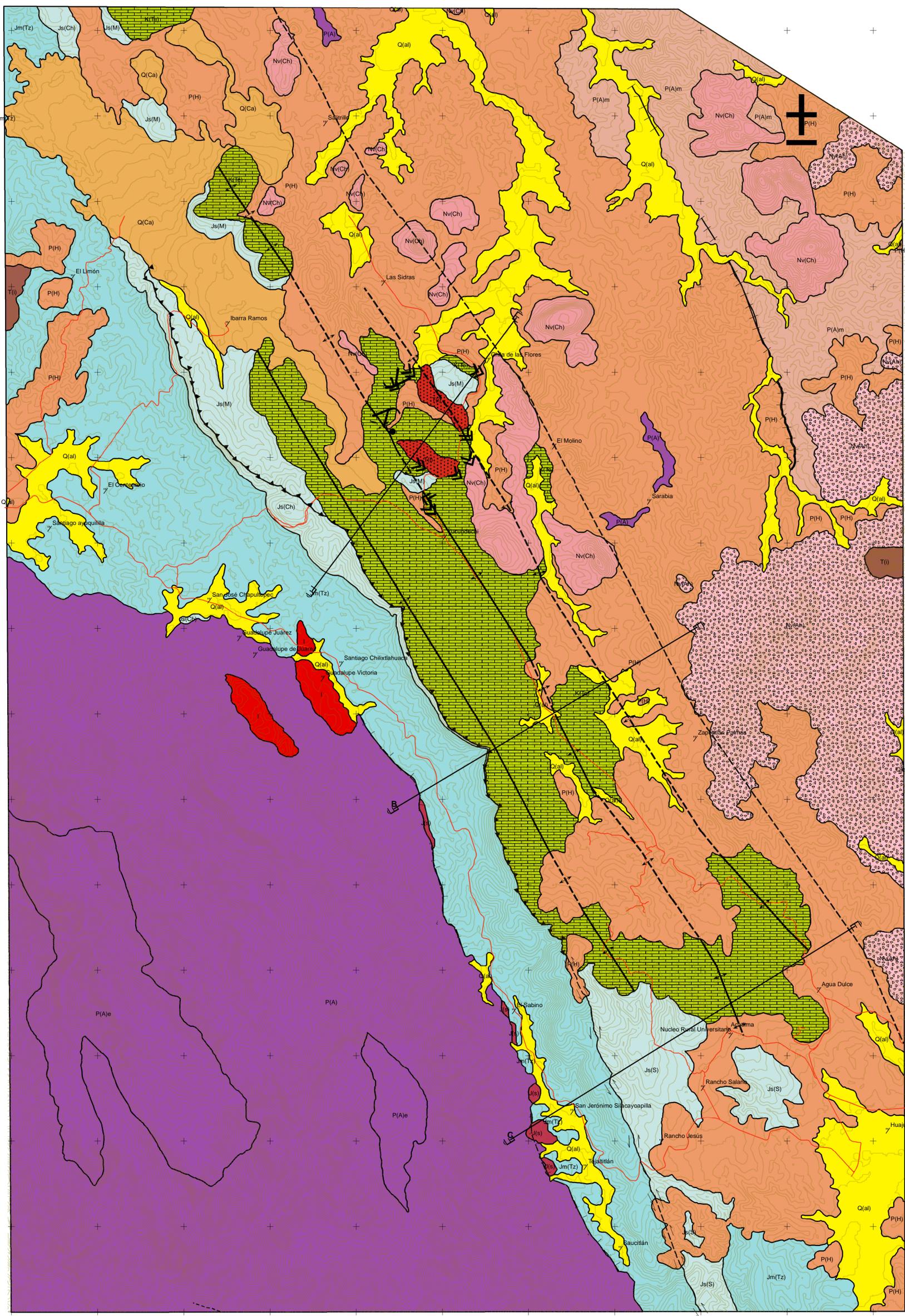
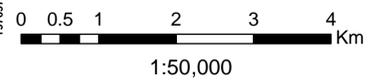
Fallas



Unidades

Litoestratigráficas

- Aluvión Q(al)
- Caliche Q(ca)
- Cuellos volcánicos Nv(l)
- Andesita basáltica Chila Nv(Ch)
- Unidad Ahuehuetlán Nv(Ah)
- Formación Huajuapán Pa(H)
- Formación Huajuapán Pa(H)
- Intrusivo diorítico N(l)
- Formación Tepecolula K(Te)
- Unidad Solano Js(S)
- Formación Mapache Js(M)
- Formación Chimeco Js(Ch)
- Cuerpo subvolcánico en Formación Tecamazúchil
- Formación Tecamazúchil Jm(Tz)
- Rocas monzo-diorítica de Santiago Chilixtlahuaca
- Migmatita Magdalena P(A)m
- Granitoides Esperanza P(Ge)
- Complejo Acatlán P(A)
- Caminos





Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería
Instituto de Geología

*Mapa Geológico
Huajuapán de León Oaxaca*

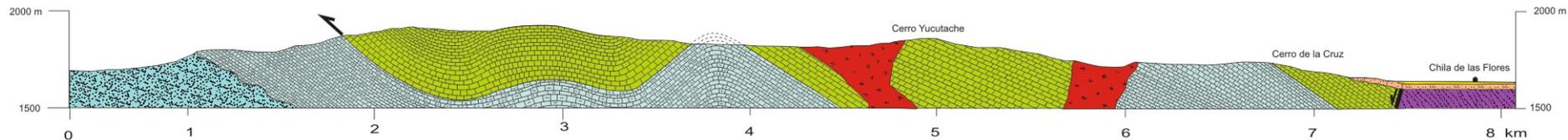
Elaboración:
Rodrigo Gutiérrez Navarro
René Morales Luis

Modificado de:
Caballero, 1990

609422 611422 613422 615422 617422 619422 621422 623422 625422 627422 629422 631422

SW

NE

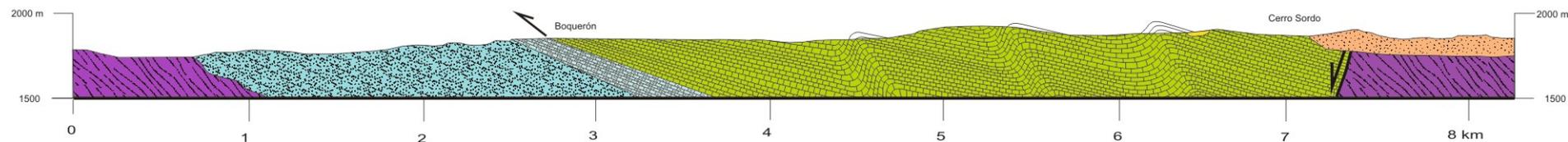


A

A'

SW

NE

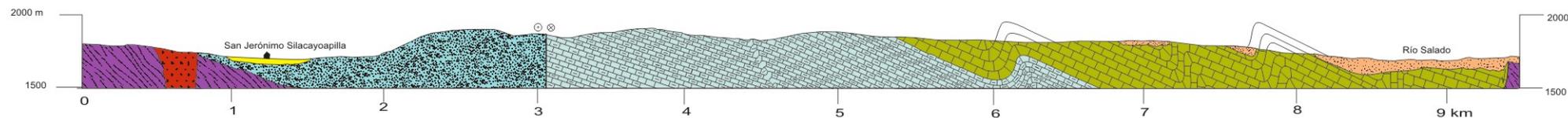


B

B'

SW

NE



C

C'

